

### Réseaux de capteurs

Claude Chaudet Claude.Chaudet@enst.fr



### Applications typiques

#### **■**Collecte statistique de données

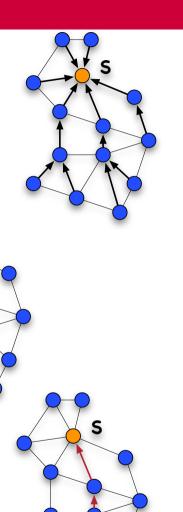
 Chaque élément du réseau envoie périodiquement un résultat de mesure à un point de collecte

#### ■Mesure à la demande

- Un centre de commande demande la mesure d'une grandeur à un endroit du réseau
- Les capteurs concernés renvoient le résultat de mesure correspondant

#### Détection d'événement

 Lorsqu'un événement survient (la température dépasse un certain seuil...), chaque capteur concerné envoie une notification à un point de collecte





### Conséquence sur le trafic réseau

#### Schéma de communication

- La plupart du trafic est convergeant (schéma de communication de n vers 1)
- Existence de trafic de 1 vers 1 (demande d'action, rapport d'une mesure, de l'occurrence d'un événement)
  - Implique très souvent le point central (source ou destination)

#### ■Profil de trafic

- Trafic périodique (n sources CBR ?)
- Trafic unicast éventuellement prioritaire (événement, commande)

#### Contraintes

- Bande passante nécessaire : assez faible (fonction de l'étendue du réseau)
- Délai borné pour certains messages (différentiation de services ?)



### Axes R&D

#### Objectifs

- Obtenir les informations requises (fréquence, valeur statistique, délai d'obtention, ...)
- Minimiser la consommation ⇒ maximiser la durée de vie du réseau / de l'application

#### ■Optimisations "Réseaux"

- Communiquer moins, plus efficacement
- Routage, couche MAC, etc.

#### Optimisations "systèmes embarqués"

- Algorithmique légère (TI MSP430F20xx : 200 μA par MIPS)
- Manque de mémoire traitement de l'information (statistiques)





## Les réseaux de capteurs sont des réseaux ad hoc

#### ■Réseaux à commutation de paquets

#### ■Réseaux sans-fil

- Utilisation d'un médium radio, bande des 2,4 GHz
- Protocoles d'accès au médium (ex : IEEE 802.15.4) semblables

#### ■Réseaux multi-sauts

- Protocoles de routage nécessaire dans les noeuds
- Réseaux auto-organisés : le point de décision central est éloigné de la plupart des noeuds ≈ pas de point de décision central (éventuellement définition de politiques).
- Problématiques de synchronisation (horloge), etc.



## **密**题

## Les réseaux de capteurs *ne sont pas* des réseaux ad hoc...

#### ■Profil de trafic

- Différent a priori, tout tourne autour d'un nombre limité de points centraux (similaire à clients-serveur ; réseau derrière NAT ?)
- Communication souvent uni-directionnelle ou sur invitation

#### ■Problématique n°1 : la durée de vie du réseau

Prioritaire (mais liée à) sur l'optimisation des performances (débit, etc.)

#### ■Moindre importance de l'identité des noeuds

- Application collaborative
- Importance forte de la localisation / datation des données
- Modification des paradigmes de sécurité...



### Durée de vie du réseau

- Le réseau doit assurer sa tâche aussi longtemps que possible
- Les transmissions doivent être assez efficaces pour les contraintes des applications
  - Taux de pertes, délai, débit, etc.

#### Qu'est-ce que la durée de vie du réseau

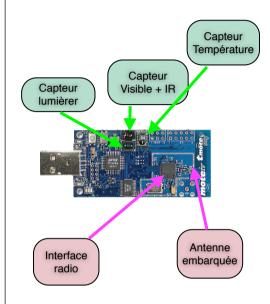
- Maximiser le délai avant que le <u>premier capteur</u> n'épuise sont énergie
- Maximiser le délai avant que le <u>dernier capteur</u> n'épuise sont énergie
- Maximiser le délai avant que le <u>réseau ne soit déconnecté</u>
- Maximiser le délai avant que une zone ne soit plus surveillée

• ...



