

# Contributions à l'accès au medium asynchrone dans un Internet des objets dynamique

Soutenance en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches

Présentée par **Antoine Gallais** le 17 novembre 2017, devant le jury suivant :

## Rapporteurs :

André-Luc Beylot (PU)  
Silvia Giordano (Professor)  
Fabrice Valois (PU)

IRIT - ENSEEIHT, Toulouse  
SUPSI - University of Applied Science, Suisse  
CITI - INSA Lyon

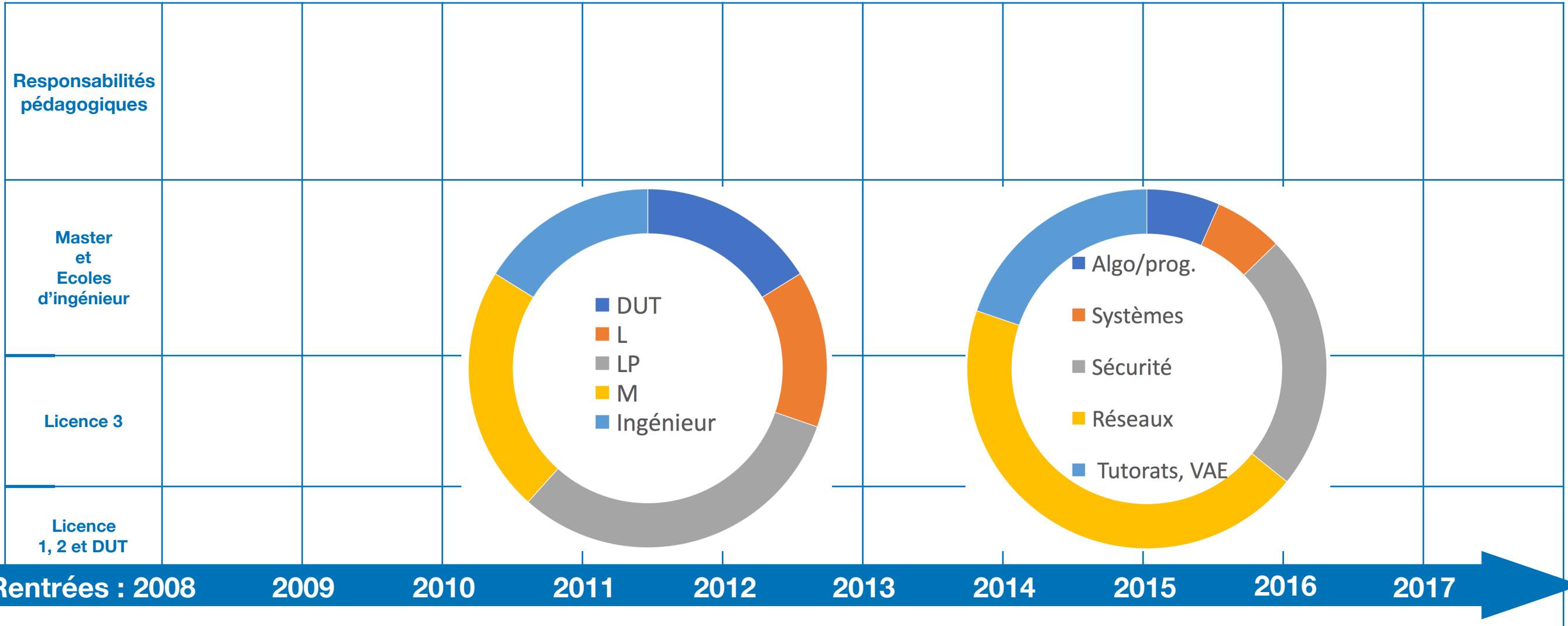
## Examineurs :

