

Communications temps-réel dans les WSN: protocoles MAC et routage

Isabelle Augé-Blum
Université de Lyon, INRIA
INSA-Lyon, CITI

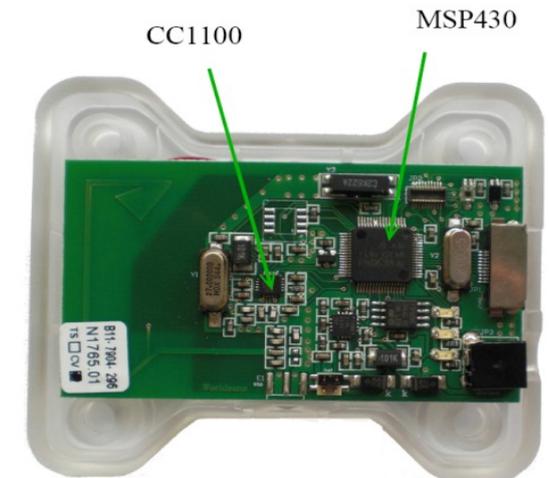
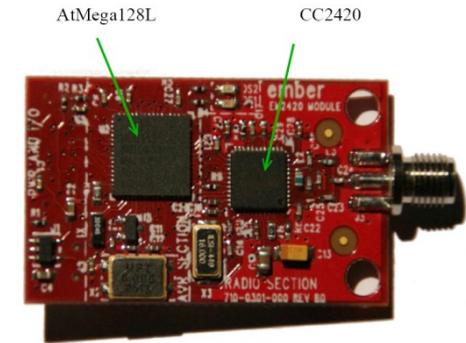
Journées Semba,
4 et 5 avril 2013, Domaine des Hautannes

Plan de la présentation

- Rappels succincts sur les WSN et le temps-réel
- Protocoles MAC
- Protocoles de routage
- Protocoles X-layers
- Remarques finales

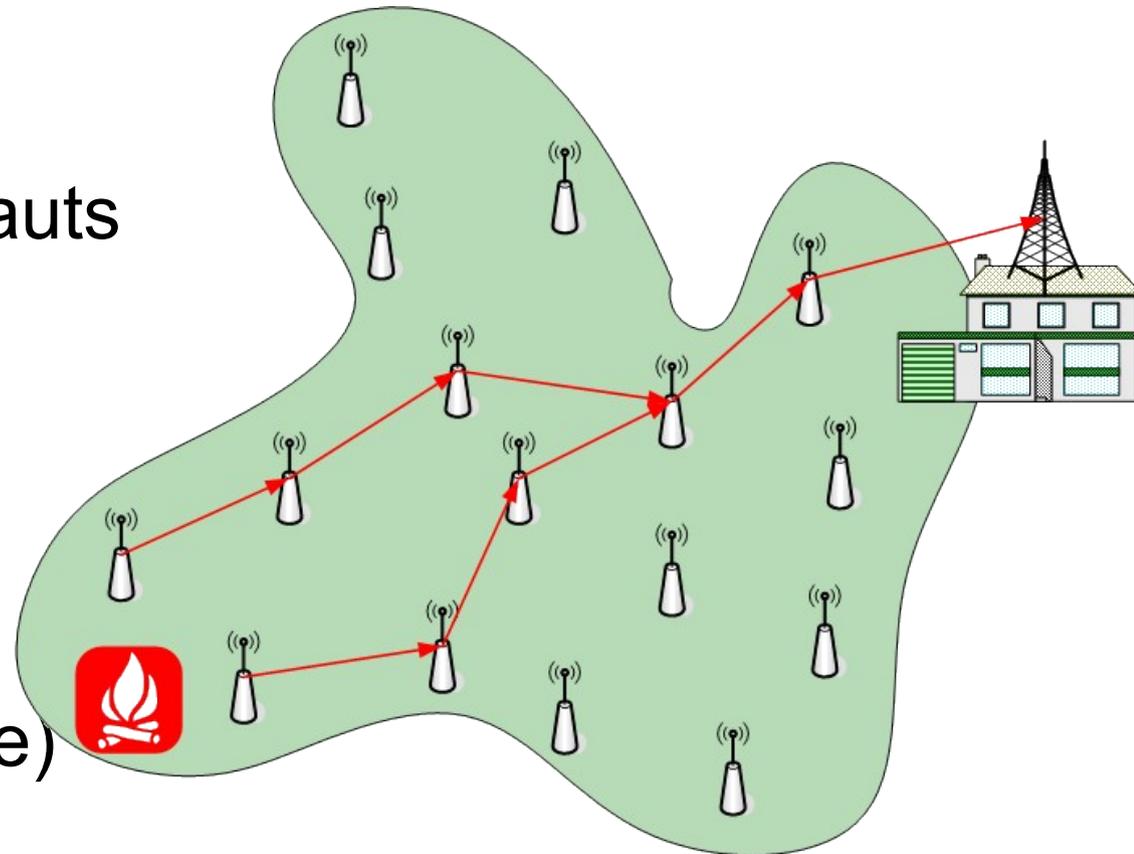
Wireless Sensor Network?

- Capteur?
 - Mesure des informations de l'environnement
 - Traite les informations
 - Communique grâce à une interface radio
 - Composant embarqué:
 - Mémoire limitée
 - Puissance de calcul limitée
 - **Énergie limitée**



Wireless Sensor Network?

- Pas d'infrastructure
 - Communication Multi-sauts
 - Topologie dynamique
- Autonomie
- Collecte des informations (many-to-one)



Exemples d'applications des WSN

- Suivi de sinistres / Militaire
- Contrôle environnemental
- Maison intelligente
- Santé
- Surveillance et sécurité
- Applications commerciales
- ...

=> Les contraintes temporelles et la criticité dépendent des applications.

Communication temps-réel

- Systèmes temps-réel : correction logique et temporelle des résultats
- Contraintes temporelles sont issues de la dynamique du phénomène physique contrôlé
- Temps-réel \neq rapide !!!
- Message en retard = perdu ou utilité amoindrie
- Si application distribuée:
 - \Rightarrow réseau doit permettre de respecter les contraintes temporelles de chaque message
 - \Rightarrow étude des cas pires (et non moyens)

WSN et les MANET (Mobile ad hoc networks)?

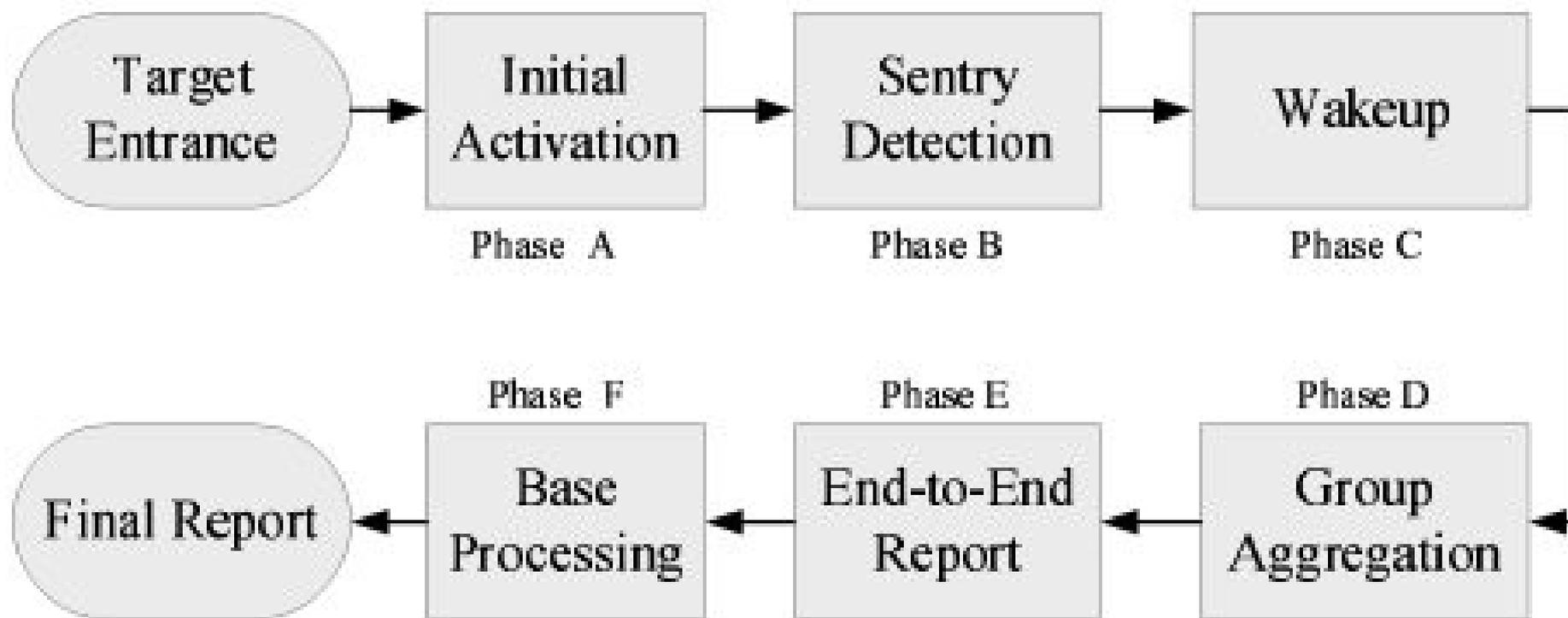
- Des similitudes:
 - Pas d'architecture fixe
 - Réseau autonome
 - Canal radio
- mais...
 - Mobilité
 - Type de trafic
 - Contraintes énergétiques
 - Passage à l'échelle

WSN et les Réseaux de terrain?

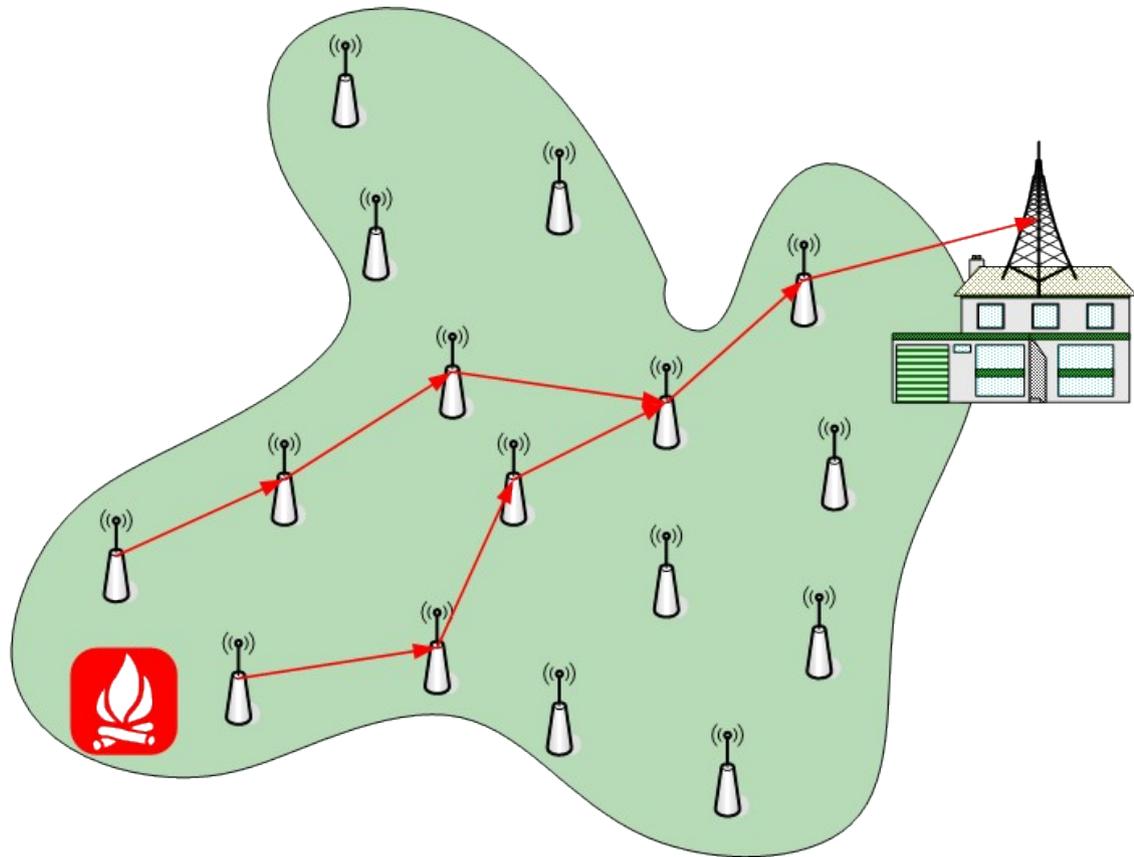
- Des similitudes:
 - Type d'applications (surveillance, contrôle)
 - Besoins: temps-réel, tolérances aux fautes
- mais...
 - Canal radio
 - Contraintes énergétiques
 - Passage à l'échelle

Et le temps-réel dans tout cela?

