

Ecole Nationale Polytechnique d'Oran- Maurice AUDIN
Département de Génie des Systèmes Informatiques

Intitulé de la matière: **Technologies des Réseaux Sans Fil**

Chapitre 4: Les Réseaux de Capteurs Sans fil

Mme Nawel BENDIMERAD

Année universitaire 2023/2024

Contenu du Chapitre 4

- 1/ Introduction
- 2/ Définition
- 3/ Domaines d'application
- 4/ Composants d'un nœud capteur
- 5/ Facteurs et contraintes d'influence
- 6/ La pile protocolaire
- 7/ Le routage dans les RCSF

1/ Introduction

- Les progrès technologiques réalisés dans les domaines de la miniaturisation des composants électroniques, la micro-électromécanique et de la standardisation des communications sans fil ont conduit à l'émergence des réseaux de capteurs sans fil (*RCSF*) (*WSN : Wireless Sensor Networks*).
- Au fil des années, avec la disponibilité du matériel et de dispositifs à un prix abordable, des capteurs de plus en plus sophistiqués ont été proposés, permettant de capturer des données scalaires ou encore multimédias dans le but de satisfaire une grande panoplie d'applications sur les *RCSF*.
- Ces capteurs déployés sur le terrain vont s'organiser en réseau de manière spontanée et collaborer entre eux pour capter des données et les acheminer à l'aide d'un schéma de routage multi-sauts jusqu'à un point de collecte, appelé Station de Base (*SB* ou *Sink*)

2/ Définition (1)

- Un *RCSF* est un réseau de type *Ad Hoc*, constitué de nombreux dispositifs très petits nommés «nœuds capteurs» variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs centaines, parfois plus, avec les caractéristiques suivantes:
 - Ils communiquent généralement par ondes radio, ayant une zone de couverture extrêmement réduite
 - Ils sont déployés de manière très dense dans des environnements aussi diverses qu'une maison, un commerce, un entrepôt, une ville, ou encore des environnements hostiles comme un terrain militaire, un site de tremblement de terre, ou même une forêt.
 - La topologie *Ad Hoc* de ces réseaux provient en particulier de l'épuisement progressif des batteries des capteurs, ce qui modifie la topologie du réseau au cours du temps.



MicaZ



Cyclops

2/ Définition (2)