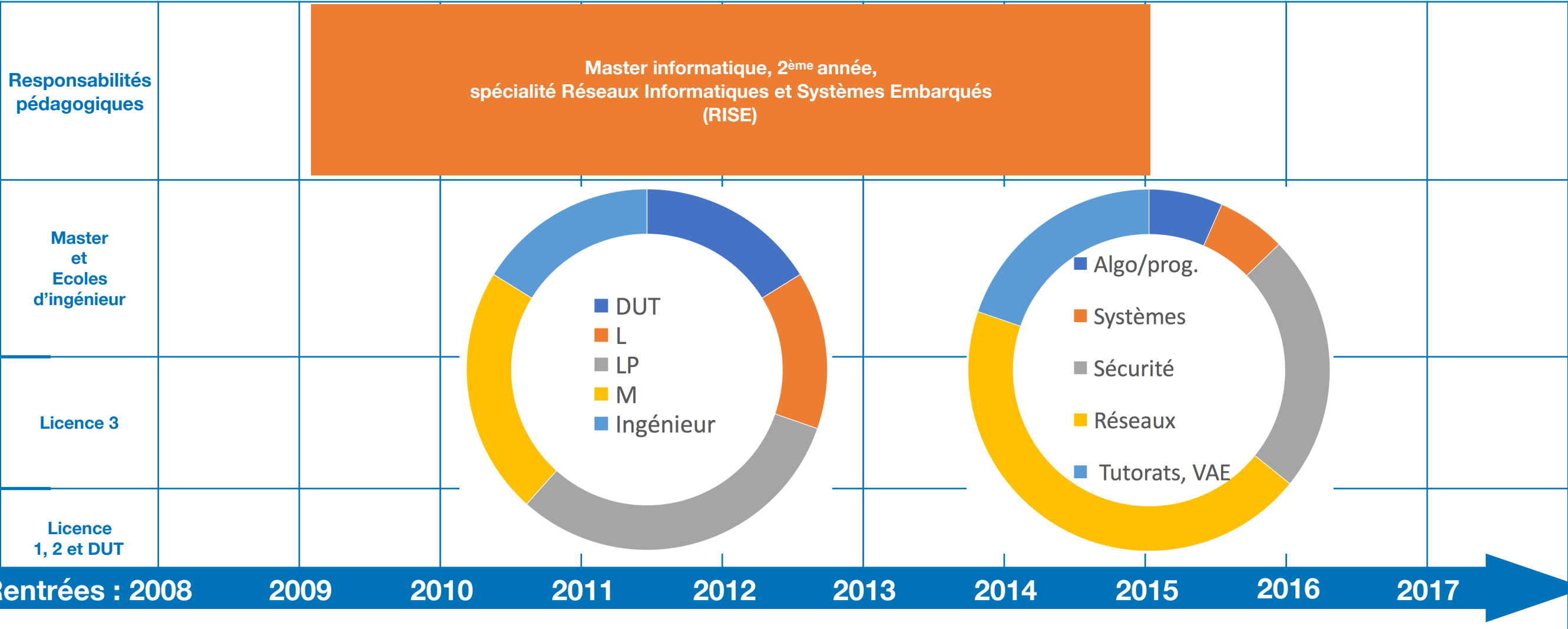
Marcelo Dias de Amorim (DR CNRS)  
Nathalie Mitton (DR Inria)  
Thomas Noël (PU, garant)

LIP6 - UPMC, Paris  
Inria Lille - Nord Europe  
ICube - Université de Strasbourg