- Exemple des délais à considérer pour une application de Tracking: VigilNet



Protocoles de Communications



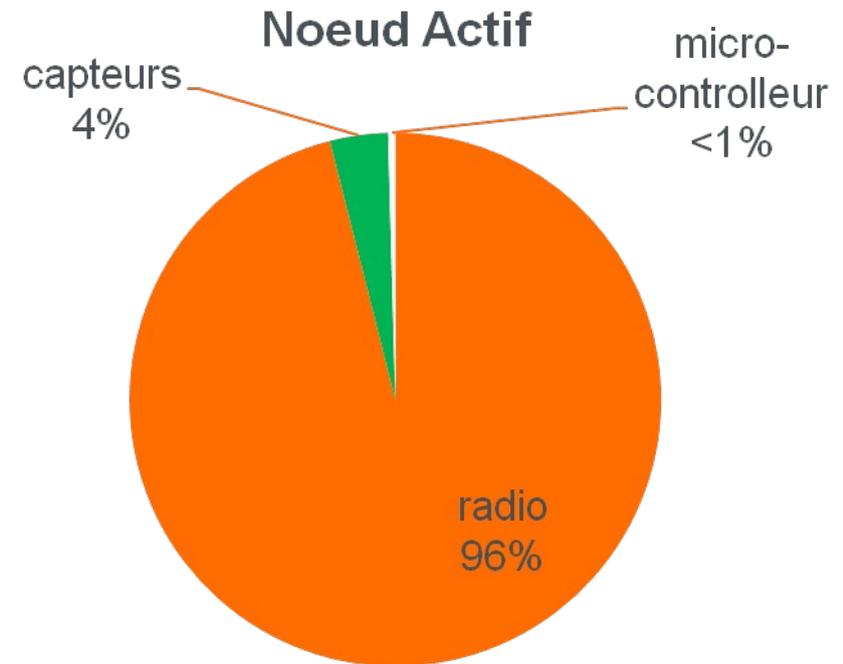
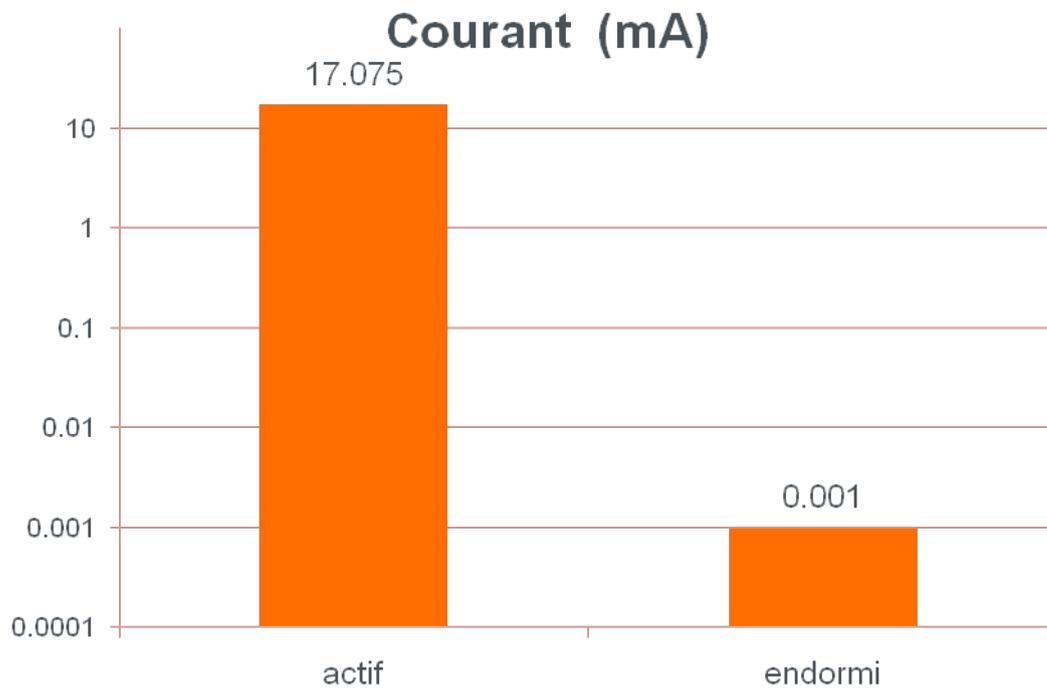
roulage

MAC

PHY

Principes des MAC pour WSN

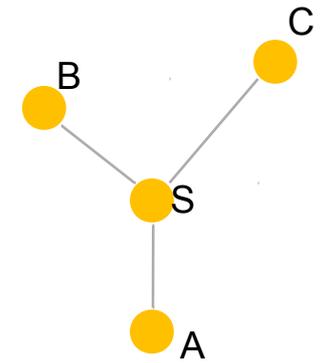
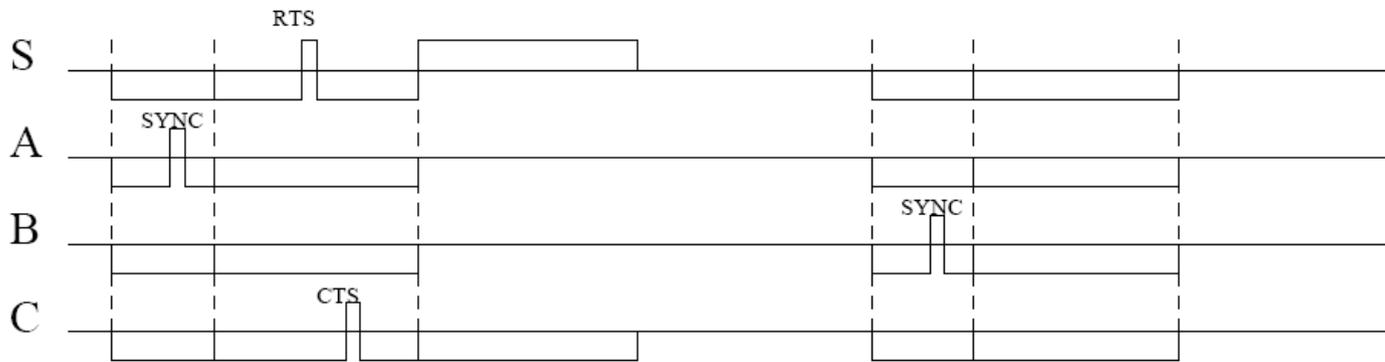
- But « classique »: économiser l'énergie



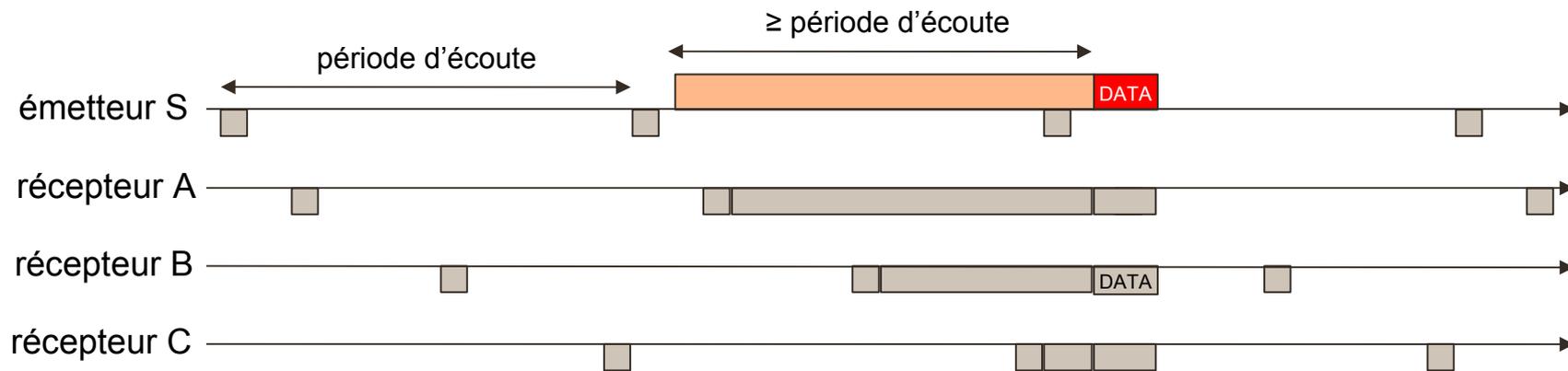
Principes des MAC pour WSN

- 2 Techniques principales:

- Synchronisation (S-MAC, ...)



- Échantillonnage de préambule (B-MAC, ...)



Principes des MAC pour WSN

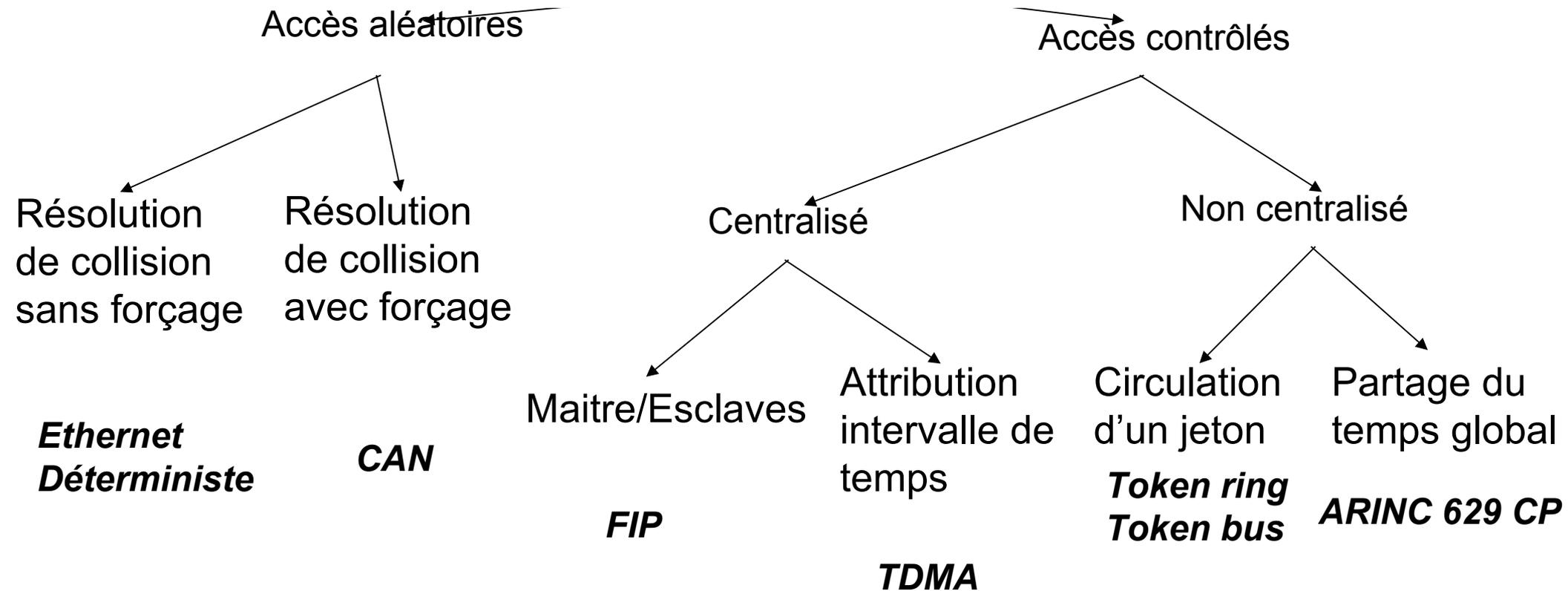
- Avantages:
 - Pas de synchronisation forte
 - Apparition / disparition de noeuds possible
- Problèmes:
 - Collision; résolution non déterministe

=> temps d'accès non déterministe

 - Les noeuds dorment la plupart du temps; délai de bout en bout (multisauts) peuvent être très longs...

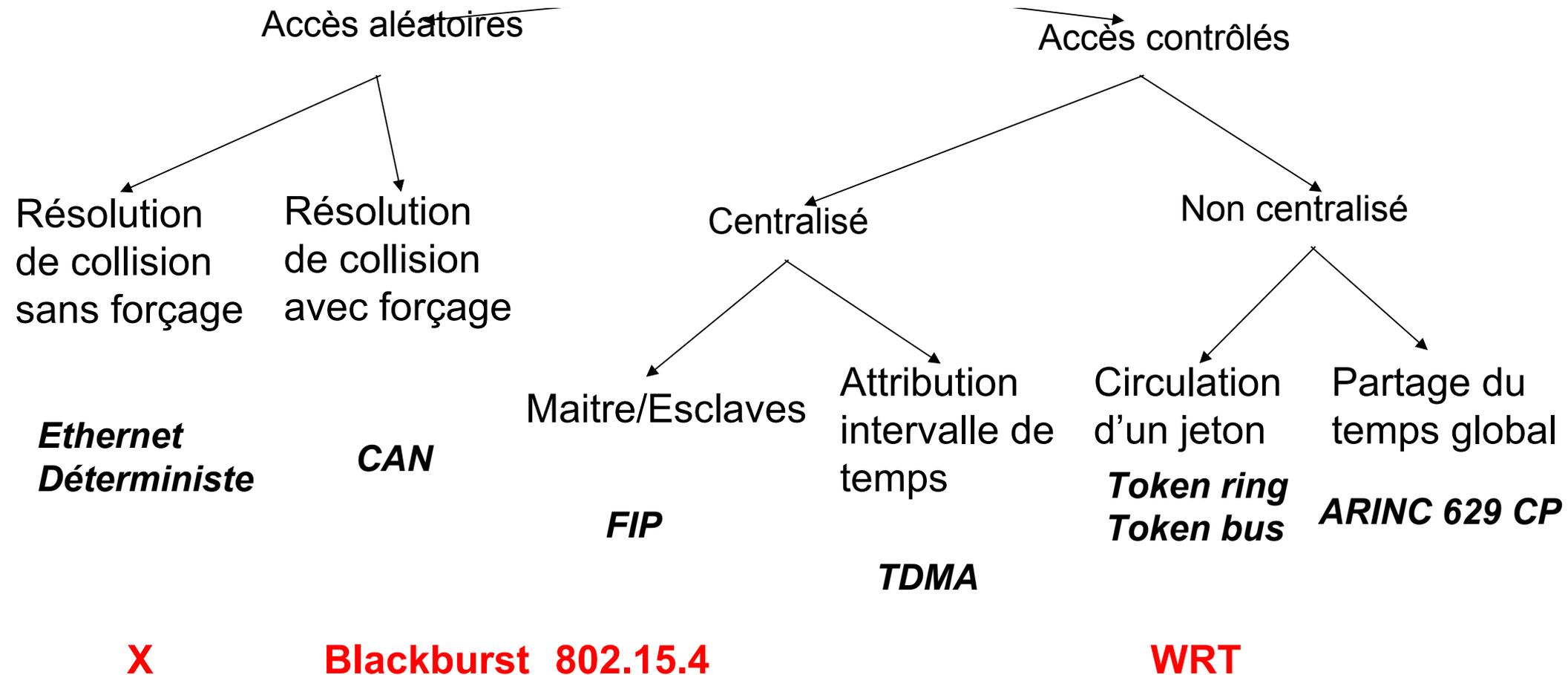
Adaptation des protocoles fieldbus

Partage du canal



Adaptation des protocoles fieldbus

Partage du canal

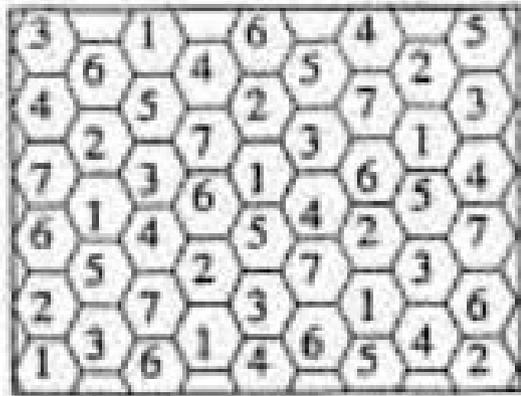


Adaptation des protocoles fieldbus

- Suppose que le réseau est complètement connecté
=> problème de passage à l'échelle
- Collisions
- Problème de l'énergie
- Et les protocoles TDMA?
 - Centralisés
 - Distribués