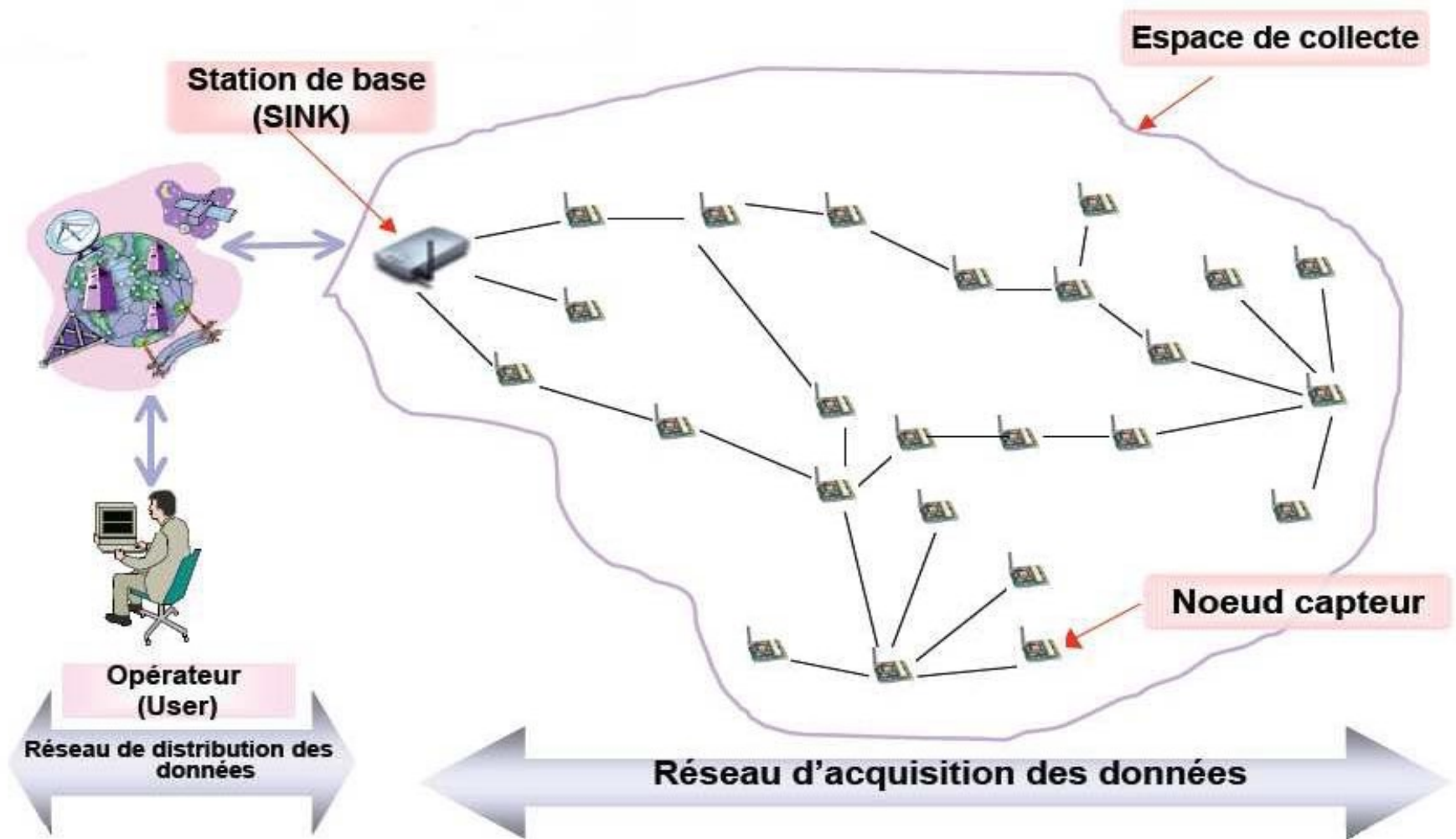
Arduino



IMote2

- Chaque nœud dans un *RCSF*:
 - est capable de détecter son environnement et de collaborer avec les autres nœuds afin d'envoyer les informations captées à un ou plusieurs points de collecte appelés puits (ou *Sink*), à l'aide d'une architecture multi-sauts.
 - dispose d'une source énergétique ayant une durée de vie limitée et dont le remplacement ou le rechargement peut s'avérer difficile ou parfois impossible.
- Le *Sink* transmet ensuite les données collectées par ces capteurs par Internet ou par satellite au gestionnaire de tâches pour les analyser et prendre des décisions.
- A un niveau plus élevé un RCSF peut être vu comme étant une combinaison de deux entités de réseau: un réseau **d'acquisition** des données et un réseau de **distribution** de données.

2/ Définition (3)

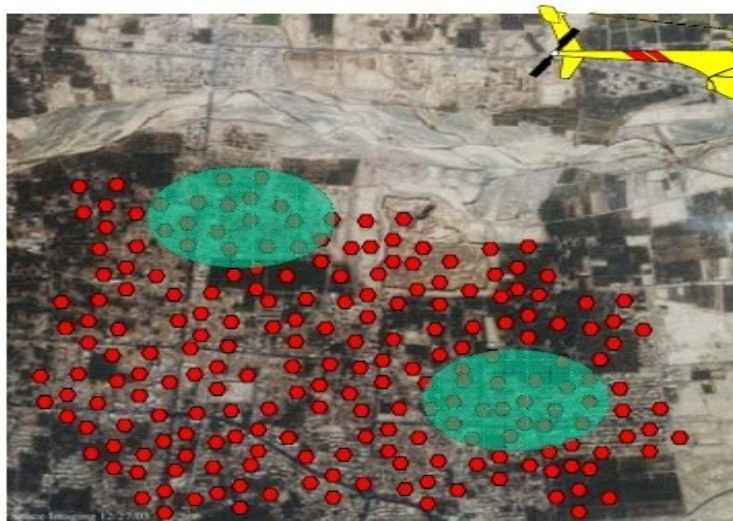


Exemple d'un réseau de capteur sans fil

3/ Domaines d'application (1)

- La taille de plus en plus réduite des capteurs, leur coût de plus en plus faible, la large gamme de types de capteurs disponibles (thermiques, multimédia, etc.) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux *RCSF* d'envahir plusieurs domaines d'applications.
- Nous pouvons citer les domaines suivants : militaire, environnemental, domestique, santé, sécurité, écologie, traçabilité, etc.

Disaster relief - Security



Real-time organization of rescue in large scale disasters



Rapid deployment of fire detection systems in high-risk and difficult-access locations

3/ Domaines d'application (2)