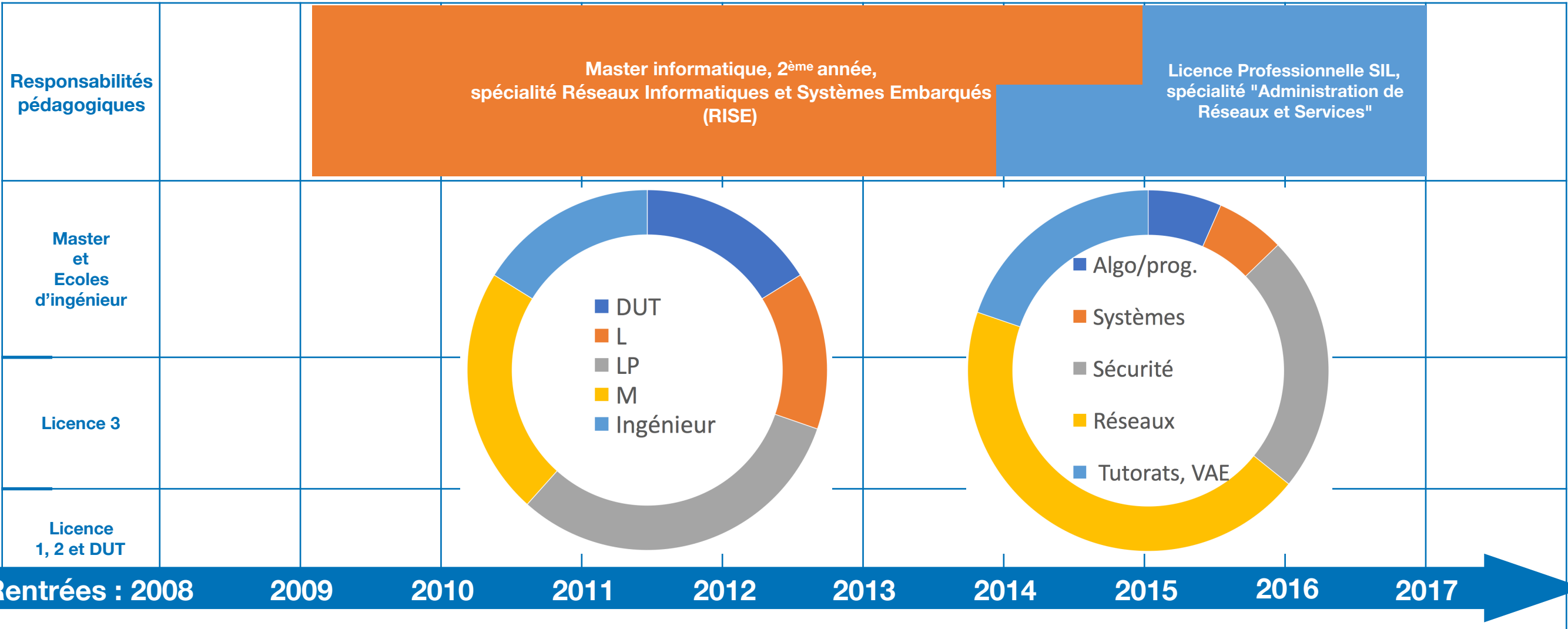
# Enseignant-chercheur



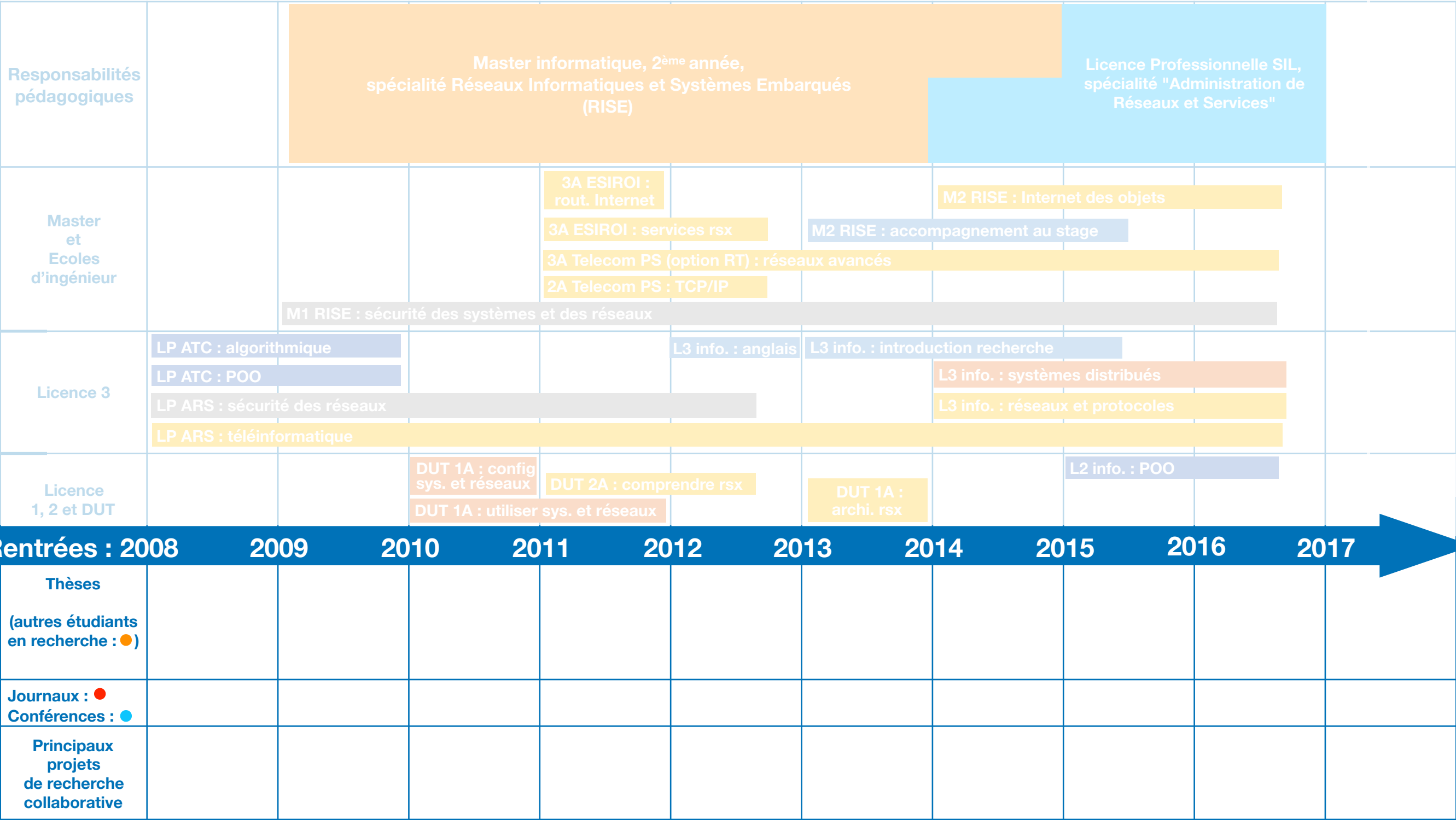