I-EDF

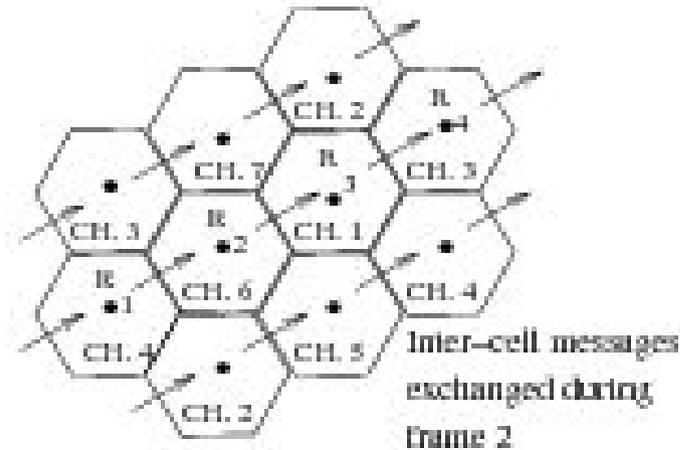
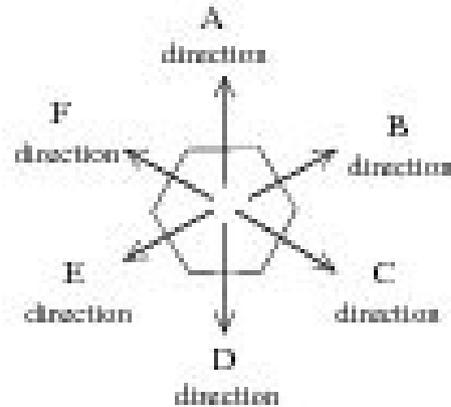
- Découpage en cellule



- Dans une cellule, tous les noeuds sont connectés
- 7 fréquences différentes
- Synchronisation nécessaire

- Messages périodiques + messages apériodiques non critiques
- 2 types de messages:
 - intra-cellule
 - inter-cellule: routeurs capables d'émettre et de recevoir en même temps (2 transceivers)

I-EDF



- 1 seul paquet par frame; les paquets ont une taille fixe, même puissance d'émission pour toutes les transmissions

I-EDF

- Communication Inter-cellule:
 - Les communications inter-cellules sont:
 - Centralisées sur le routeur
 - Ordonnées par Earliest deadline
 - Routage statique: on connaît le nombre de sauts
=> délai de bout-en-bout borné

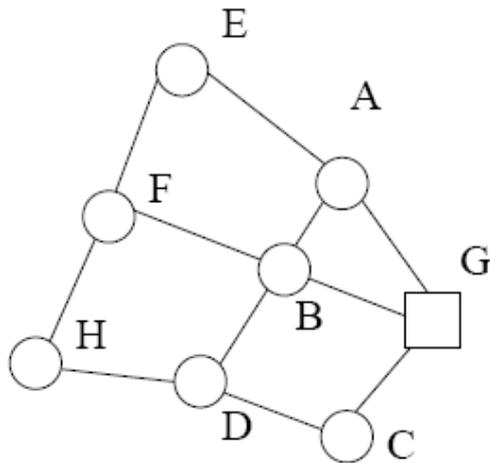
Ordonnancement centralisé sur le puits

- Le puits connaît la topologie du réseau complet
- Hypothèse peu réaliste dans le cas général, mais fréquemment adoptée: TSMP, PEDAMACS, RT-LINK, PR-MAC, Bit-MAC, ...

TSMP

- Basé TDMA avec FDMA
- Tous les noeuds sont synchronisés
- Le puits
 - Connaît la liste des noeuds et leurs voisins
 - Connaît les besoins en terme de trafic généré
 - Construit une table d'ordonnancement en temps et en fréquence

TSMP



ch.15									E->A	
ch.14	A->G			G->C						
ch.13						D->H				
ch.12		F->E					B->A			
ch.11					C->D					F->B
ch.10			G->B							
ch.9										
ch.8	E->F					G->A		B->G		
ch.7				D->B						A->E
ch.6					H->F					
ch.5		D->C					C->G			
ch.4								B->D		
ch.3										
ch.2	H->D					B->F				
ch.1			F->H							
ch.0					A->B					
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10

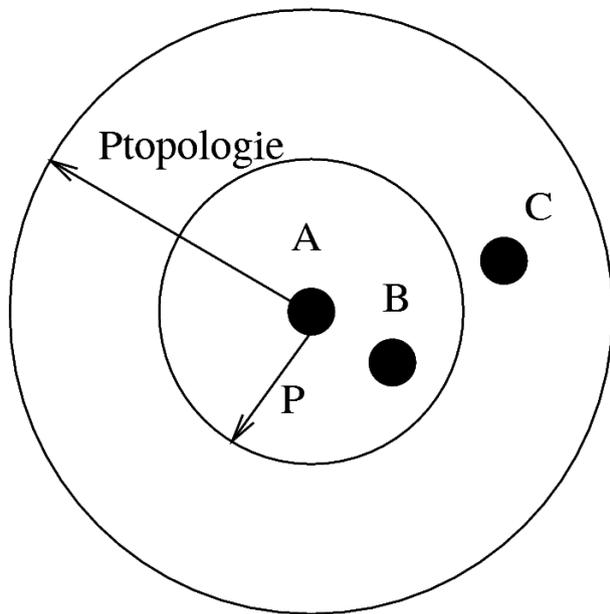
- Expérimentalement: taux de délivrance > 99.999%

PEDAMACS

- Hypothèses:
 - un seul puits collectant toutes les données
 - le puits peut atteindre tous les autres noeuds en 1 saut (communication asymétrique; le puits n'est pas limité en énergie... implique une limite géographique au réseau)
 - liens bidirectionnels
 - 3 puissances d'émission utilisées:
 - $P_{\max} > P_{\text{topologie}} > P$ (utilisée pour la transmission de données)

PEDAMACS

- $P_{\text{topologie}} > P$



- Si A émet à P
 - B reçoit la donnée
=> B est un voisin
 - C entend du bruit
=> C est un interfèrent
- Si A émet à P_{topologie},
B et C reçoivent la donnée,
mais avec des puissances
différentes

PEDAMACS

- Phase d'apprentissage de la topologie (CSMA : 802.11)
 - le puits envoie un paquet à puissance P_{max} à tous les noeuds avec (temps actuel, temps de prochain envoi)
 - => tous les noeuds sont synchronisés
 - le puits inonde le réseau (puissance $P_{topologie}$) avec un paquet contenant la distance au puits (en nbre de sauts) de l'émetteur
 - chaque noeud garde sa topologie locale (voisins + interférents) avec le nbre de sauts et la puissance reçue.
 - => construction d'un arbre de routage jusqu'au puits

PEDAMACS

- Phase de collecte de la topologie
 - le puits envoie un paquet « topology collection » +
(temps actuel, temps de prochain envoi)
 - chaque noeud transmet au puits, via son père, sa topologie locale
 - CSMA avec ack implicite (on entend la retransmission de son paquet par son père)

PEDAMACS

- Phase d'Ordonnancement
 - Le puits met en place l'ordonnancement de tous les noeuds (topologie complète connue)
 - Le puits broadcaste un paquet contenant l'ordonnancement total
 - Les noeuds envoient leurs données dans leurs slots + éventuellement des infos sur les changements locaux de topologie
 - L'ordonnancement est fonction de la topologie et non de l'application!!

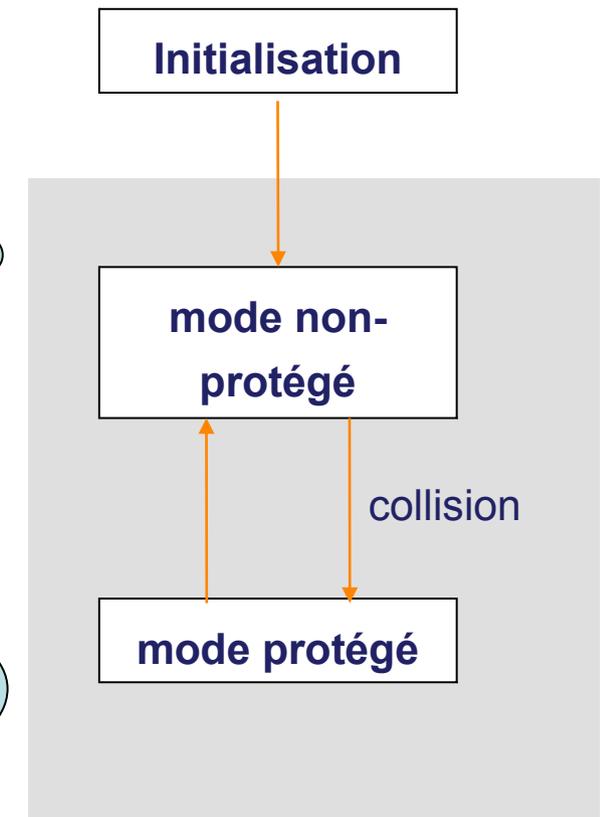
Dual-Mode

- Classe d'application:
réseau linéaire
 - Détection d'accidents sur autoroute
 - Suivi de trains sur voie ferrée
 - Surveillance de pipelines
 - ...

- Idée générale:

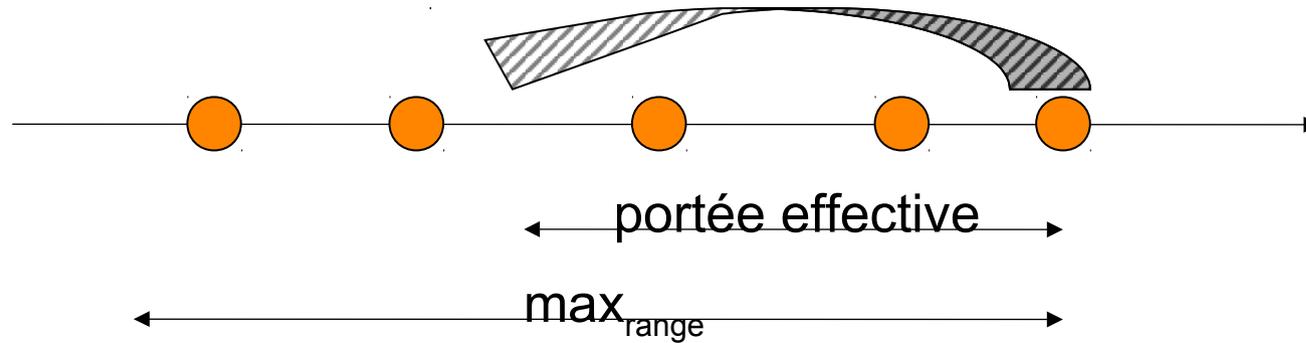
Vitesse de transmission quasi-optimale

Moins rapide mais délai garanti



Dual-Mode

- Mode non protégé:

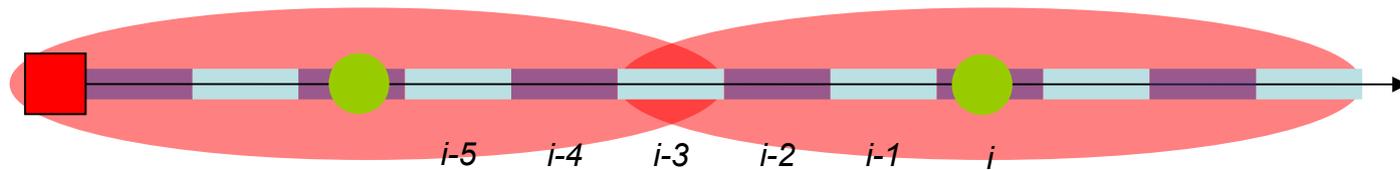


Quasi-optimal

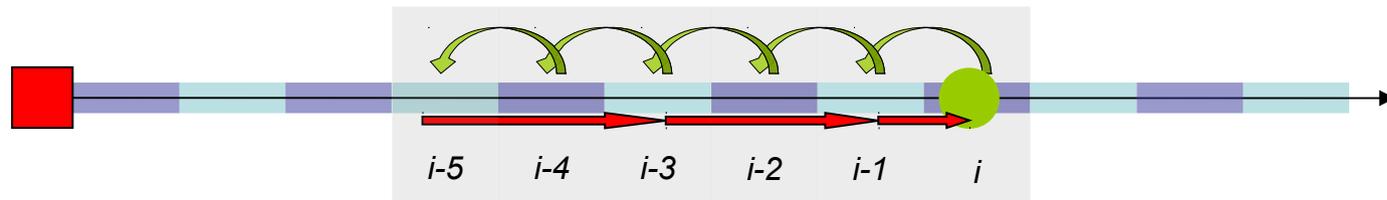
$$backoff_{unprotected} \propto A - (A_{emitting} - \max_{range})$$

Dual-Mode

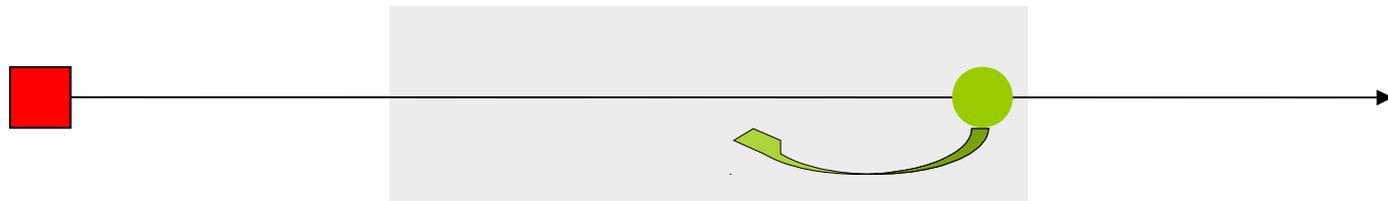
- Mode protégé:



Protection d'une portion du réseau...