□ Sécurité



□ Commercial/Industriel



□ Environnemental



□ Militaire



□ Domotique



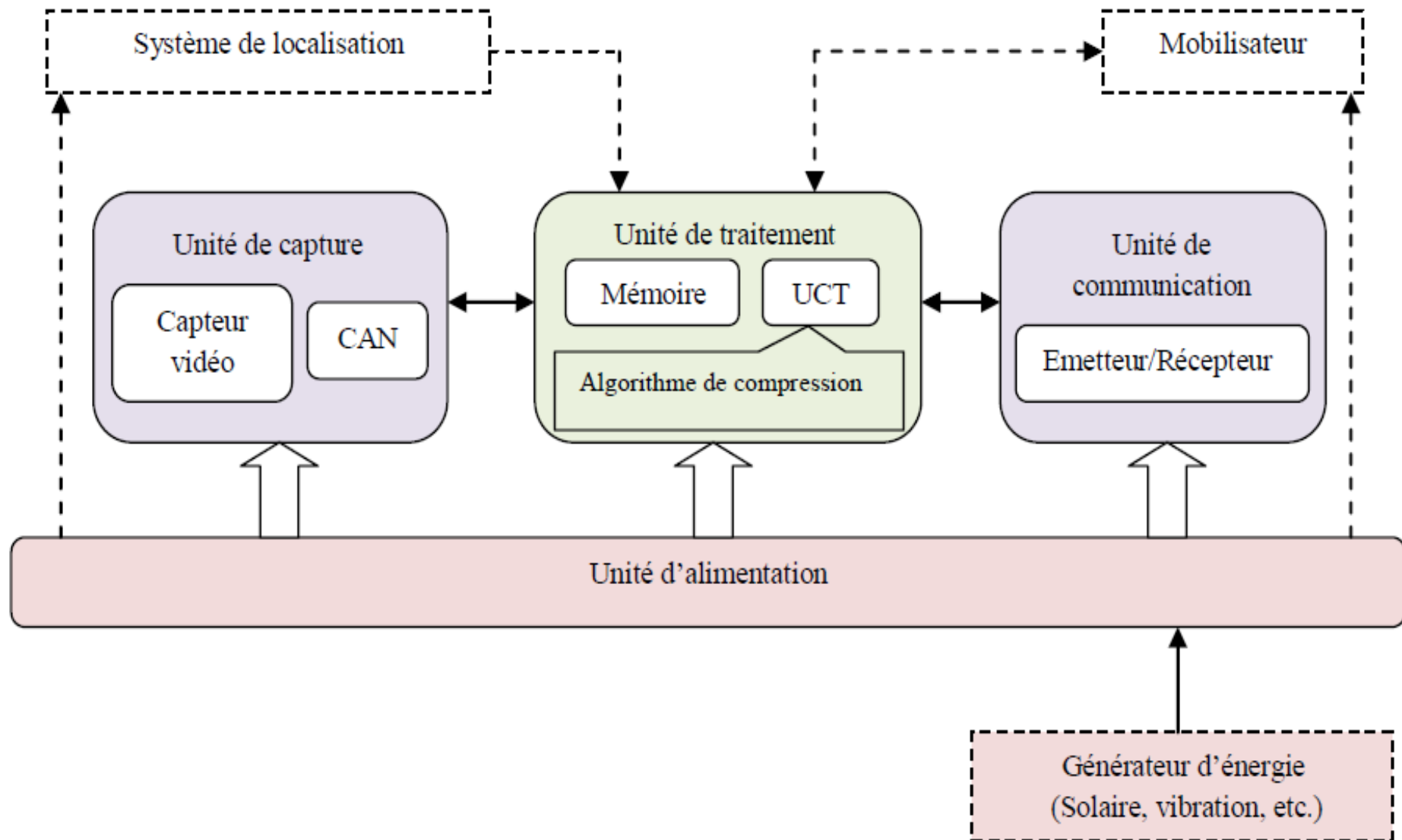
□ Agriculture



□ Médical



4/ Composants d'un nœud capteur (1)



4/ Composants d'un nœud capteur (2)

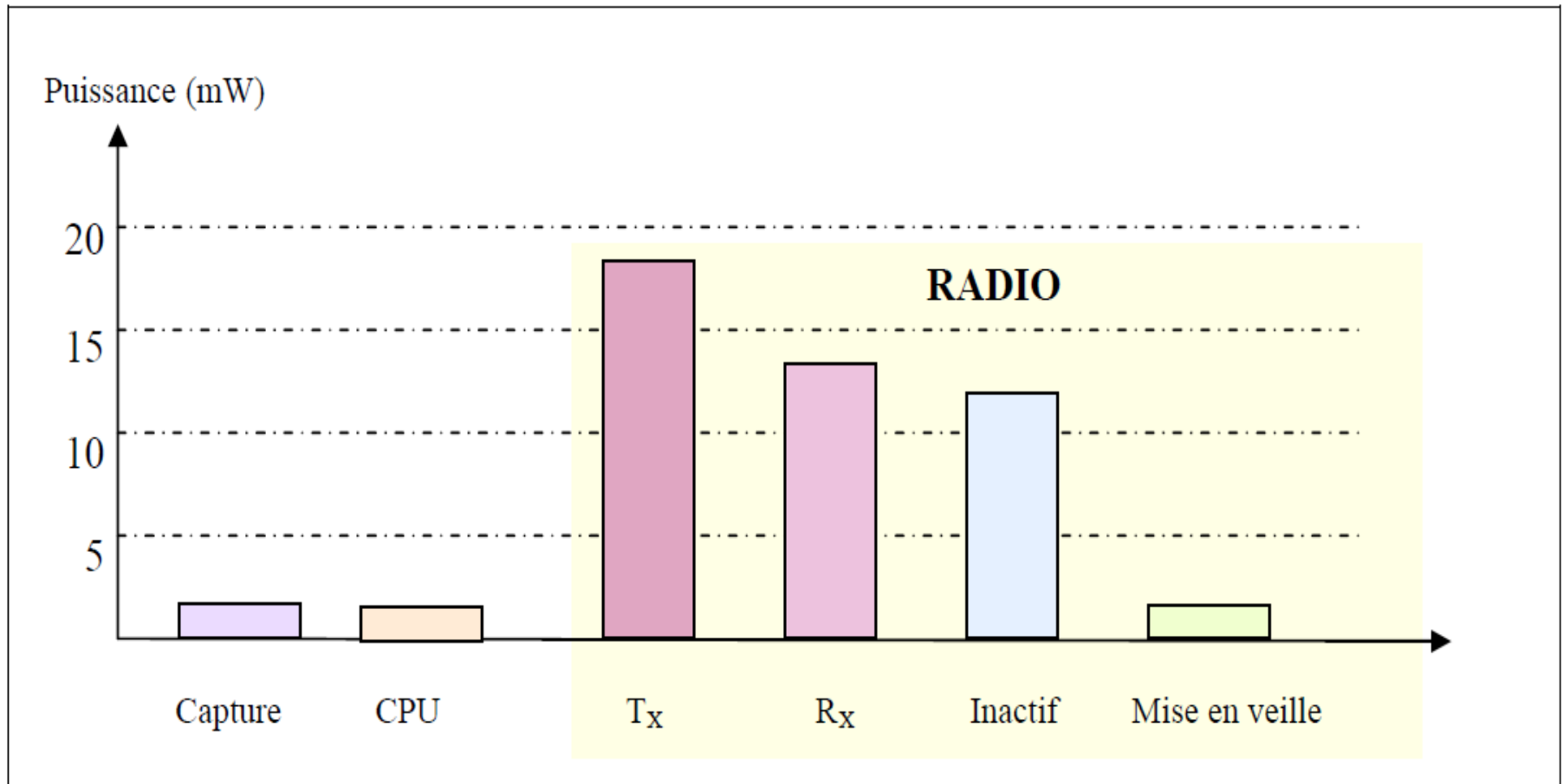
Un capteur se compose en général de quatre unités fondamentales :