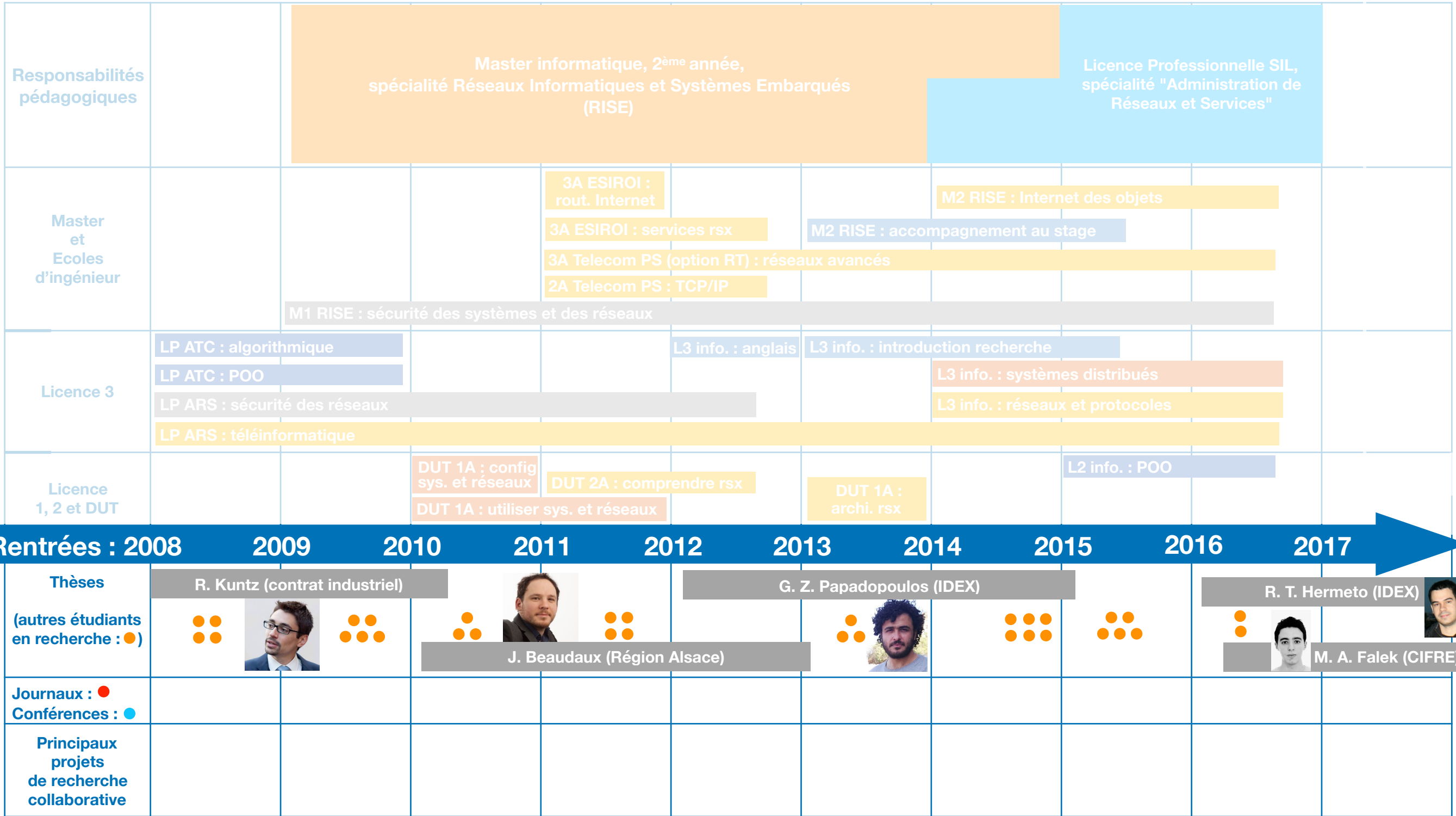
# Enseignant-chercheur



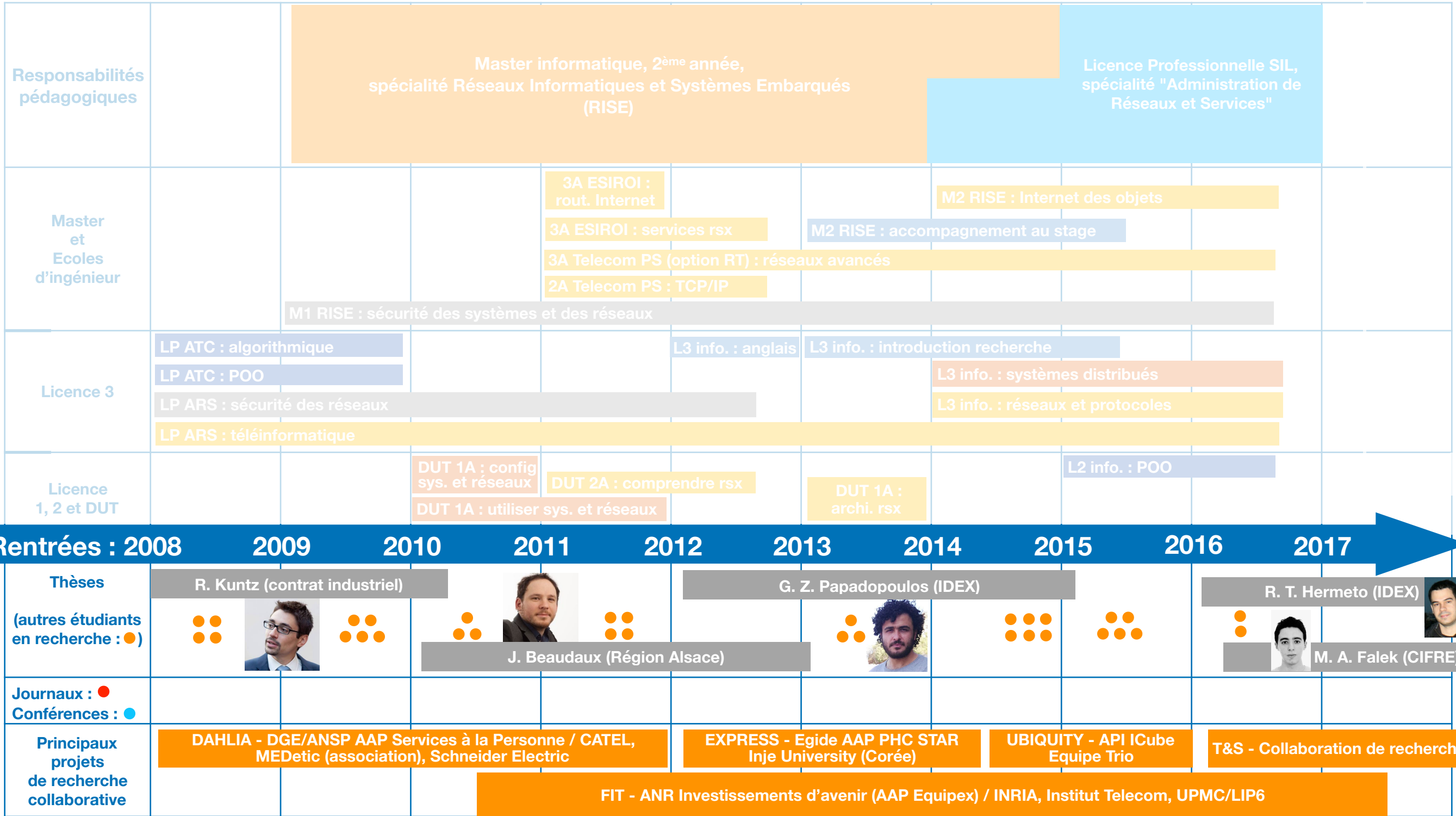