... et envoi du message d'alarme



MAC basé contention

- F-MAC garantit un délai borné sans synchronisation

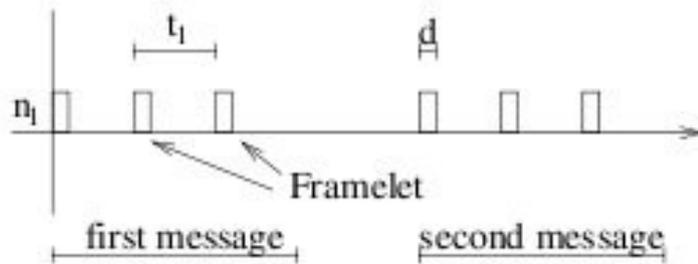


Fig. 1. Framelet transmission

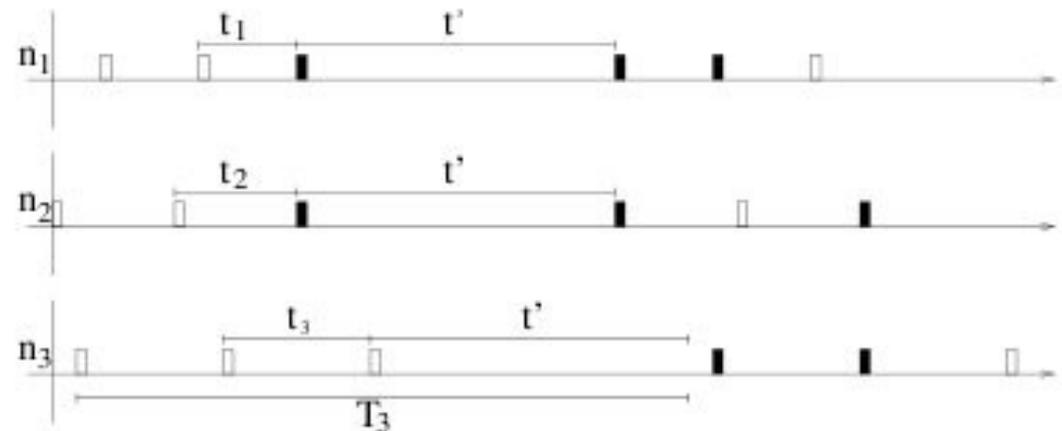


Fig. 2. f-MAC operation

Les fréquences sont différentes pour tous les noeuds voisins => un noeud est sûr de recevoir au moins un framelet, même si tous ses voisins émettent.

MAC basé contention

- F-MAC
 - Clusters possibles: chaque cluster a une fréquence d'émission différente des clusters voisins
 - Problèmes:
 - Perte de bande passante (même info dans les framelets)
 - Le pire délai augmente exponentiellement avec le nombre de noeuds dans le même domaine de collision
 - Peu efficace à large échelle et dans les réseaux denses

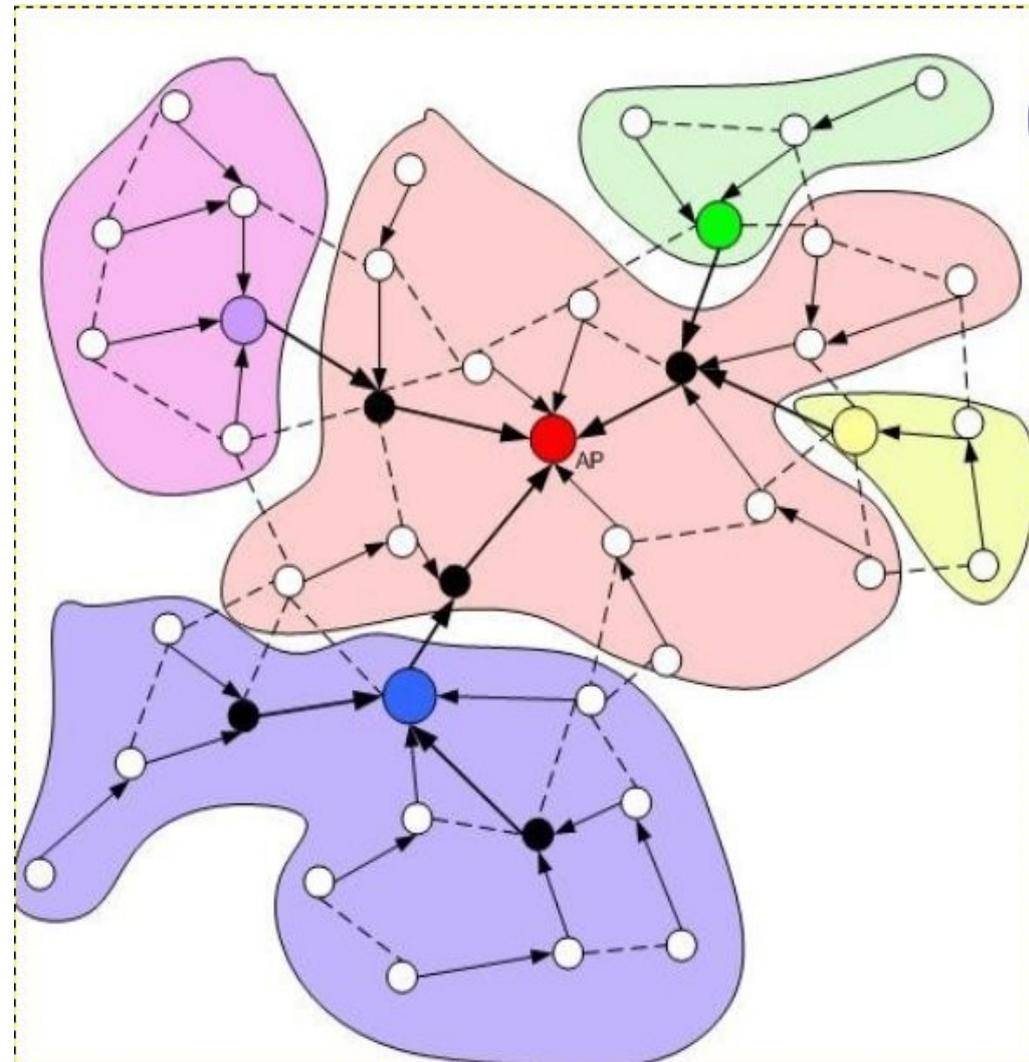
Routage temps-réel

- Idée de base:
 - Si MAC borné, en théorie, il « suffit » de connaître le nombre maximum de sauts.
- Si autorité centrale + MAC borné (par exple TDMA):
 - Possibilité d'inclure les routes multi-sauts dans l'ordonnancement (routage statique)
 - => temps-réel dur
 - Difficile pour l'autorité centrale de connaître la topologie complète (passage à l'échelle...) et pb de dynamicité...
 - PEDAMACS, TSMP, PR-MAC, ...

Routage temps-réel

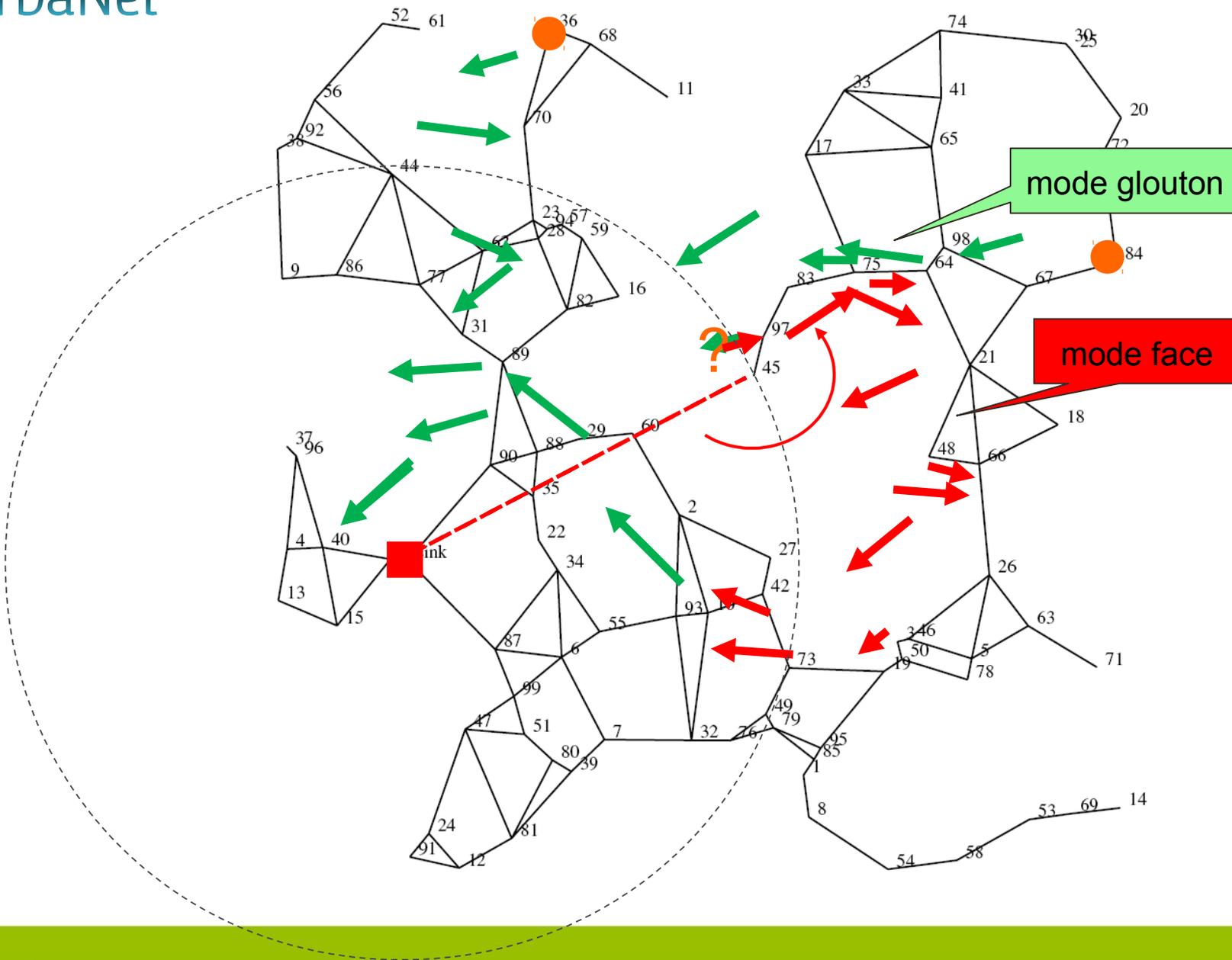
- Connaître le nombre maximal de sauts?
 - Inondation => Connaître le diamètre du réseau
 - Non efficace en énergie
 - Problème de collisions
 - Clusters
 - Routage géographique ou par gradients

Clusters + backbone



- Principe utilisé dans I-EDF
- Créer la structure et la maintenir est coûteux (et peut être complexe)
- Les apparitions/disparitions de noeuds peuvent perturber l'ensemble du réseau
- Tables de routage doivent être maintenues (pb pour le passage à l'échelle)

Routage géographique (GFG)