- 1. Unité de capture** : contient le ou les capteurs embarqués sur le nœud afin d'assurer la collecte des données de l'environnement. Les signaux provenant du capteur sont convertis à l'aide d'un convertisseur analogique/numérique (CAN) en signaux compréhensibles par l'unité de traitement.
- 2. Unité de traitement** : se charge d'exploiter, de traiter et de conserver les données capturées à l'aide d'un processeur associé à un microcontrôleur. Il s'agit du module principal du capteur du moment qu'il contrôle le bon fonctionnement des autres unités.
- 3. Unité de communication** : elle permet au capteur de communiquer en sein du réseau à l'aide d'un couple émetteur/récepteur qu'on appelle aussi *transceiver*. Elle utilise essentiellement des technologies sans fil telle que le 802.15.4.

4/ Composants d'un nœud capteur (3)

- 4. Unité d'alimentation** : il s'agit de la source d'énergie qui alimente toutes les unités du capteur. Elle correspond généralement à une batterie ou une pile dont les ressources limitées en font l'une des contraintes majeures des RCSF.
- Par ailleurs, il est possible d'ajouter d'autres modules à cette architecture en fonction de l'application qu'on voudra réaliser.
 - Nous pouvons avoir une unité de localisation afin de déterminer la position géographique du capteur, en utilisant un récepteur *GPS* ou une technique de triangulation.
 - Certaines applications peuvent aussi avoir besoin d'un mobilisateur pour le déplacement des capteurs.
 - Un générateur d'énergie permet de prolonger la durée de vie du capteur en le dotant d'un dispositif pour recharger sa batterie, par exemple l'énergie provenant des cellules solaires, des vibrations, de la lumière, etc.

4/ Composants d'un nœud capteur (4)



L'énergie consommée pour chaque état et pour chaque action réalisée par le nœud capteur

5/ Facteurs et contraintes d'influence (1)

- Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture logicielle et physique des RCSF sont les suivants :
 - **L'environnement:** Les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits hostiles tels que des champs de bataille, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés, etc. Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiquement éloignées ou inaccessibles.
 - **Modèle de livraison des données:** Selon l'application, le modèle de livraison des données au *Sink* peut être continu, périodique, dirigé par événement ou par requête ou hybride.
 - **Le passage à l'échelle:** Le nombre aussi important de nœuds déployés engendre un trafic énorme dans le réseau, ce qui entraîne des congestions et des erreurs de communication. Ceci nécessite un protocole pour la communication capable de contrôler le flux, et que le nœud *Sink* soit équipé d'une capacité de stockage suffisante.

5/ Facteurs et contraintes d'influence (2)

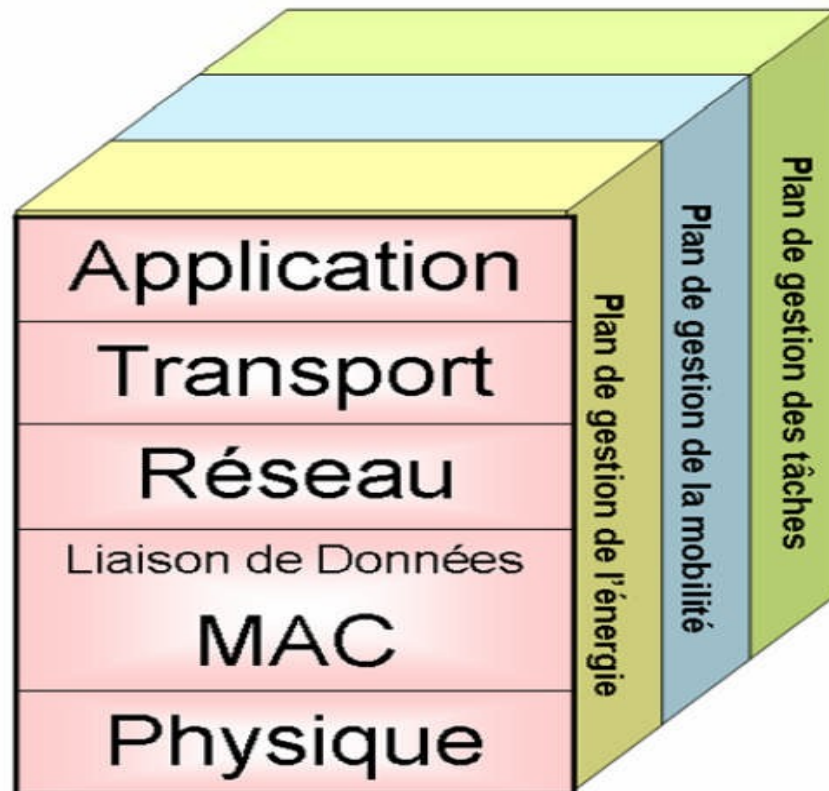
- **La topologie du réseau:** Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance se fait en trois phases : déploiement, post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner, etc.) et parfois le redéploiement de nœuds additionnels.
- **La connectivité:** La densité élevée des nœuds dans les RCSF les empêche d'être complètement isolés les uns des autres. Ceci, cependant, n'empêche pas la topologie du réseau d'être variable. En outre, la connectivité dépend de la distribution aléatoire des nœuds.
- **La tolérance aux fautes:** Certains nœuds capteurs peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, d'une défaillance matérielle ou d'une interférence. La tolérance aux fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruption en cas de défaillance d'un ou certain nombre de ses capteurs.