# Enseignant-chercheur



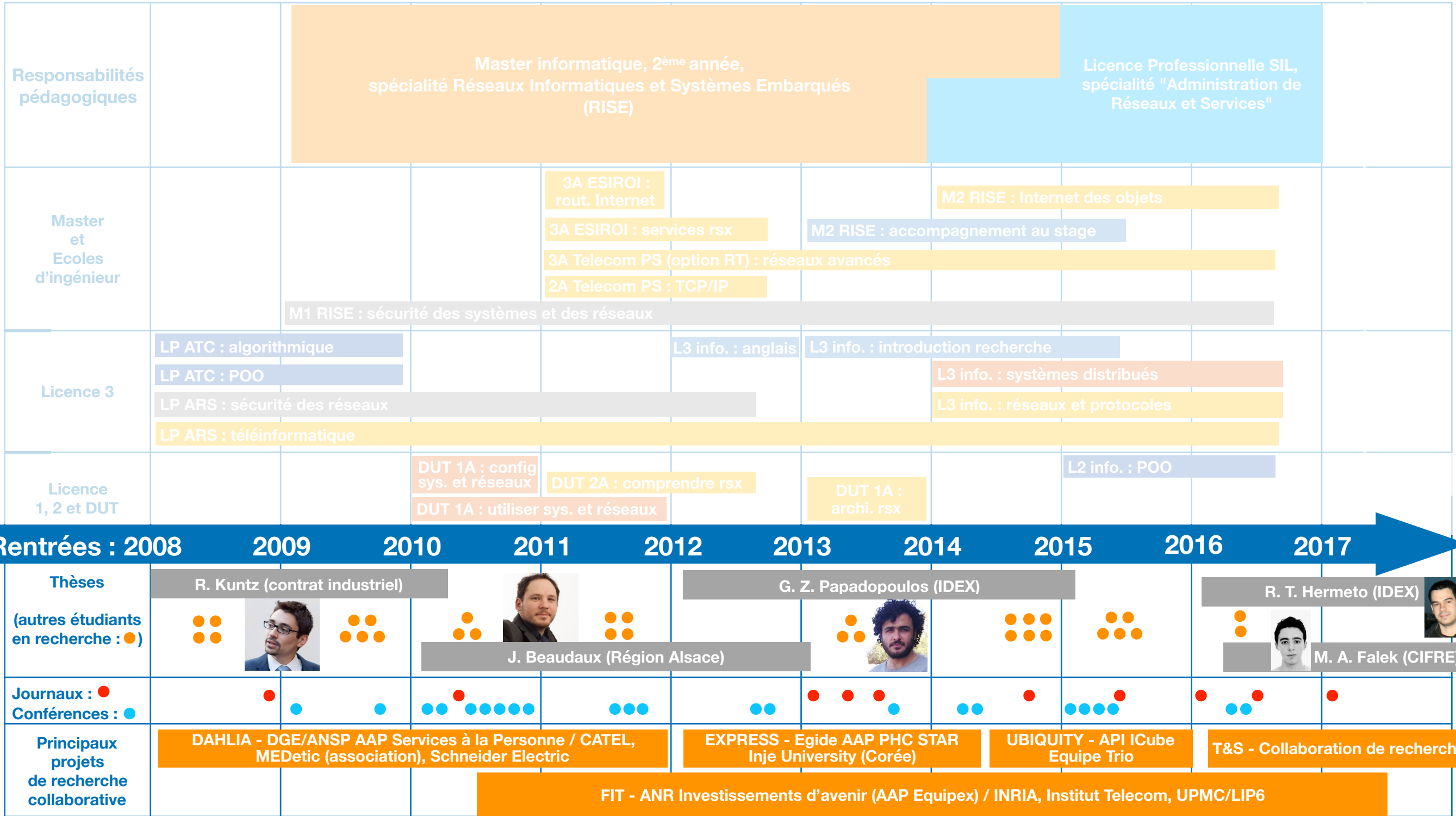
# Enseignant-chercheur



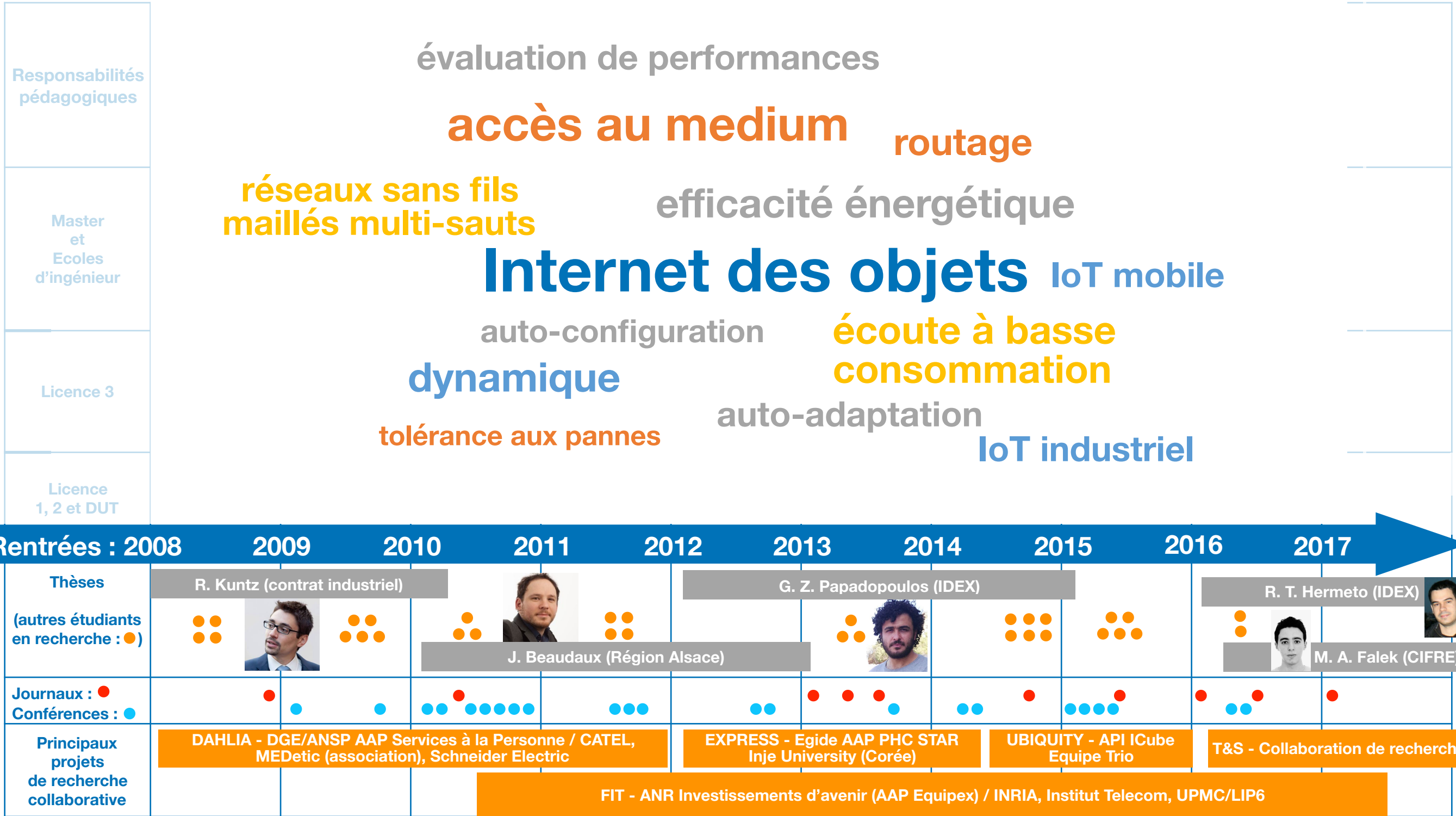