### 選出

### Anatomie d'un capteur typique



#### Microcontroleur de faible puissance

• 8 MHz

#### ■ Mémoire limitée

RAM: 10kB

• Flash: 48 kB + 1MB

#### **■** Horloge imprécise

Dérive ± 40ppm

## Interface radio faible performance

• Bande des 2,4 GHz

Débit max. : 250 kb/s

• Taille max. de trame : 127 Bytes

### Énergie consommée par la radio

Émission: 19.5 mA

Réception: 21.8 mA

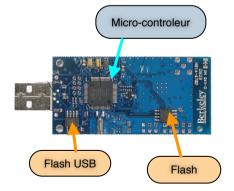
Micro-controleur seul: 1.8 mA

Capture: 54.5 µA

Mode veille: 5.1µA

Lecture flash: 4 mA

Écriture flash : 20 mA





### Bestiaire : explorer les spécifications

- Le compromis entre performance et consommation est identique sur tous les modèles
  - Recevoir une trame coûte toujours beaucoup d'énergie (CAN, extraction signal, ...)
  - L'écriture en mémoire flash aussi (effacement avant écriture)

	Vitesse μC	RAM	Flash	Tx Radio	Rx Radio	Veille	Lecture Flash	Écriture Flash
Moteiv Tmote Sky XBow TelosB	8 MHz	10 kB	48 kB + IMB	19.5 mA	21.8 mA	5.I μA	4 mA	20 mA
Intel iMote2	13-416 MHz	256kB	32 MB + 32 MB	44 mA (13 MHz) 66 mA (104 MHz)	44 mA (13 MHz) 66 mA (104 MHz)	387 µA	?	?
Sun SPOT	400 MHz	I MB	8 MB	40 mA	40 mA	33 µА	?	?

**Autres nœuds capteurs** (chiffres inconnus): SensLab (matériel identique Tmote Sky), WiseNET, Berkeley Picomotes, Wavenis Excelyo, ...

## Comment réaliser une bonne application capteurs ?

#### ■Améliorer la durée de vie :

- Émettre moins
  - Compresser et filtrer les informations
  - Minimiser le surcoût
  - Réduire le trafic de contrôle
- Recevoir moins
  - Préférer les zones de faible densité
  - Émettre quand les voisins sont en veille
- Limiter le stockage en flash

## Composer avec les faibles capacités :

- Éviter les traitements complexes
  - Cryptographie, calculs complexes dans le réseau
  - Au minimum, équilibrer la charge
- Limiter la taille des données manipulées
  - Tables de routage, cache de données, ...



# Couche MAC



## Limitations des couches inférieures (MAC et PHY)

#### **■**Débit généralement faible

- Un débit faible permet d'utiliser une modulation robuste et peu complexe => économe en énergie
- Possibilité d'Ultra-Wide Band, mais pas dans les bandes libres "basses fréquences" (868 MHz, 914 MHz, 2.4 GHz): largeur de bande insuffisante.
- IEEE 802.15.4 : 250 kb/s dans la bande des 2.4 GHz

#### Limitation de la taille de trames

- Limitation du fait du faible débit : ne pas occuper le canal trop longtemps (~5 ms)
- Limitation due au taux d'erreur-bit (valeur typique : 10-6)
- IEEE 802.14.5 : limite de la charge utile à 127 octets



### IEEE 802.15.4 : fonctionnement

■Processus d'émission d'une trame (IEEE 802.15\_4) :

- Attente d'un temps aléatoire (backoff)
- Examen de l'état du médium (occupé / libre)
- Transmission de la trame
- [Optionnel] attente d'un temps t\_ack
- [Optionnel] réception d'un acquittement
- Attente d'un temps LIFS ou SIFS (fonction de la longueur de la trame précédente)