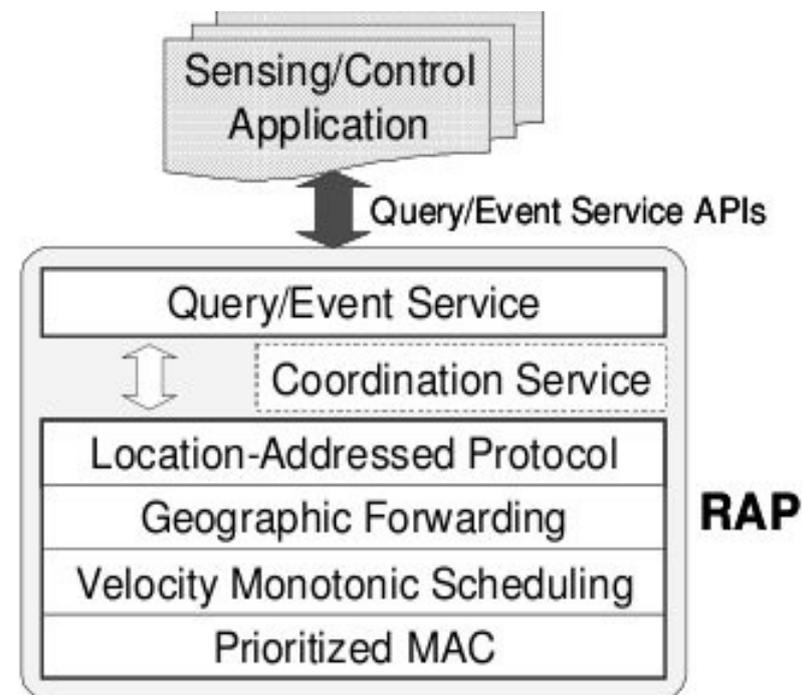


Routage géographique

- Avantages
 - Pas d'état à mémoriser (stateless)
 - => grand nombre de noeuds possibles
 - Pas de maintien de structure
 - Uniquement besoin d'une table de voisinage à un saut (principe de localité)
 - Si grande densité de noeuds (pas de « void »), le nombre de sauts est approximativement proportionnel à la distance à parcourir

Routage géographique temps-réel

- Basé sur la notion de « vitesse »
- RAP
 - Velocity Monotonic Scheduling: ordonnancement basé sur la distance et le deadline
 - Priorité des messages basée sur la vitesse voulue
 - Static Velocity Monotonic



$V = \text{distance}(\text{source}, \text{destination}) / \text{délai de bout en bout}$

Routage géographique temps-réel

- RAP

- nécessite un GPS ou méthode de localisation
- Nécessite un MAC priorisé
- Version dynamique: Dynamic Velocity Monotonic

$V = \text{distance}(\text{noeud relais}, \text{destination}) / (\text{délai de bout en bout} - \text{temps déjà écoulé})$

- V est recalculée à chaque saut
- Nécessite une synchronisation d'horloge ou la présence d'un champ « temps écoulé » dans chaque paquet, mis à jour par chaque noeud (temps passé dans le noeud + transmission + propagation)

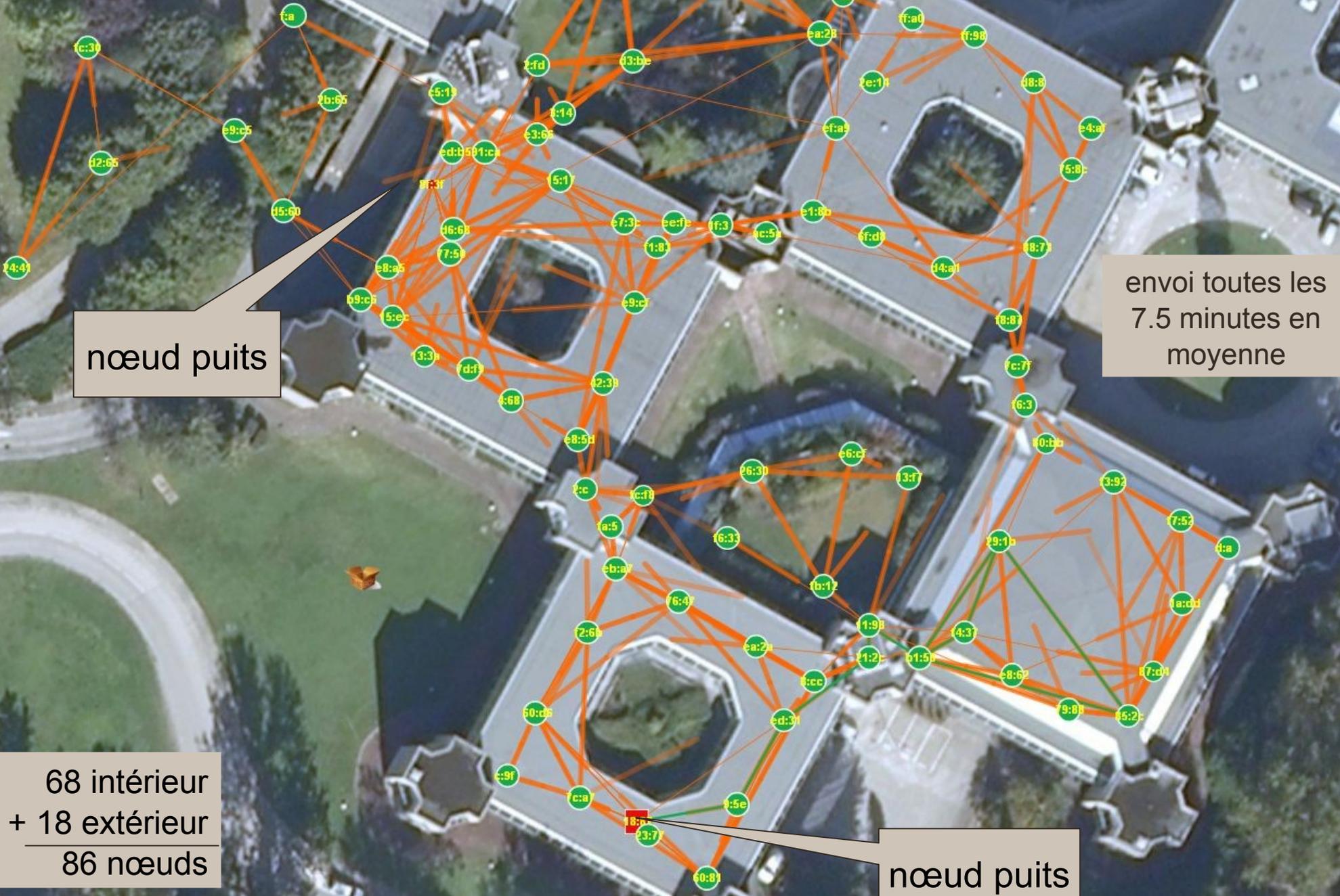
Routage géographique temps-réel

- SPEED: protocole de routage pouvant travailler avec n'importe quel MAC best-effort
 - chaque noeud envoie périodiquement un paquet à ses voisins pour échanger des informations de localisation
 - Estimation du délai entre les noeuds (paquet acquitté)
 - $Vitesse_{ij} = \text{distance}_{ij} / \text{délai entre } i \text{ et } j$
 - Si un noeud veut envoyer un paquet
 - si pas de noeud plus près, le paquet est jeté
 - parmi les noeuds plus proches:
 - ceux qui peuvent aller plus vite que la vélocité requise

Routage géographique temps-réel

- Il existe de nombreuses extensions de RAP et SPEED
 - FT-SPEED: contournement des « voids »
 - MMSPEED: différenciation de services
 - PPAR: ajuste les puissances de transmission
 - ...
- Protocoles « soft real-time », car aucune garantie, et les paquets sont jetés s'ils ne peuvent pas respecter les deadlines.

10m



envoi toutes les
7.5 minutes en
moyenne

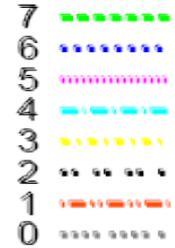
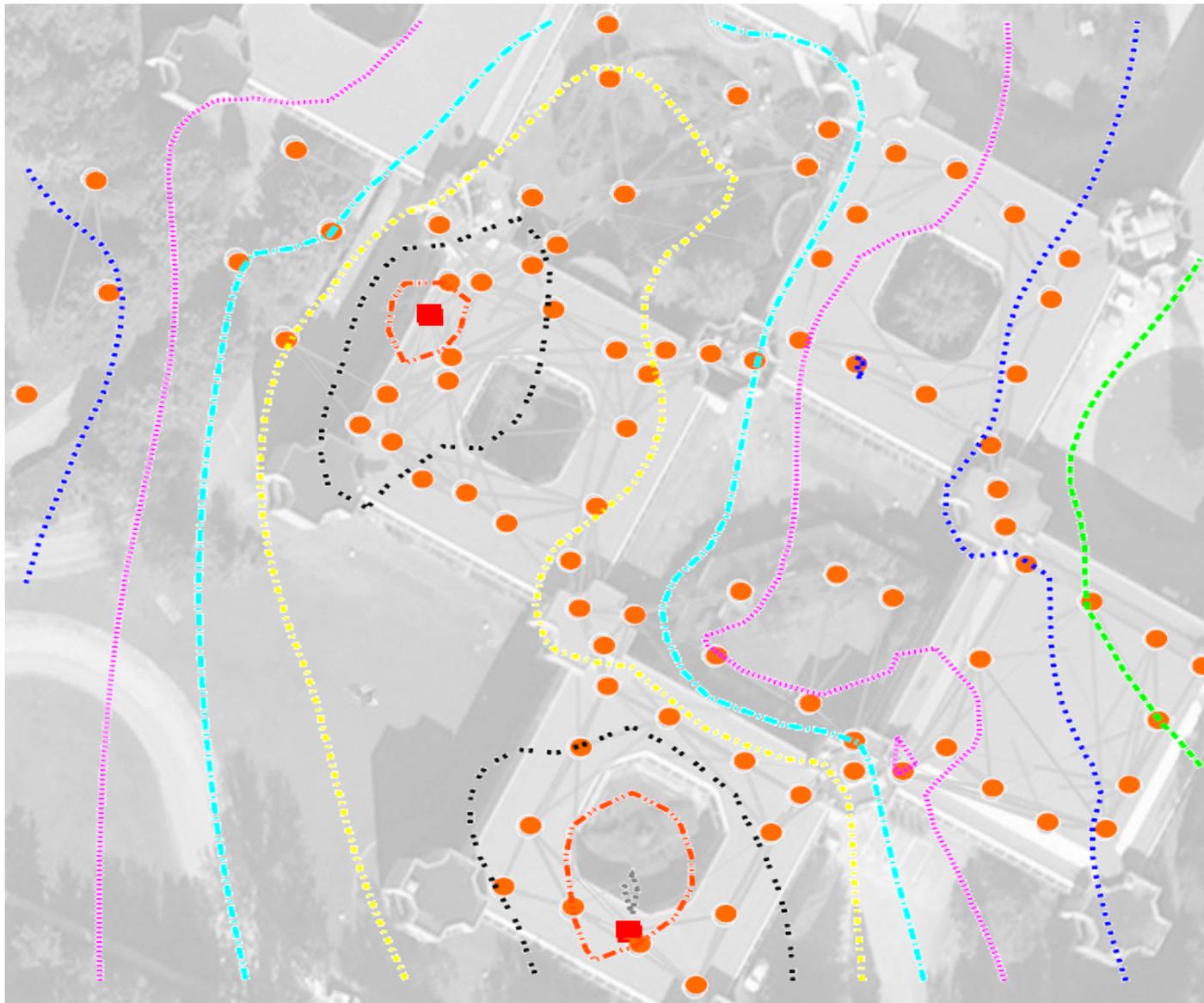
nœud puits

68 intérieur
+ 18 extérieur

86 nœuds

nœud puits

Gradients



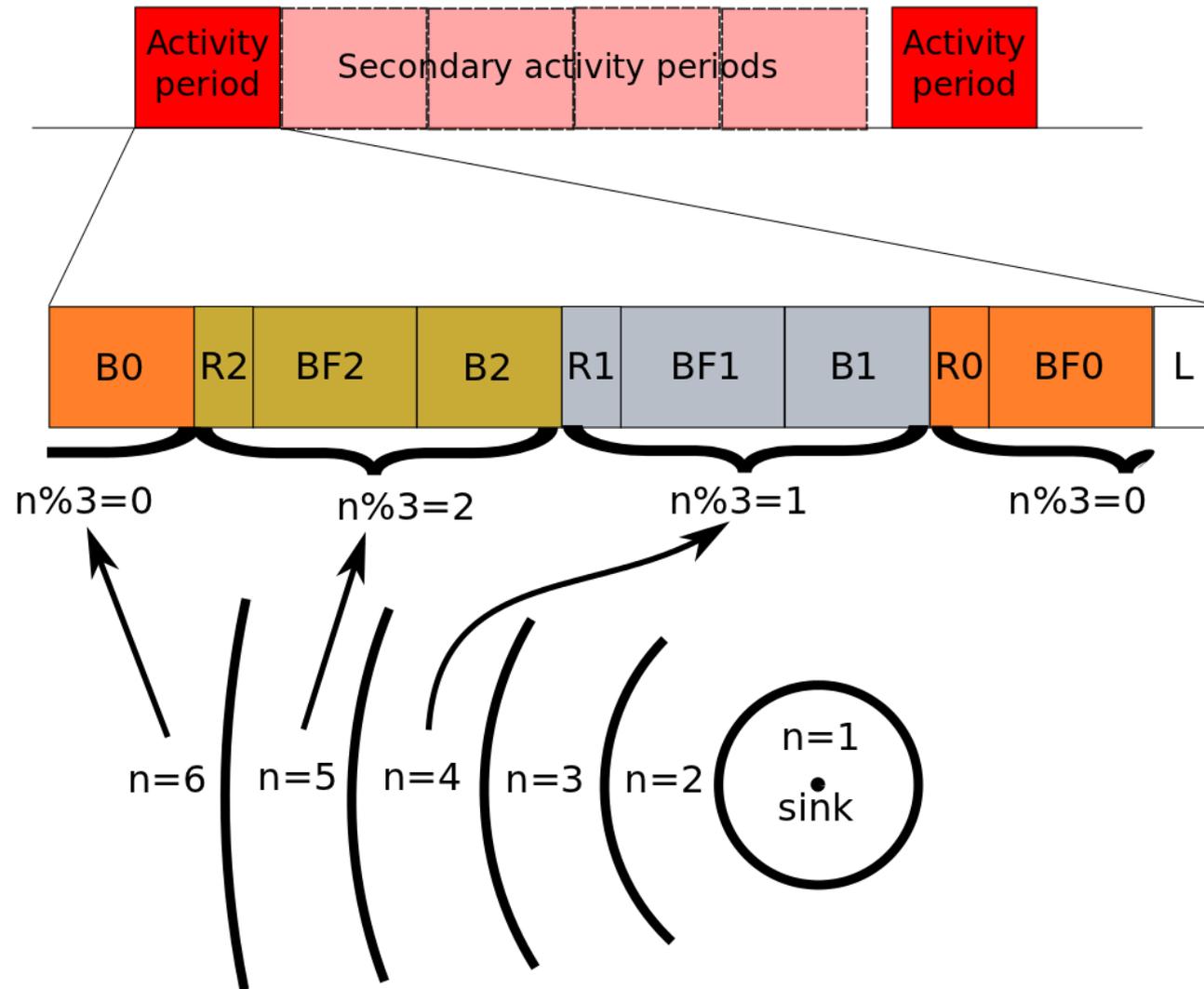
Gradients

- Routage Ergen
 - Couplé avec PEDAMACS
 - Choix des routes statiques par le puits en fonction des gradients
 - Durée de vie maximisée en ajustant le nombre de paquets traversant chaque noeud.
- Gradient distribué
 - Pb avec les changements de topologie