5/ Facteurs et contraintes d'influence (3)

- **La tolérance aux intrusions:** L'absence d'une protection physique des nœuds capteurs ainsi que la nature des liens sans fil utilisés pour la communication, rendent le réseau vulnérable aux attaques malveillantes. La tolérance aux intrusions implique la tolérance aux vulnérabilités, dont certaines sont inévitables pour améliorer à la fois la sécurité et l'utilisation du réseau.
- **Le média de transmission:** Afin d'être installés sans difficulté dans des zones ciblées et sans induire d'importants coûts de câblage, les capteurs utilisent des liens radiofréquence pour coopérer entre eux au sein du réseau.
- **Les contraintes matérielles:** En plus de leurs petites dimensions, les capteurs subissent de fortes contraintes, notamment d'énergie, de calcul et de stockage.

6/ La pile protocolaire (1)

- La pile protocolaire d'un nœud capteur comprend les couches application, transport, réseau, liaison de données et physique ;
- Ainsi que trois plans de gestion : le gestionnaire d'énergie, le gestionnaire de mobilité et le gestionnaire des tâches accessibles par toutes les couches de la pile.



6/ La pile protocolaire (2)

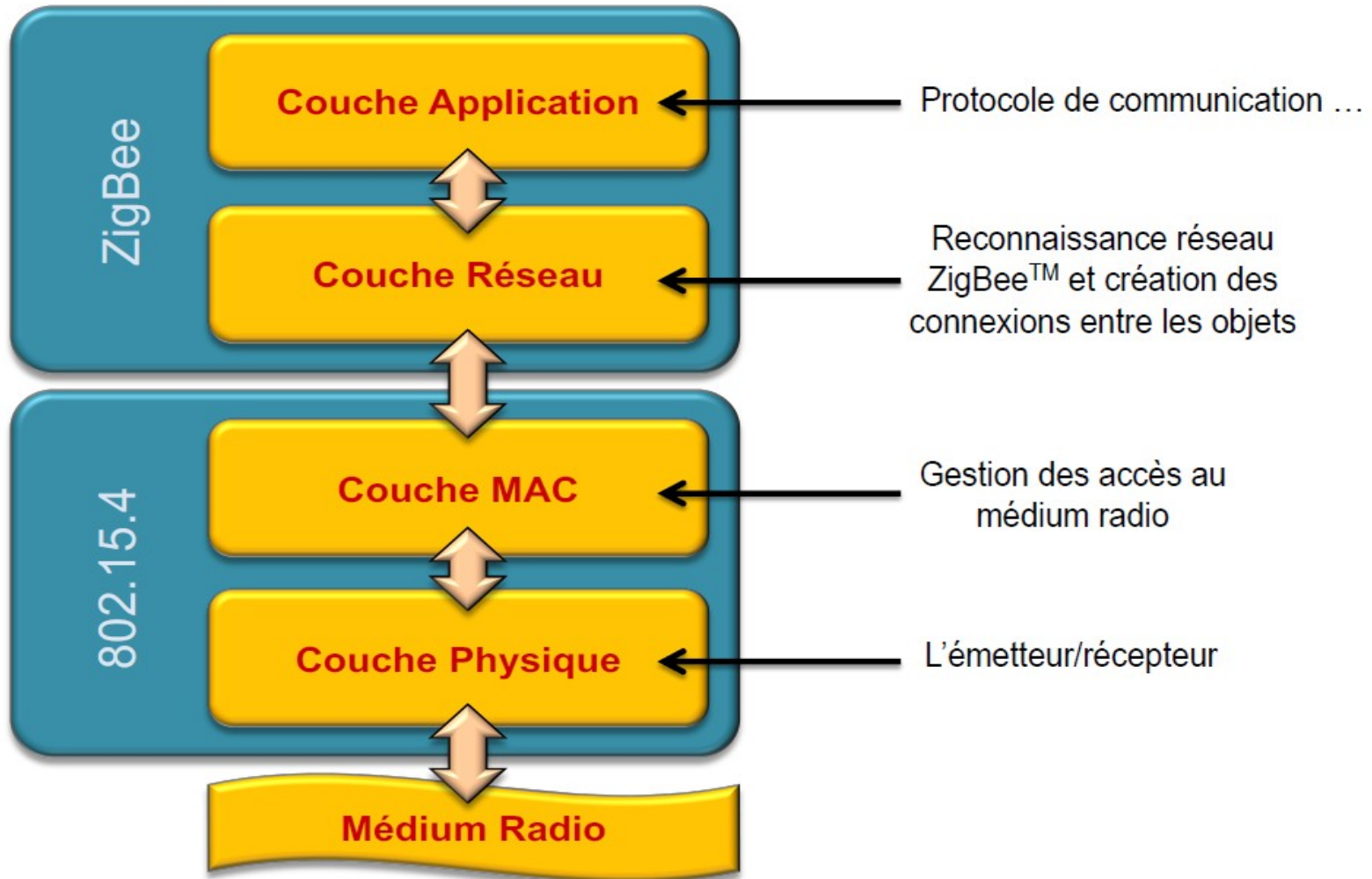
- Les plans de gestion sont nécessaires afin que les nœuds capteurs puissent fonctionner ensemble d'une manière efficace pour préserver l'énergie, router des données et partager les ressources entre les nœuds capteurs.
- **Le gestionnaire de l'énergie** contrôle comment le nœud capteur emploie son énergie et comment celle-ci est distribuée aux différentes unités qui composent le nœud capteur. Par exemple, si le nœud capteur est de faible énergie, il pourra informer les nœuds voisins par multicast qu'il ne pourra pas participer dans le routage des paquets.
- **Le gestionnaire de mobilité** surveille le voisinage pour savoir si un nœud capteur s'ajoute à son voisinage.
- **Le gestionnaire des tâches** gère les tâches accomplies par le nœud capteur. Par exemple s'il y a plusieurs nœuds capteurs pour observer le même objectif, il vaut mieux laisser cette tâche à quelques nœuds capteurs seulement pour économiser de l'énergie.^{1,7}