### Consommation énergétique **IEEE 802.15.4 sur TI CC2420**

#### Examen de l'état du médium

Effectué une seule fois (CSMA/CA non slotté) ⇒ négligeable

**Emission d'une trame (débit : 250 kb/s)**40 10 10 20 10 ≤ 200

< 127020

Préamb.	SFD	PHR	Contrôle	Seq	addresses	charge utile	FCS
128 <i>µ</i> s	32 µs	32 µs	64 μs	32 µs	≤ 640 <i>µ</i> s	≤ 4064 <i>µ</i> s	64 µs

• ⇒ 992 µs + [ (taille données)/250000 ] µs à 19,5 mA  $\approx$  [ (taille données)/250000 ] . 5,417.10 <sup>-12</sup> + 5,373.10 <sup>-9</sup> Ah

#### ■Réception de l'acquittement

10 10 20 10 40

Préamb.	SFD	PHR	Contrôle	Seq	FCS
128 µs	32 µs	32 <i>µ</i> s	64 μs	32 µs	64 μs

•  $\Rightarrow$  352 µs à 21,8 mA  $\approx$  2,13.10<sup>-9</sup> Ah

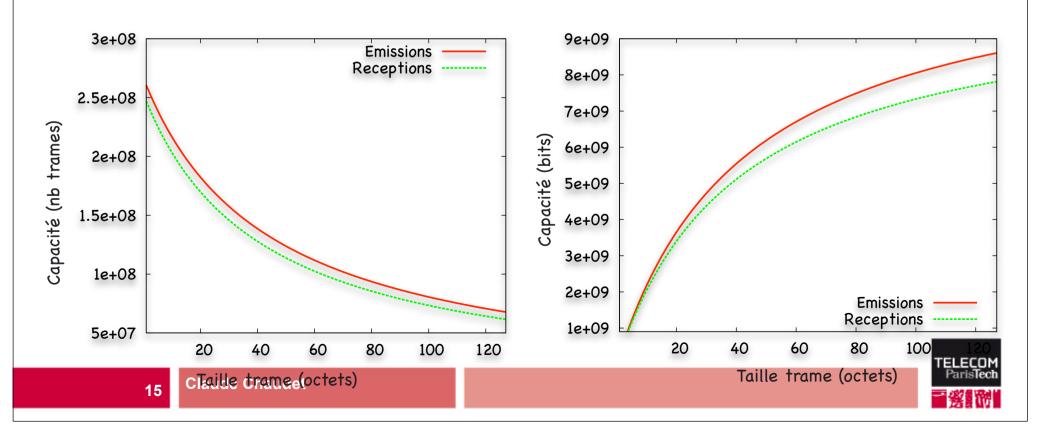


## Consommation énergétique IEEE 802.15.4 sur TI CC2420

#### ■Pour une charge utile de longueur L bits :

- Consommation par l'émetteur : (5,417 . L/250 + 7,5 ).10 -9 Ah
- Consommation par le(s) récepteur(s) : (6,055 . L/250 + 7,9 ).10 -9 Ah

#### Réserve d'énergie : piles alcalines (2 Ah)



### Lien entre consommation et densité

Le coût d'une émission / réception est une fonction affine du nombre de bits (L) transmis :

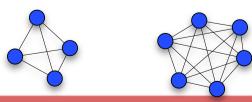
• 
$$C_E = \alpha_E.L + \beta_E$$
 ;  $C_R = \alpha_R.L + \beta_R$ 

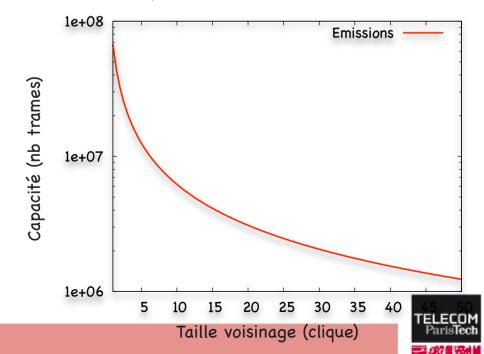
#### ■Influences sur les protocoles MAC :

Une trame émise est reçue par tous les voisins (vérification du FCS avant

filtrage adresse MAC - cf. IEEE 802.15.4 - §7.5.6.2).

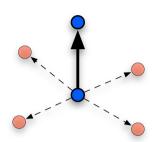
 Un réseau trop dense coûte très cher en performance (accès aléatoire) et en énergie.