RTXP: Real-Time X-layer Protocol

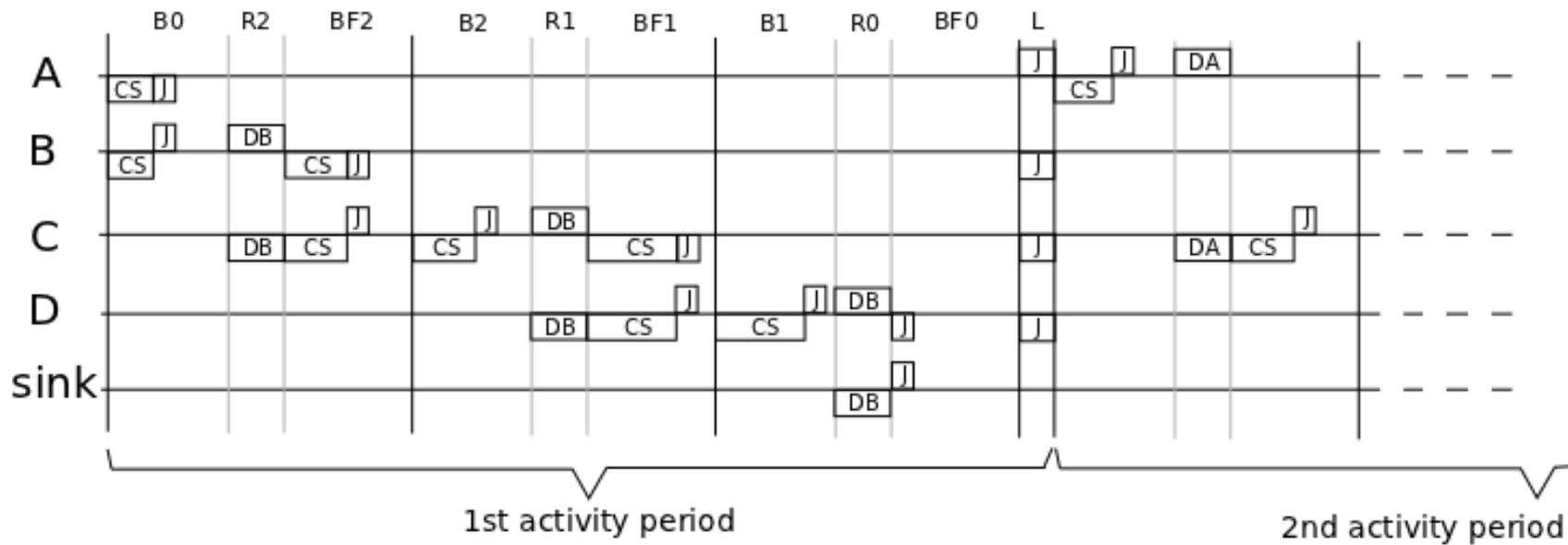
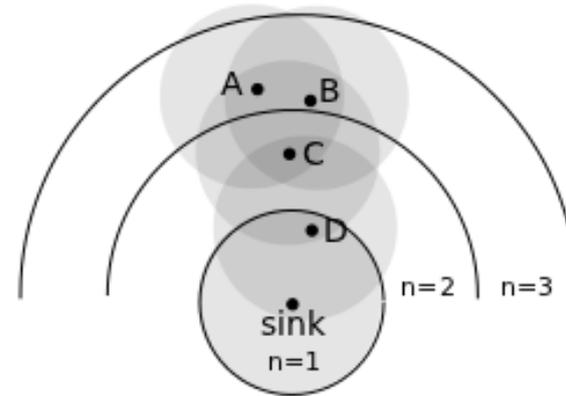
- Noeuds synchronisés
- Coordonnée unique dans un 2-voisinage => accès au médium déterministe
- Basé sur du gradient
- Routage opportuniste: le forwarder est choisi parmi les noeuds qui ont reçu le message
- Protocole localisé

- B : Backoff phase
- BF : Backoff Forward phase
- R : Receive phase for ring n (corresponding to sending phase for ring $n+1$)
- L : Slot used to notify the loss of a contention
- n : Hop-count to reach the sink

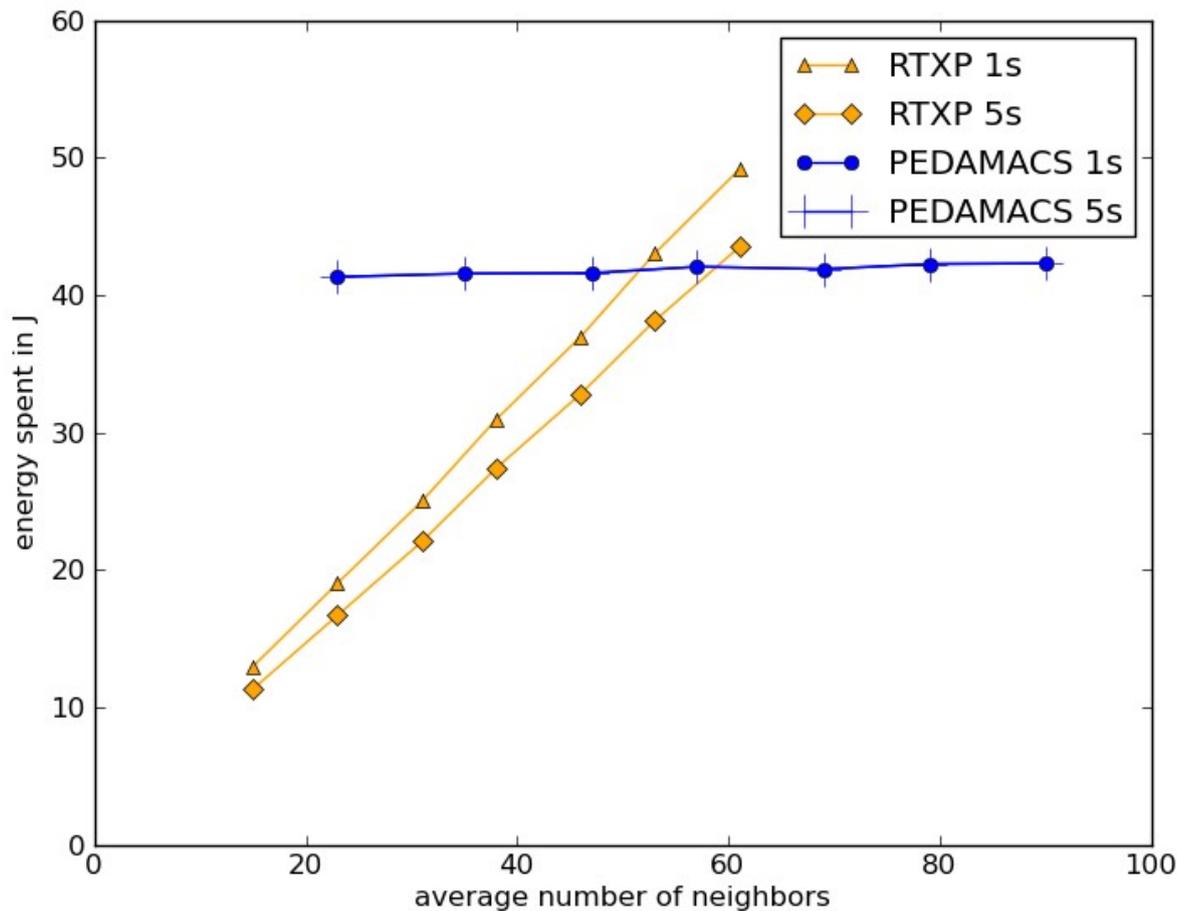


Exemple

- emission
- reception
- jamming code
- CS carrier sense during contention period
- DB data from node B
- DA data from node A

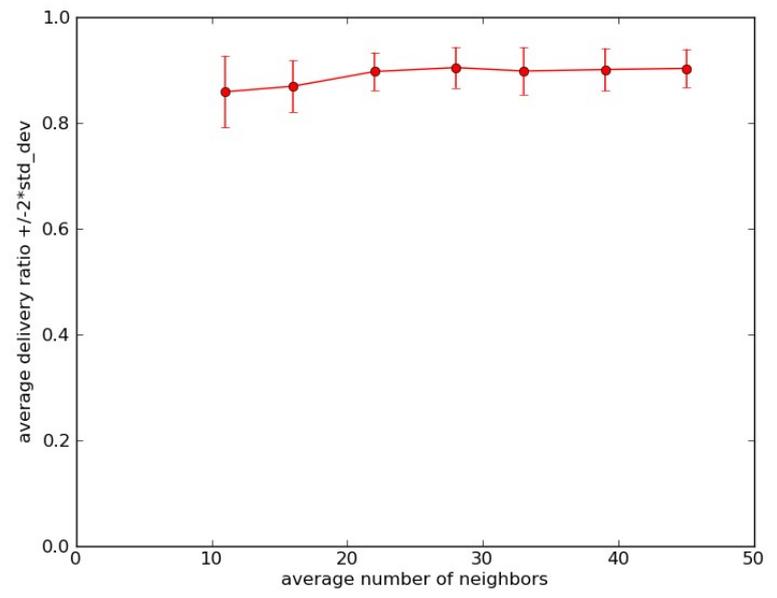
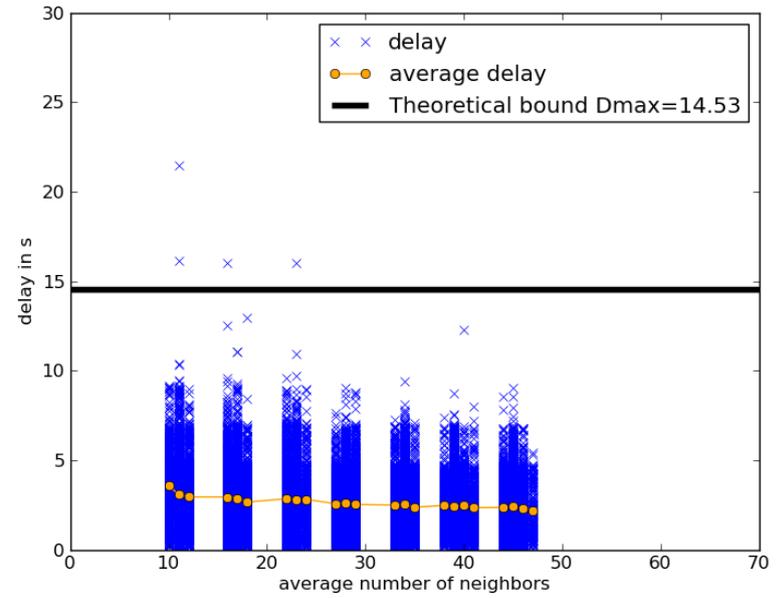


Comparaison énergétique

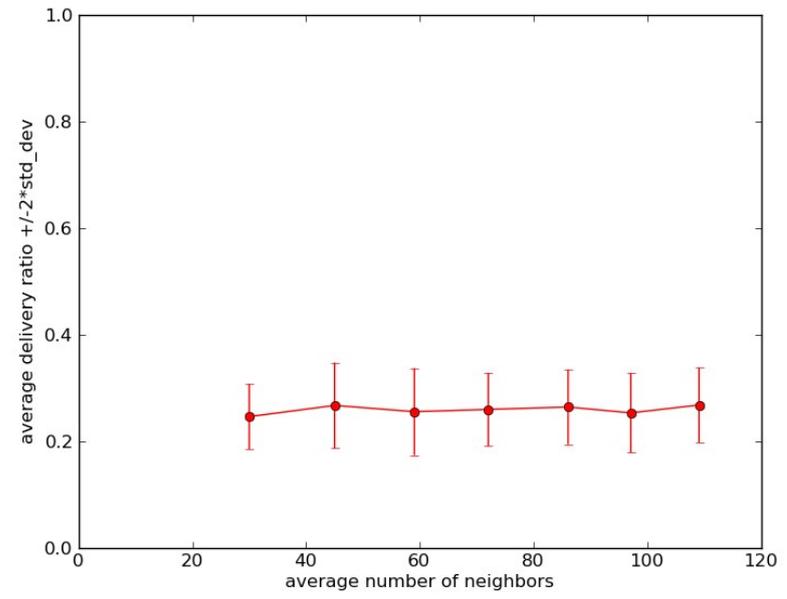
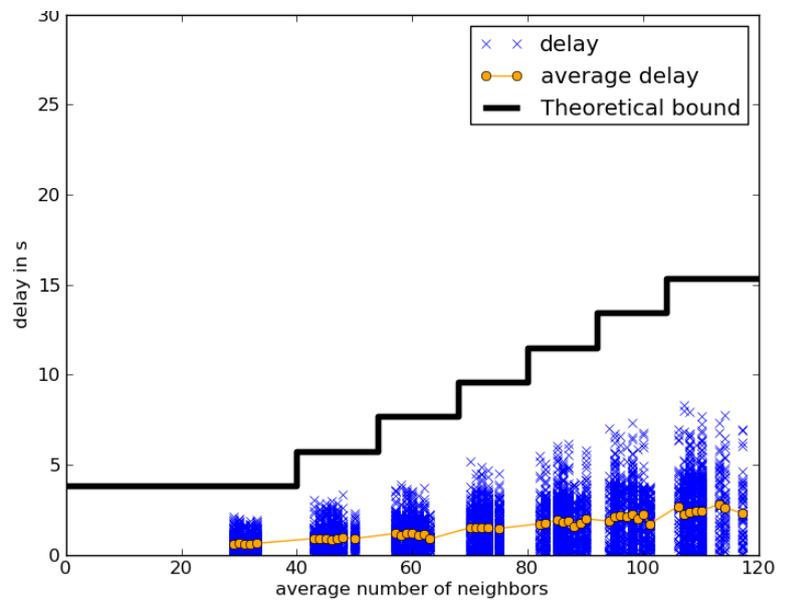