6/ La pile protocolaire (3)

- La technologie ZigBee combinée avec la norme IEEE 802.15.4 offre des caractéristiques répondant aux besoins des RCSF en termes d'économies d'énergie. Ce standard spécifie les couches basses, MAC et physique, pour les RCSF.
- Comme l'IEEE ne définit que la couche MAC et la couche physique, un groupe d'entreprises appelé la ZigBee Alliance a spécifié les couches hautes pour ce standard allant du routage à l'application, ce qui a donné naissance au protocole ZigBee.
- Un faible débit, une faible portée et une faible consommation énergétique sont les principales caractéristiques d'un réseau de capteurs classique : c'est pour cette raison que cette technologie est plus appropriée à ce type de réseaux qui utilise, comme Bluetooth et le WIFI, la bande de fréquence 2,4 GHz et offre un débit de 250 Kbit/s.

6/ La pile protocolaire (4)

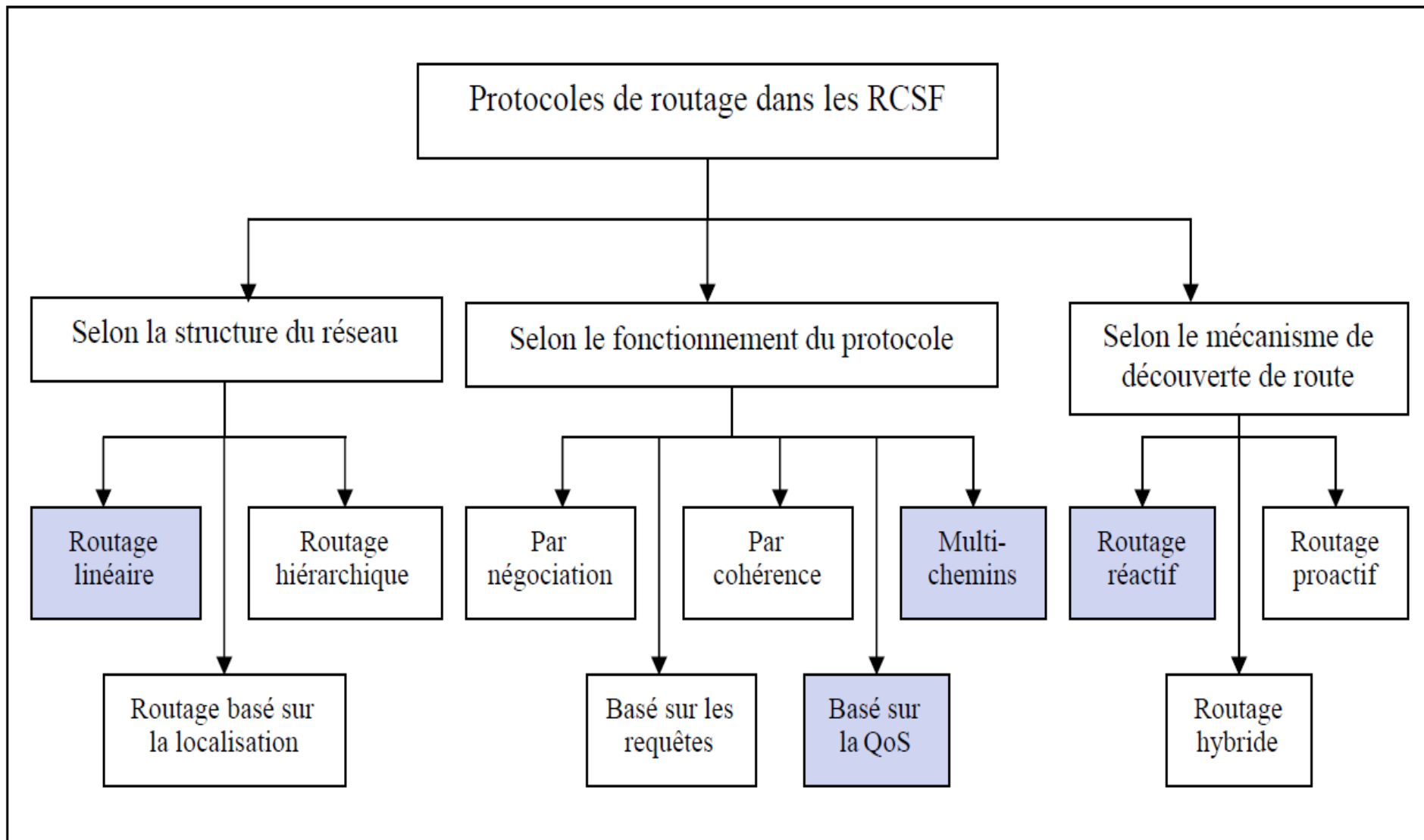
Pile de protocole ZigBee selon le modèle OSI