## Limiter l'énergie consommée par la couche MAC

Idéalement, l'interface ne devrait être active que lors d'émissions ou de réceptions

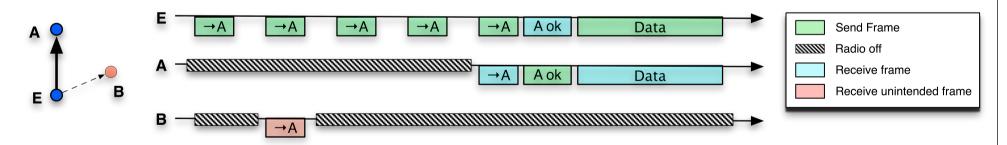


- Les solutions classiques engendrent un surcoût:
  - Stratégies de type CSMA/CA
    - Requièrent un examen régulier du médium pour être prêt à recevoir ⇒ écoute inutile.
    - Optimisations possibles (Filtrage dès réception de l'adresse) ne fonctionnent qu'une fois que l'en-tête MAC est décodée.
  - Synchronisation entre nœuds (rendez-vous)
    - Imparfaite à cause des dérives d'horloge
    - Dérive de ±40 ppm => en moyenne 1 seconde toutes les 7 heures ou 1 trame complète (127 bytes at 250 kb/s) toutes les 101,6 sec.



## Preamble Sampling / Low Power Listening / B-MAC et protocoles apparentés

- Les techniques de type Preamble sampling [1,2] sont de bons compléments aux approches sur rendez-vous :
  - L'émetteur envoie continuellement des préambules courts (par ex. contenant l'adresse de destination, laissant des intervalles pour que ce dernier acquitte)
  - Tout récepteur potentiel se réveille occasionnellement, examine le canal, capte un préambule. Le récepteur acquitte, les autres retournent en veille.



- Déporte la consommation de multiples récepteurs vers un seul émetteur
- [1] EI-Hoiydi et al. WiseMAC: an ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks ISCC 2004
- [2] Polastre et al. Versatile lowpower media access for wireless sensor network SenSys 2004



## Couplage *preamble sampling* / mises en veille

- L'émetteur consomme moins d'énergie si accord préalable sur une date de rendez-vous
  - Les préambules multiples permettent de compenser la dérive d'horloge



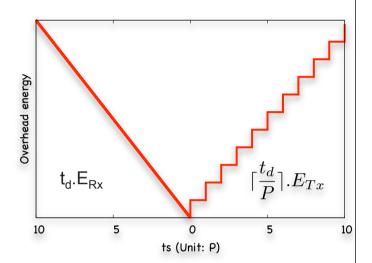
- Si le récepteur se réveille le premier, il écoute jusqu'à entendre un préambule.
- Si l'émetteur se réveille le premier, il envoie des préambules jusqu'à ce qu'un d'entre eux ne soit acquitté.



### Consommation espérée

#### ■Notations:

- Dérive d'horloge :  $\delta$  (IEEE 802.15.4 impose  $\delta \leq \pm$  40 ppm)
- Périodes de veille (s): T<sub>s</sub>
- Durée d'un préambule (s) : P
- Coût énergétique (W):
  E<sub>Rx</sub> à la reception ; E<sub>Tx</sub> à l'émission



## ■Estimation de la désynchronisation (t<sub>d</sub>) entre émetteur et récepteur

- Distribuée uniformément sur [ $T_s T_s.\delta$ ;  $T_s + T_s.\delta$ ]
- Si t<sub>d</sub> < 0 ; le récepteur "gâche" une énergie td.ERx
- Si t<sub>d</sub> > 0 ; l'émetteur "gâche" une énergie  $\lceil \frac{t_d}{P} \rceil . E_{Tx}$