RTXP vs PEDAMACS (Log-normal)

RTXP

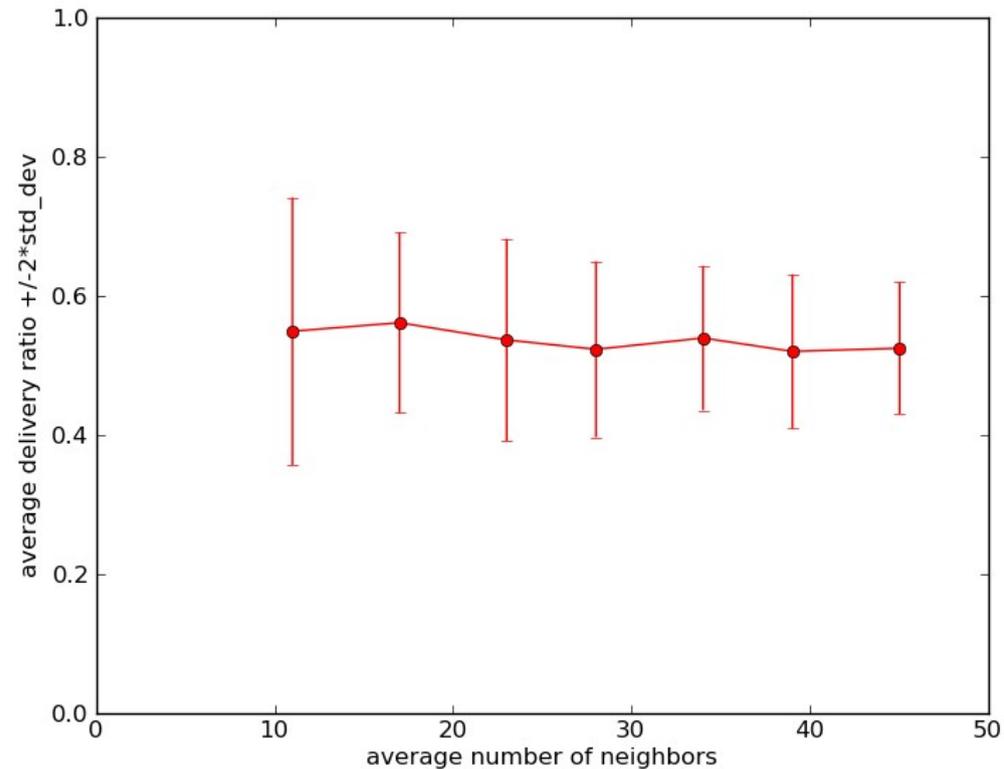
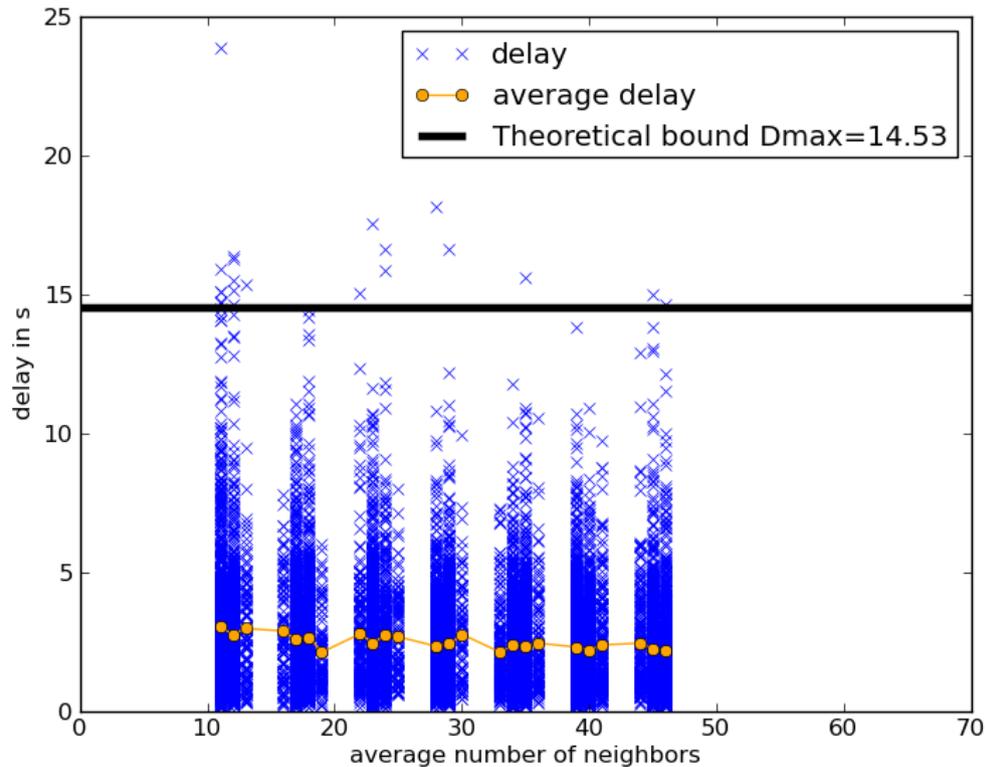


PEDAMACS

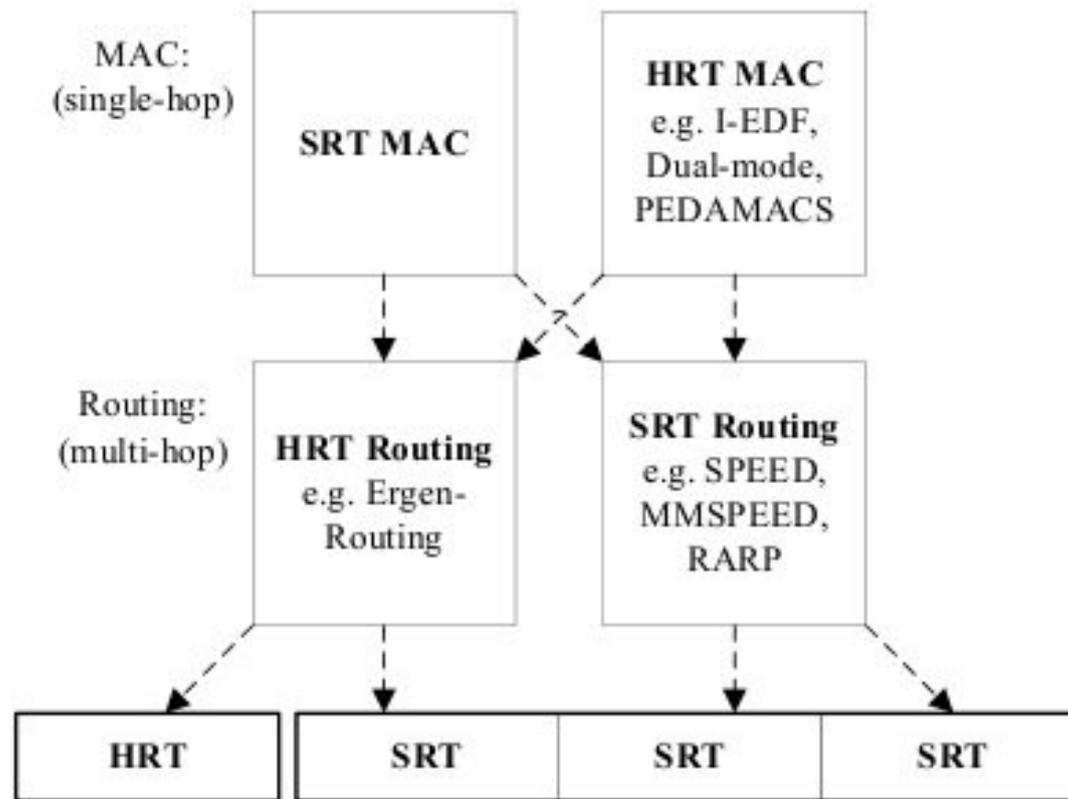


Enfin, est-il utile d'avoir un protocole temps-réel?

X-MAC + gradient



En résumé...



Y-Q Song et al, FeT'07

- Cependant, avec la non fiabilité du canal radio, on ne peut pas être HRT au sens classique.
- Il faut rajouter des notions de fiabilité

Remarques finales

- Domaine relativement jeune (1^{ères} publiés en 2002)
- Hypothèses contraignantes et pas toujours réalistes
- En particulier, lien radio (interférences, dynamicité)
- Actuellement, des études incluent la qualité du lien radio
- Notions temps-réel et fiabilité à coupler!
- Difficultés des analyses formelles dues
 - Au lien radio
 - À la taille des réseaux

Remarques finales

- MAC
 - Basé contention: trafic faible, peu de collision
 - Basé ordonnancement: fort trafic, évite les collisions
 - Il faut un ordonnancement distribué (chaque noeud décide en fonction d'informations locales)
 - Couplé avec des techniques d'agrégation de données
 - Évitent les collisions
 - Également temps-réel
 - Attention: redondance => fiabilité!!

Remarques finales

- Routage
 - Réseaux autonomes
 - Auto-configuration
 - Résilience
 - Gradients
 - Passage à l'échelle
 - Efficace en énergie
 - Nombre de sauts «connu»
 - Nécessité d'adapter aux changements topologiques

Merci de votre attention

Références

- Caccamo, M., Zhang, L.Y., Sha, L., & Buttazzo, G. (2002). An Implicit Prioritized Access Protocol for Wireless Sensor Networks. 23rd IEEE Real-Time Systems Symposium(RTSS'2002) (pp. 39-48). Austin.
- Chen, J., Zhu, P., & Qi, Z.(2007). PR-MAC: Path-Oriented Real-Time MAC Protocol for Wireless Sensor Network. The 2007 International Conference on Embedded Software and System(ICESS'2007)(pp.530-539).
- Ergen, M., Lee,D., Sengupta,R., & Varaiya,P. (2004). WTRP - Wireless token ring protocol. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 53 (6), 1863-1881.
- Ergen, S.C., & Varaiya, P. (2006). PEDAMACS: Power Efficient and Delay Aware Medium Access Protocol for Sensor Networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 7(5), 920-930.
- Felemban, E., Lee, C.G., & Ekici, E. (2006). MMSPEED: Multipath Multi-SPEED Protocol for QoS Guarantee of Reliability and Timeliness in Wireless Sensor Networks. IEEE Transactions on mobile computing, 5(6), 738-754.

Références

- Chipara, O., He, Z., Xing, G., Chen, Q., Wang, X., Lu, C., Stankovic, J. and Abdelzaher, T (2006). Real-time Power-Aware Routing in Sensor Networks. 14th International Workshop on Quality of Service (IWQoS), IEEE, 83-92.
- Han, P., Zhou, X., Li, Y., Chen, X., & Gao, C.S. (2007). An Adaptive Real-Time Routing Scheme for Wireless Sensor Networks. 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops(AINAW'2007).
- He, T., Stankovic, J.A., Lu, C., & Abdelzaher, T.F.(2003). SPEED: a stateless protocol for real-time communication in sensor networks. International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'2003). Rhode Island.
- He, T., Vicaire, P., Yan, T., Luo, L., Gu, L., Zhou, G., Stoleru, R., Cao, Q., Stankovic, J.A., & Abdelzaher, T.(2007). Achieving Real-Time Target Tracking Using Wireless Sensor Networks. ACM Transaction on Embedded Computing System.

Références

- Lu, C., Blum, B.M., Abdelzaher, T.F., Stankovic, J.A., & He, T. (2002). Rap: A real-time communication architecture for large-scale wireless sensor networks. Real-Time Technology and Application Symposium (RTAS'2002). San Jose.
- Pister, K. (2008). Technical Overview of Time Synchronized Mesh Protocol (TSMP)
[available online <http://www.dustnetworks.com/>]. Technical white paper.
- Roedig, U., Barroso, A., & Sreenan, C.J. (2006). f-MAC: A Deterministic Media Access Control Protocol without Time Synchronization. 3rd European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN'2006) (pp. 276-291).
- Watteyne, T., Augé-Blum, I., & Ubeda, S. (2006). Dual-Mode Real-Time MAC Protocol for Wireless Sensor Networks: A Validation/Simulation Approach. Proceedings of the First International Conference on Integrated Internet Ad hoc and Sensor Networks (InterSense'2006) (pp. 2-8). Nice.