7/ Le routage dans les RCSF (1)

- Au niveau de la couche réseau, le but principal est de trouver un chemin d'un nœud capteur source vers le nœud destination (*Sink*) assurant une transmission fiable des données mesurées et en tenant compte des critères de routage fixés par l'application choisie.
- Comme les nœuds capteurs exigent une gestion soigneuse des ressources, la plupart des protocoles de routage utilisés dans les réseaux Ad Hoc s'adaptent mal aux particularités des *RCSF*.
- Afin d'exploiter un protocole de routage Ad Hoc, il est nécessaire de l'améliorer afin de satisfaire les contraintes des RCSF
- Cependant, plusieurs protocoles de routage ont été proposés uniquement pour les RCSF.
- Les protocoles de routage utilisés dans les RCSF peuvent être classifiés selon différents paramètres.

7/ Le routage dans les RCSF (2)



7/ Le routage dans les RCSF (3)

Protocoles de routage classés selon la structure du réseau

1. Routage Linéaire:

- Dans les réseaux linéaires, chaque nœud joue typiquement le même rôle et les nœuds capteurs collaborent ensemble pour accomplir leur tâche.
- Cette classe de protocoles est très proche de celle des protocoles centrés données (data centric), où la station de base envoie des questions à certaines régions et attend la réception des données collectées par les nœuds capteurs situés dans ces régions.
- Les protocoles de routage les plus connus de cette classe sont les suivant:
 - Le routage basé sur la négociation (SPIN : Sensor Protocols for Information via Negotiation).
 - La diffusion dirigée (DD : Directed Diffusion)

7/ Le routage dans les RCSF (4)

Protocoles de routage classés selon la structure du réseau

2. Routage hiérarchique

- Dans ce type de protocole des clusters sont créés et les nœuds peuvent jouer différents rôles dans le réseau.
- Son but est de maintenir efficacement la consommation d'énergie des nœuds capteurs en les impliquant dans une communication multi-sauts dans un cluster particulier (*Clustering*) où le coordinateur (*Clusterhead*) joue le rôle d'une passerelle vers la station de base en effectuant l'agrégation des données afin de diminuer le nombre de messages transmis au *Sink*.
- Exemples de protocoles de cette classe :
 - Hiérarchie de regroupement adaptative à faible énergie (LEACH : Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy).
 - Assemblage à puissance efficace dans les systèmes d'information de capteurs (PEGASIS : Power Efficient GATHERing in Sensor Information Systems).

7/ Le routage dans les RCSF (5)

Protocoles de routage classés selon la structure du réseau

3. Routage basé sur la localisation

- Dans ce type de routage, les nœuds capteurs sont adressés au moyen de leurs emplacements. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée sur la base des puissances du signal entrant. Les coordonnées relatives aux nœuds voisins peuvent être obtenues en échangeant de telles informations.
- Alternativement, le positionnement des nœuds peut être disponible directement en communiquant avec un satellite, en utilisant le GPS si les nœuds sont équipés d'un petit récepteur GPS de basse puissance.
- Exemples de protocoles de cette classe:
 - GAF (Geographic adaptive fidelity).
 - GEAR (Geographic and Energy Aware Routing).

7/ Le routage dans les RCSF (6)

Protocoles de routage classés selon le fonctionnement du protocole

1. Routage basé sur la négociation

- L'idée principale du routage par négociation dans les RCSF est de supprimer l'information dupliquée et d'empêcher les données redondantes d'être envoyées au prochain capteur ou à la station de base en conduisant une série de messages de négociation avant que la vraie transmission de données commence (exemple: SPIN).

2. Routage basé sur les requêtes

- Dans ce type de routage, le Sink génère des requêtes afin d'interroger les nœuds capteurs. Ces requêtes sont exprimées par un schéma valeur-attribut.
- Les nœuds qui détiennent les données requises doivent les envoyer au Sink à travers le chemin inverse de la requête.
- Les requêtes émises par le Sink peuvent aussi être ciblées sur des régions spécifiques du réseau (exemple: la diffusion dirigée).

7/ Le routage dans les RCSF (7)

Protocoles de routage classés selon le fonctionnement du protocole

3. Routage basé sur la cohérence

- Deux exemples de techniques de traitement sont proposés dans les *RCSF* : le routage basé sur le traitement cohérent et le routage basé sur le traitement non cohérent.
- Dans le routage à traitement non cohérent, les nœuds traitent localement les données brutes avant qu'elles soient envoyées à d'autres nœuds pour un traitement ultérieur.
- Les nœuds qui exécutent le traitement ultérieur s'appellent les nœuds agrégatifs.
- Dans le routage cohérent, les données sont expédiées aux nœuds agrégatifs après un traitement minimum. Ce dernier, inclut typiquement des tâches comme la suppression des doubles.
- Pour les protocoles de routage à efficacité énergétique, le choix de la technique de traitement cohérent est préférable.

7/ Le routage dans les RCSF (8)

Protocoles de routage classés selon le fonctionnement du protocole

4. Routage basé sur la QoS

- La QoS est définie comme un ensemble de besoins à assurer par le réseau pour le transport d'un trafic d'une source à une destination. Ces besoins peuvent être traduits en un ensemble d'attributs ou métriques pré-spécifiés et mesurables en termes par exemple de:
 - Délai de bout en bout,
 - Bande passante,
 - Pertes de paquets, etc.
- Selon le type d'application, les besoins de QoS sont différents.
- Par exemple, pour les applications temps réel, comme la voix et la vidéo, le délai de bout en bout d'un paquet doit être limité, autrement le paquet est inutile.
- Les applications qui ne sont pas en temps réel, comme le transfert de données non urgentes, quant à elles se focalisent sur la fiabilité des communications et l'optimisation de la consommation d'énergie.