# Enseignant-chercheur



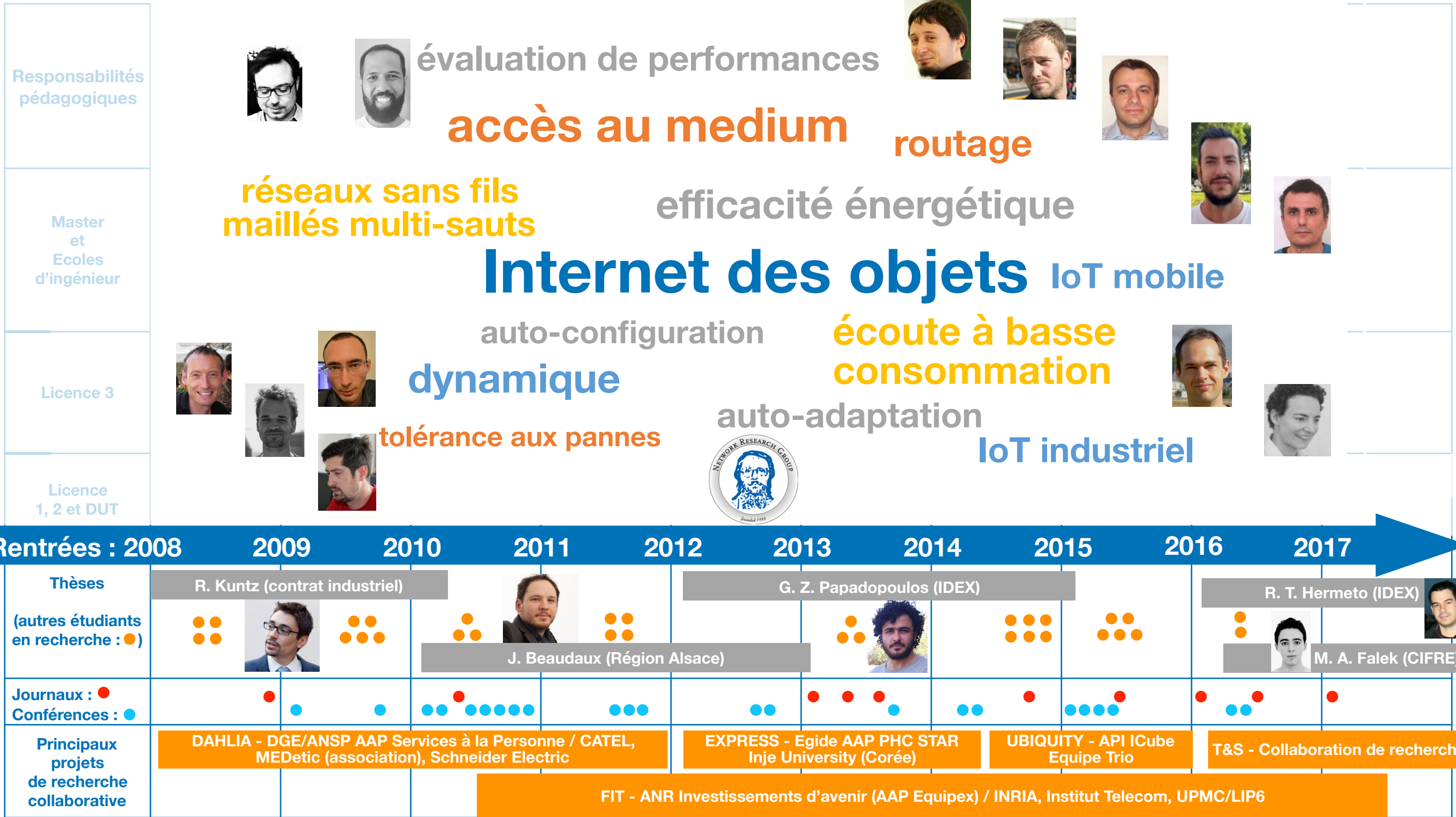
# Enseignant-chercheur



# Enseignant-chercheur