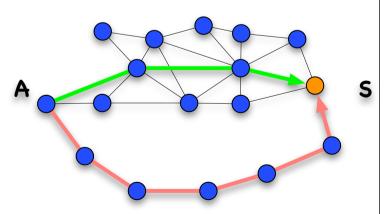




### Gestion énergétique et routage

#### ■Critères de sélection des routes peuvent être modifiés :

- Optimisation des performances :
  - Choisir les routes les plus courtes
  - Choisir les routes les moins chargées
- Optimisation de l'énergie
  - Choisir les routeurs auxquels il reste le plus d'énergie
  - Choisir les routes les moins denses
- ... où se situe le bon compromis entre toutes ces métriques ?
- Chemin vert : 3 émissions, 17 réceptions
  - 641,17 . 10<sup>-9</sup> Ah
- Chemin rouge : 6 émissions, 13 réceptions
  - 599,68 . 10<sup>-9</sup> Ah





## L'acheminement de données dans les réseaux de capteurs

Deux approches principales (i.e. avec du code disponible):

#### ■Tiny OS:

 Protocole CTP (Collection Tree Protocol), crée un arbre à partir du point de collecte en se basant sur la métrique de l'espérance du nombre de transmissions (ETX)

#### ■Groupe IETF ROLL: solution plus complète couche 3

- 6LowPAN => Adaptation d'IPv6 aux réseaux de capteurs
- RPL => création de graphes acycliques dirigés (DAG) pour le routage
- ICMPv6 => Transposition d'ICMP
- CoAP => Version allégée de HTTP pour interrogation asynchrone de capteurs



### Collection Tree Protocol [1]

#### But : créer un arbre de collecte de données efficace

- Collecte uniquement (1 seule destination)
- Ne nécessite pas d'adresses (anycast)
- Création d'un arbre couvrant à partir de la (les) racine(s)

#### ■Création de l'arbre : algorithme du vecteur de distance

- La racine envoie un paquet en diffusion (flooding)
- Chaque noeud du réseau recevant une instance de ce paquet
  - prend note qu'il existe plusieurs chemins vers la racine
  - les compare au moyen d'une métrique appelée ETX [2]
    - ETX : espérance du nombre de transmissions
  - Sélectionne le meilleur parent
  - Renvoie le paquet en broadcast local

$$ETX(a,b) = \frac{1}{D_{ab} \cdot D_{ba}}$$
 Probabilité de succès d'une transmission a->b

- [1] Gnawali et al., Collection Tree Protocol ACM SenSys 2009
- [2] De Couto et al. A high-throughput path metric for multihop-wireless routing Wireless Networks 11(4), 2005



#### **Collection Tree Protocol - Améliorations**

#### ■Mécanismes d'estimation de lien : vers du *cross-layer*

- 4-bits link estimator combine des estimations de
  - la couche physique (probabilité de décodage de chaque symbole)
  - la couche MAC (congestion, saturation du canal, etc.)
  - la couche réseau (qualité des routes, stabilité des routes, ...)
- Codé sur 4 bits (1 pour les couches physique & MAC; 2 pour le routage)
- Très bon taux de remise des paquets pour un coût raisonnable

#### Adaptation de la fréquence d'envoi des beacons en fonction de la dynamique du réseau

- Si l'état (voisins, parents, etc.) change => fréquence rapide
- En cas de stabilité => doubler l'intervalle à chaque fois
- Mécanisme classique permettant d'économiser des ressources et de rester réactif aux changements