7/ Le routage dans les RCSF (9)

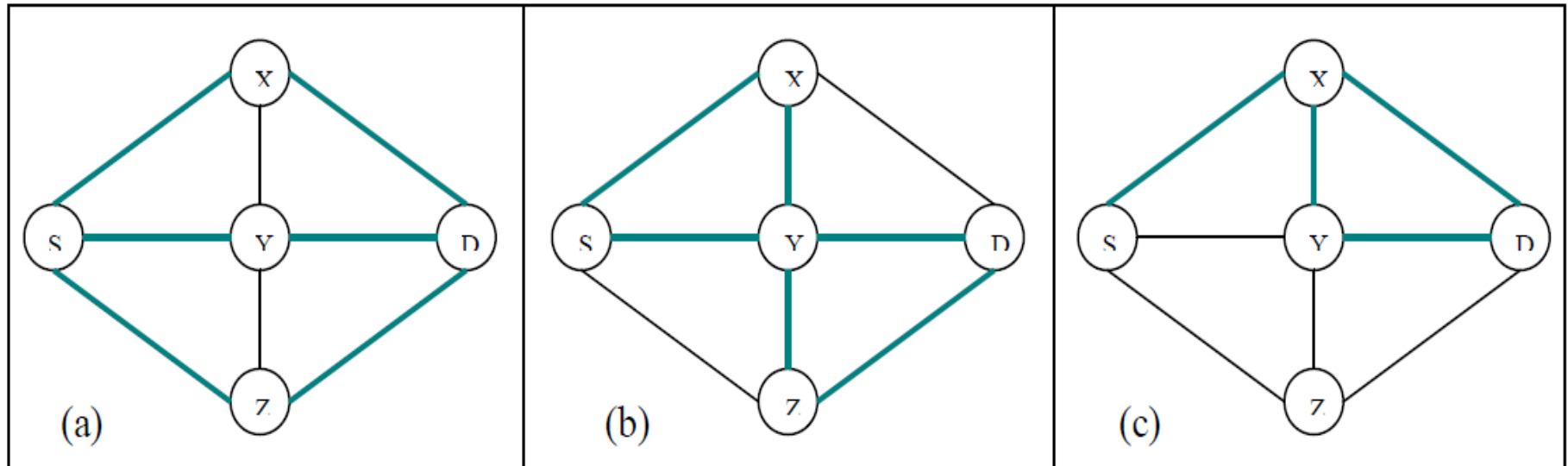
Protocoles de routage classés selon le fonctionnement du protocole

5. Routage basé sur l'approche multi-chemins

- L'approche du routage multi-chemins a été l'une des directions courantes les plus importantes dans le domaine du routage.
- Le concept du routage multi-chemins consiste à trouver pour chaque nœud source et à tout moment un multiple choix de chemins lui permettant d'atteindre une destination particulière.
- Les chemins multiples peuvent être utilisés soit alternativement, c'est-à-dire à un moment donné un seul chemin sera choisi, ou simultanément en utilisant plusieurs chemins en même temps.
- Ces chemins peuvent aussi être classés en trois catégories principales à savoir : les chemins à nœuds disjoints, à liens disjoints et non disjoints.

7/ Le routage dans les RCSF (10)

Protocoles de routage classés selon le fonctionnement du protocole



Les types de routage multi-chemins

- (a) SXD, SYD, et SZD sont des chemins à nœuds disjoints
- (b) SXYZD et SYD sont des chemins à liens disjoints
- (c) les chemins SXD et SXYD ne sont pas disjoints

7/ Le routage dans les RCSF (11)

Le protocole de routage SPIN

- SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) est un protocole de routage qui se base sur un modèle de négociation afin de propager l'information dans un réseau de capteurs.
- Le but de SPIN est de pallier aux problèmes de l'inondation qui sont dus à la duplication inutile des réceptions d'un même message.
- Afin de remédier à ces problèmes qui affectent grandement la durée de vie et les performances du réseau, le protocole SPIN adopte deux principes :
 - La négociation : pour éviter le problème d'implosion, SPIN précède l'émission d'une donnée par sa description, en utilisant la notion de méta-données. Le récepteur aura le choix par la suite d'accepter la donnée ou non suivant sa base d'intérêt.
 - L'adaptation aux ressources : d'une manière continue, les nœuds contrôlent leur niveau d'énergie. Le protocole SPIN accommode son exécution suivant l'énergie restante du capteur, et modifie en conséquence le comportement du nœud.

7/ Le routage dans les RCSF (12)

Le protocole de routage Directed Diffusion (DD)

- La diffusion dirigée est un protocole de propagation de données. C'est l'un des premiers protocoles proposés pour le routage centré-données dans les RCSF.
- Son utilité réside dans sa capacité à réduire considérablement le nombre d'opérations de la couche réseau par la création de plusieurs chemins pour le routage d'informations et ainsi permettre une économie d'énergie conséquente aux capteurs.
- Cette réduction d'opérations passe par une mise en place de quatre éléments :
 1. nomination des données (décrire les intérêts: la nature de la donnée à capter) ;
 2. propagation des intérêts (diffusion de la requête sur le réseau) ;
 3. propagation des données collectées par les nœuds capteurs ;
 4. renforcement des chemins de transport de données (propagation sur des chemins différents).