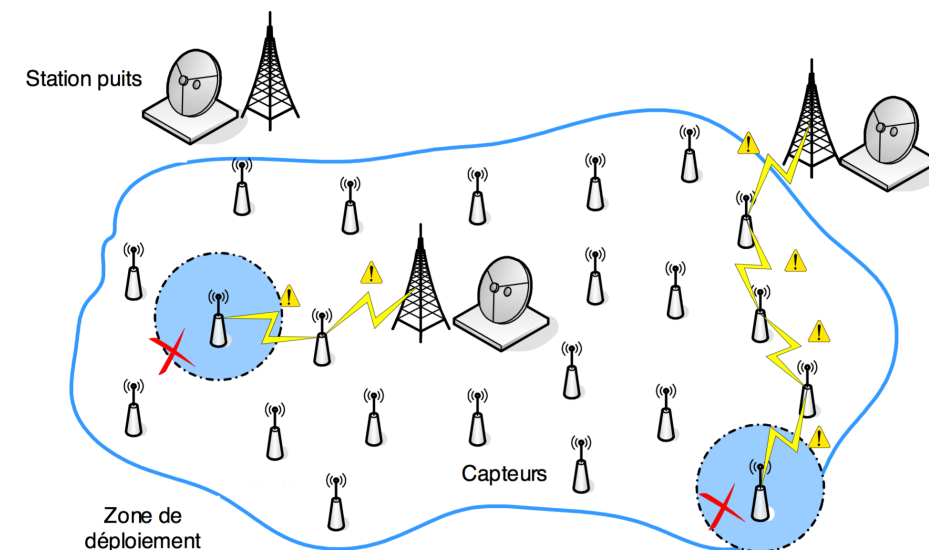
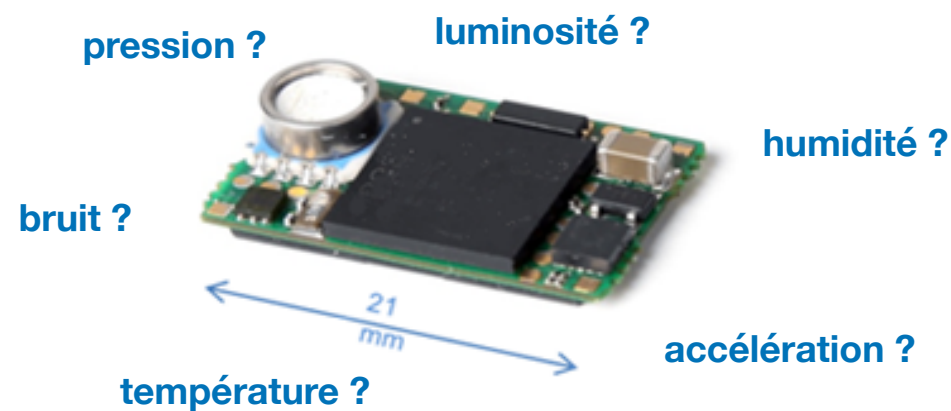
# Enseignant-chercheur