## **Groupe IETF ROLL**

#### ■Routing over Low power and Lossy Networks

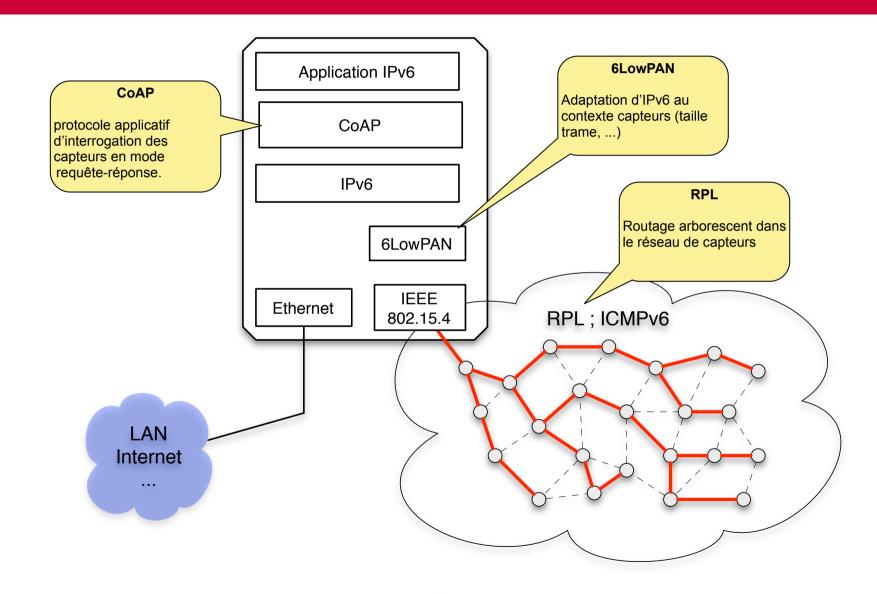
https://datatracker.ietf.org/wg/roll/charter/

## ■Définir une architecture de communication (couches hautes) complète pour des réseaux

- Contraints en ressources (énergie, mémoire, calcul ...)
- Avec une couche liaison peu fiable (IEEE 802.15.4, PLC)
  - Débit faible ; taux de pertes élevé ; taille de trame réduite
- Intermittents
  - Duty cycling (mises en veille, qualité de lien, ...)



## Architecture ROLL





### CoAP (Constrained Application Protocol)

- ■Protocole permettant d'interroger les capteurs
- ■Mécanisme de requête-réponse de type REST
  - Client-serveur
    - Interface unifiée
  - Sans contexte
    - un échange est généralement une seule requête-réponse
    - pas de notion de session au niveau des serveurs => échanges rapides
  - Caches possibles (si la réponse le permet) et transparents
    - Les requêtes concernent une donnée plutôt qu'un destinataire
- ■Interface de type HTTP
- ■Mécanisme de souscription et de *push*



## 6LowPAN — IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks

## ■Couche intermédiaire offrant une interface IPv6 à un réseau de capteurs

#### Adaptation de la taille des trames

- Mécanisme de fragmentation / réassemblage
  - IPv6 : taille minimale de paquet =1280 octets
  - IEEE 802.15.4 : taille maximale de trame =127 octets
- Mécanisme de compression des en-tête
  - En-tête MAC = 23 octets ; en-tête IPv6 = 40 octets ; en-tête UDP = 8 octets

#### Adaptation du Neighbor Discovery

- Pas de neighbor sollicitation en multicast (pas efficace) pour déterminer le préfixe du réseau
- ■Et beaucoup d'autres adaptations... —> RFC 4944



## RPL — IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks

- Protocole de routage construisant un DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph)
  - Draft IETF

#### ■Capable de construire plusieurs DODAGs

- Plusieurs destinations (racines)
- Plusieurs métriques de construction du DODAG (fonction objective)
- Maintient les routes vers la racine et optionnellement les routes vers les feuilles

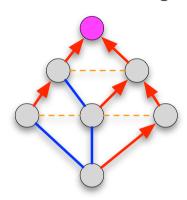


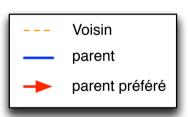
#### RPL - Construction des routes vers la racine

- ■Chaque nœud envoie régulièrement ou sur sollicitation un message d'information : DIO DODAG Information Object
  - émis en broadcast local
  - Contient des informations sur le DODAG
    - ID, version, mode de fonctionnement, ...
    - seule la racine peut définir / modifier ces informations
  - Continent une valeur de rang, version discrète d'une distance à la racine
  - Intervalle d'envoi croissant de façon exponentielle (trickle timer)

#### ■Un nœud connaît grâce aux DIO

- Ses voisins (tout nœud duquel on reçoit un DIO)
- Ses parents (tout nœud qui a un rang inférieur au sien d'au moins un seuil)
- Son parent préféré offrant le meilleur chemin vers la racine