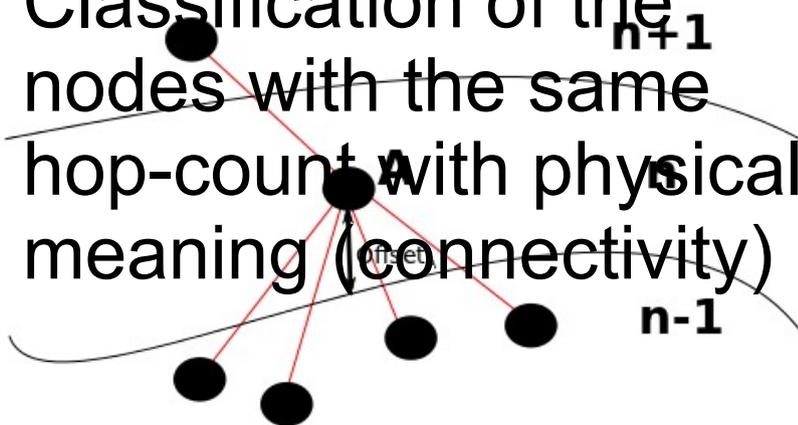
Références

- Ye, W., Heidemann, J., & Estrin, D. (2004). Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3(12), 493-506.
- Yuan, L.F., Cheng, W.Q., & Du, X. (2007). An energy-efficient real-time routing protocol for sensor networks. *Computer Communications*, 30(10)2274-2283, .
- Zhao, L., Kan, B.Q., Xu, Y.J., & Li, X.W. (2007). FT-SPEED: A Fault-Tolerant, Real-Time Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom'2007)*(pp. 2531-2534). ShangHai.
- Zhou, Y.F., Ngai, Edith C.-H., Lyu, Michael R., & Liu, J.(2007). POWER-SPEED: A Power-Controlled Real-Time Data Transport Protocol for Wireless Sensor-Actuator Networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC'2007)*(pp. 3739-3743), HongKong.

Proposed coordinate

- Differentiation of nodes (in a 2-hop neighborhood)
- Information on hop-count

- Classification of the nodes with the same hop-count with physical meaning (connectivity)

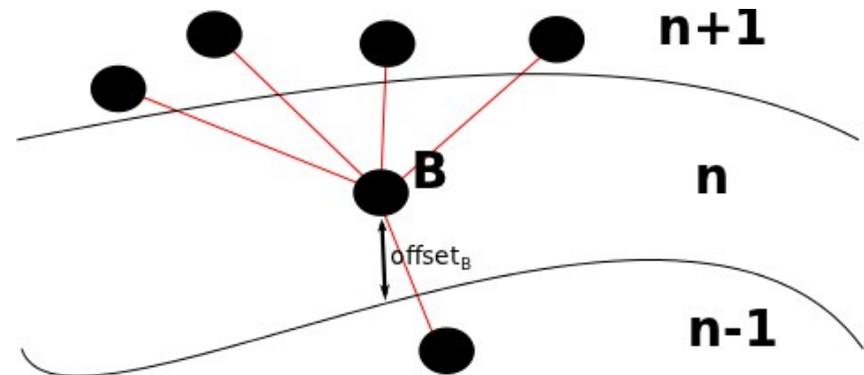


connectivity



1-D coordinate
Different offsets for nodes with the same hop-count

$$\text{Coord} = (n-1) * R + \text{offset}$$

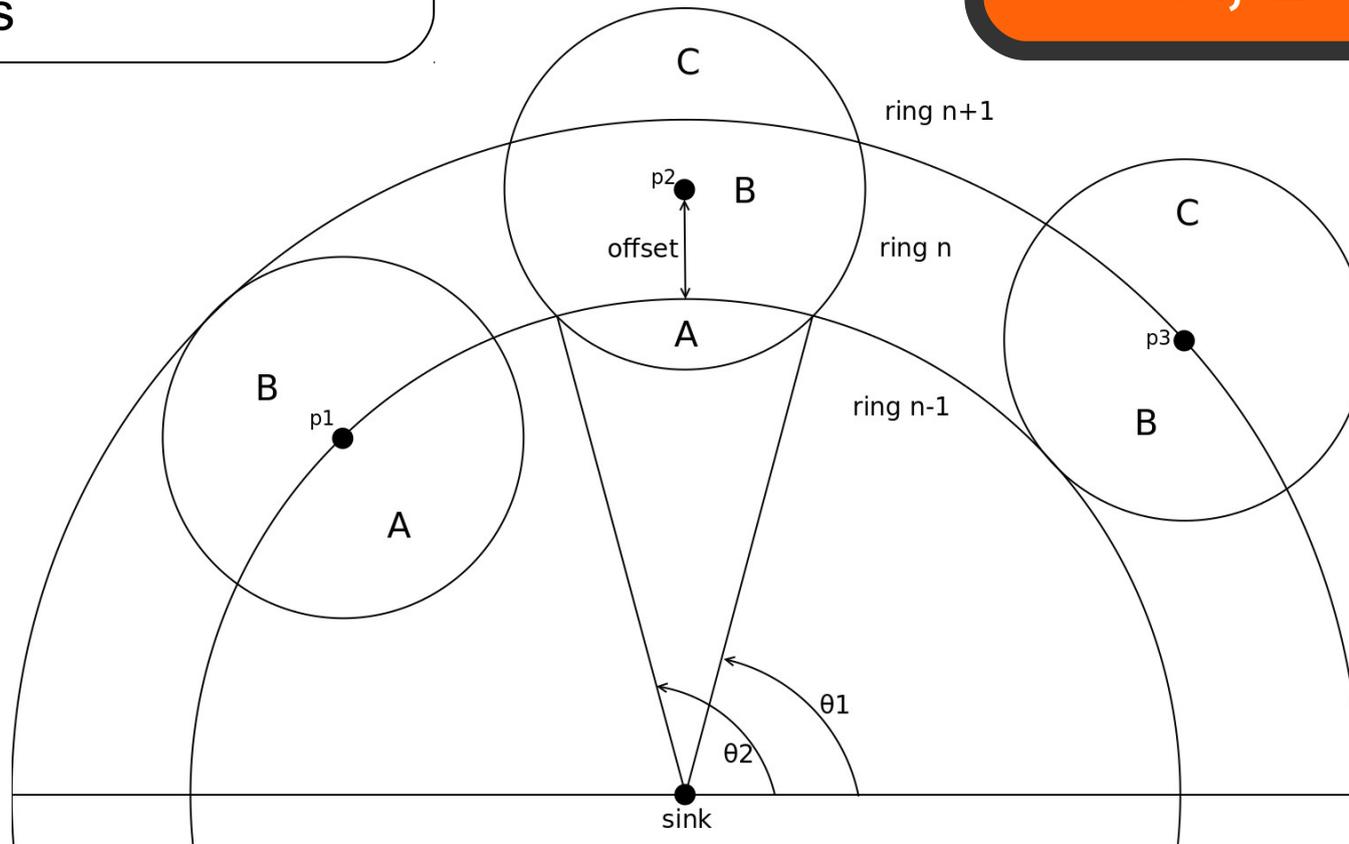


offset

Theoretical model

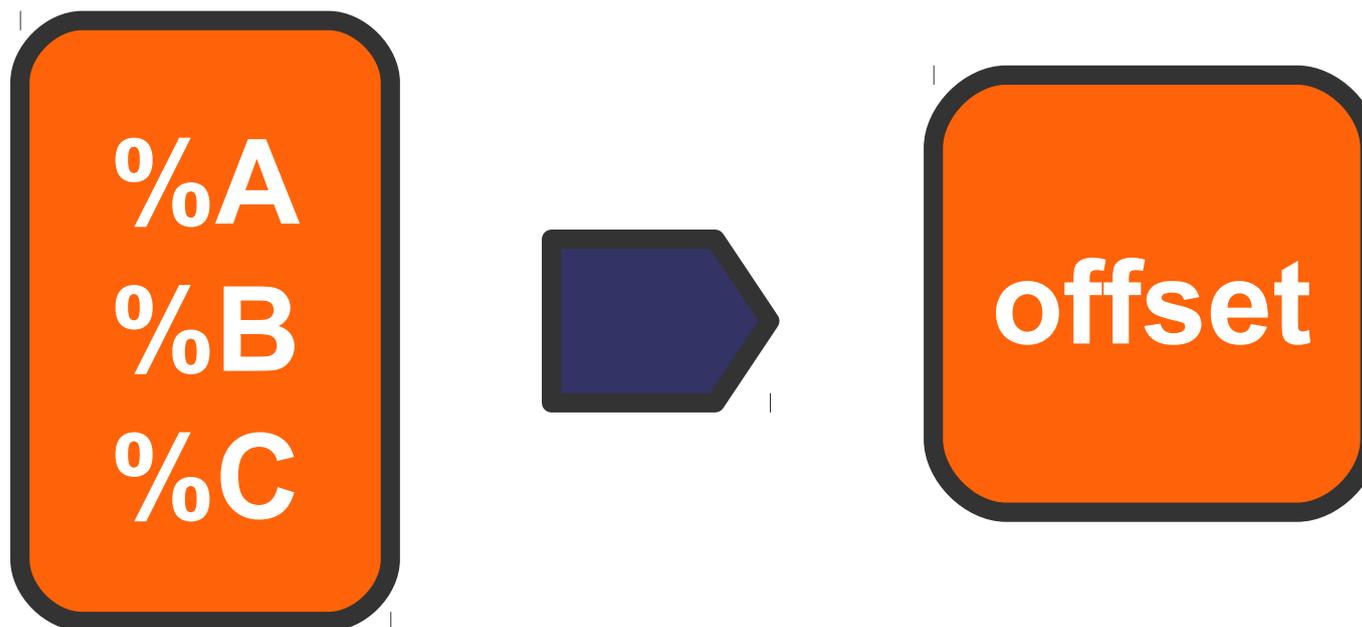
Hypothesis:
UDG
Continuous repartition of the nodes

The offset is linked to surfaces A, B and C

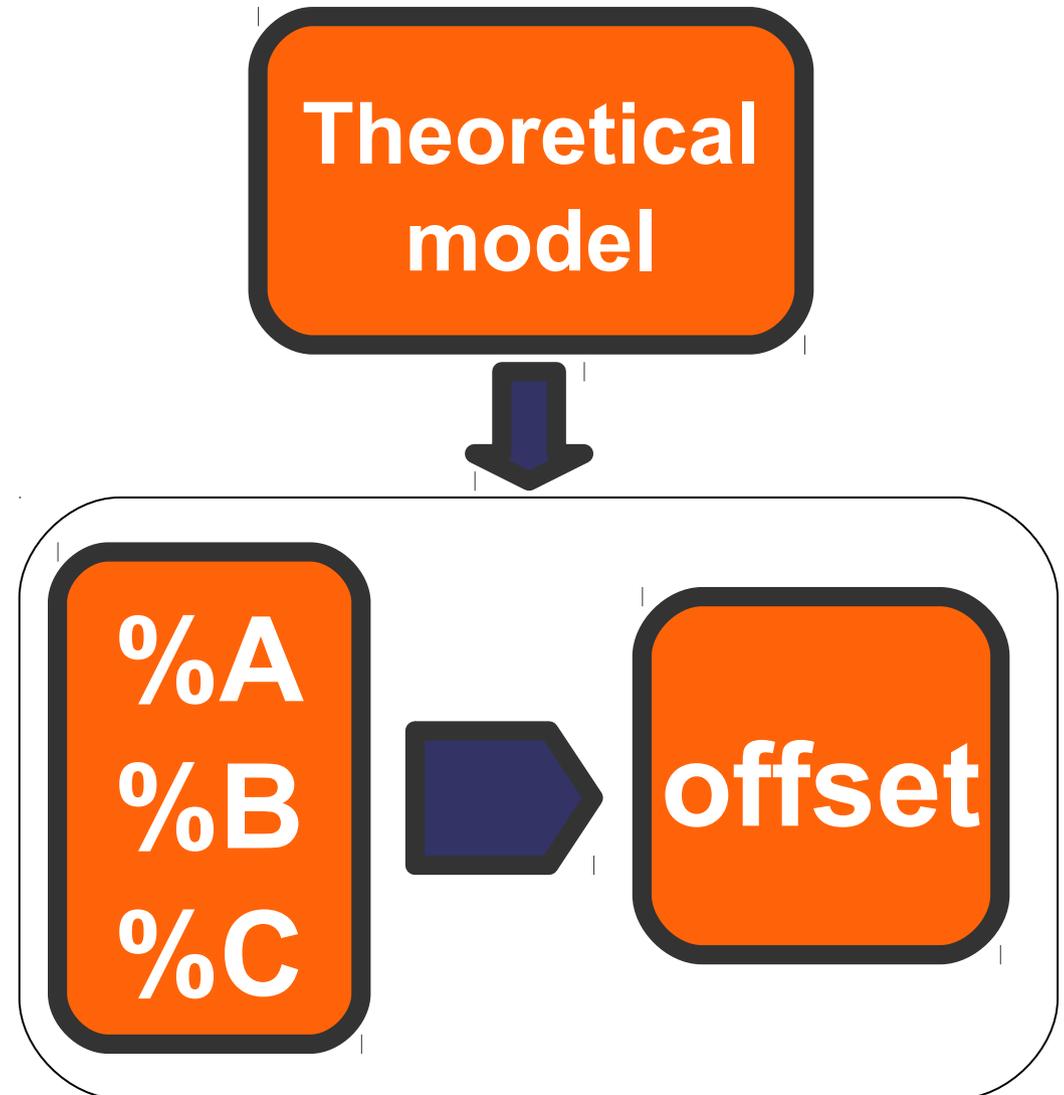


Relation between surfaces and offset

- We compute the three surfaces
- We take the percentage of each surface ($\%A = A/St$)
- We obtain proportions of surfaces linked with the offset



Relation between connectivity and surfaces



Relation between connectivity and surfaces