### RPL - construction des routes descendantes

#### ■A priori seule la racine connaît les routes descendantes

- Mode optionnel (storing) permettant à tous les nœuds de maintenir les routes descendantes
- Consomme beaucoup de mémoire

## Repose sur l'envoi de messages *Destination*Advertisement Object (DAO) par les feuilles

- Envoyé à la racine en mode non-storing
- Envoyé à son ensemble de parents en mode storing



### Mais aussi...

## ■Beaucoup d'attention portée sur le routage, à l'image des réseaux *ad hoc*

- Quelle métrique utiliser (ETX, rapport signal à bruit, taux de pertes, énergie, longueur de route...)?
- Mono-destination ou interconnexion totale?
- Utilisation d'adresses ?

## ■De nombreux autres protocoles de routage adaptés au contexte des réseaux de capteurs

- Protocoles réactifs, adaptations d'AODV
  - 6LoWPAN Ad-Hoc On-demand Distance Vector Routing (LOAD)
  - Dynamic MANET On-demand for 6LoWPAN Routing (DYMO-low)
  - Hierarchical routing (HiLow)





### Déploiement / planification



### Influence sur le déploiement

- ■Dans les PRN / réseaux ad hoc, résultats sur les densités (déploiement aléatoire) nécessaires pour maintenir la connexité d'un réseau de n noeuds [1] :
  - Le nombre idéal de voisins est en Θ(log(n))
  - À moins de 0,074.log(n) voisins, la probabilité de déconnexion approche 1 lorsque n grandit
  - À plus de 5,1774.log(n) voisins, la probabilité de déconnexion approche 0 lorsque n grandit
- ■Quelle performance espérer d'un réseau de capteurs?
  - Consommation augmente avec le nombre de voisins...
  - Viser une densité minimale
- [1] Feng Xue, P.R. Kumar The Number of Neighbors Needed for Connectivity of Wireless Networks Wireless Networks 2004



#### Contraintes définissant la couverture

#### ■ Application : obtention de mesure statistiques

- Existence d'une corrélation entre les données
  - Trop de mesures : transmission de données inutiles
  - Trop peu de mesures : échantillonnage imparfait

## L'unité de capture définit la zone surveillée par le nœud

- Exemple : comment déployer un réseau de capteurs pour détecter les feux de forêt ?
  - Vitesse de propagation d'un feu : de 0,5 km/h à 6 km/h
  - Propagation de la chaleur : loi de Stefan-Boltzmann
  - Température de fonctionnement du capteur : ≤ 130 °C
  - Capteur directionnel ...



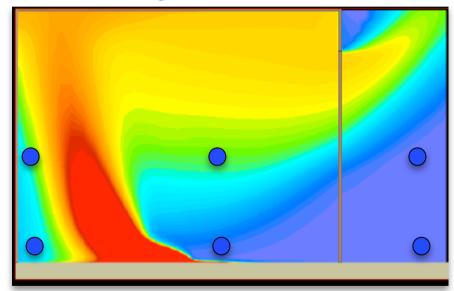
### Déploiement d'un réseau de capteurs

■Un capteur peut mesurer une donnée ; quelle est la validité spatiale et temporelle de cette donnée ?

• Ex : une mesure de température en intérieur est significative dans une

pièce, mais pas dans la pièce voisine

- Ex : une mesure de température est valide à une date t mais pas à t + 10 minutes
- ■Nécessité de bien caractériser l'application



Température dans une demi-pièce carrée de 2,8m x 2,8m + un dégagement de ventilation (droite) quelques instants après allumage d'un feu de methane (simulation)

Source : Flometrics

http://www.flomerics.com





### Conclusion

## Les réseaux de capteurs posent plusieurs challenges intéressants

- Réseaux radio multisauts
- Nœuds contraints (mémoire, ...)
- Optimisation de l'énergie (durée de vie du réseau)

#### ■Solutions de compromis à toutes les couches

- Communiquer peu, stocker peu, ...
- Solutions les plus efficaces reposant souvent sur la collaboration intercouches (cross-layer)
- Possibilité de récupération de l'énergie (soleil, vibrations,...)

#### ■Attention à l'application!

Comment corréler (ou ne pas corréler) les données ?