# Contexte de recherche

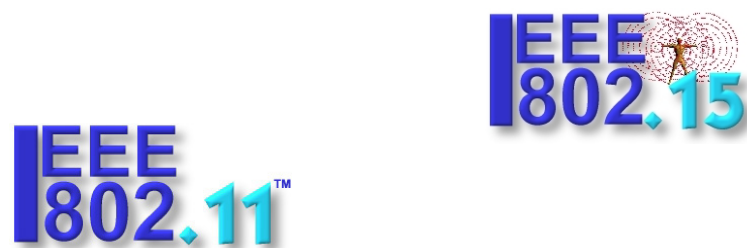
- Des réseaux de capteurs sans fils (WSN) à l'Internet des objets (IoT)
  - Objets (très) contraints et communications multi-sauts



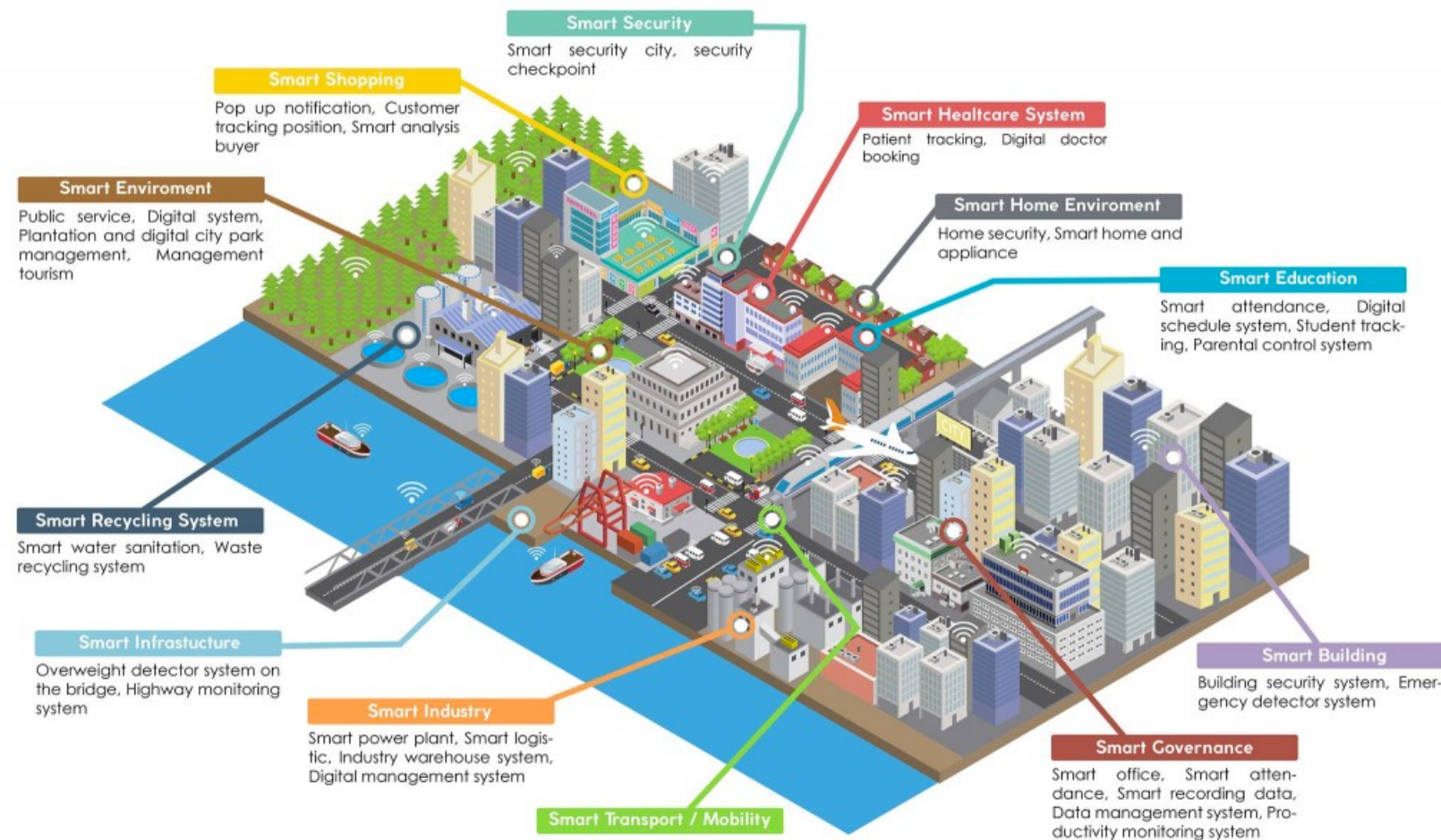


# Contexte de recherche

- Des réseaux de capteurs sans fils (WSN) à l'Internet des objets (IoT)
  - Objets (très) contraints et communications multi-sauts



WirelessHART



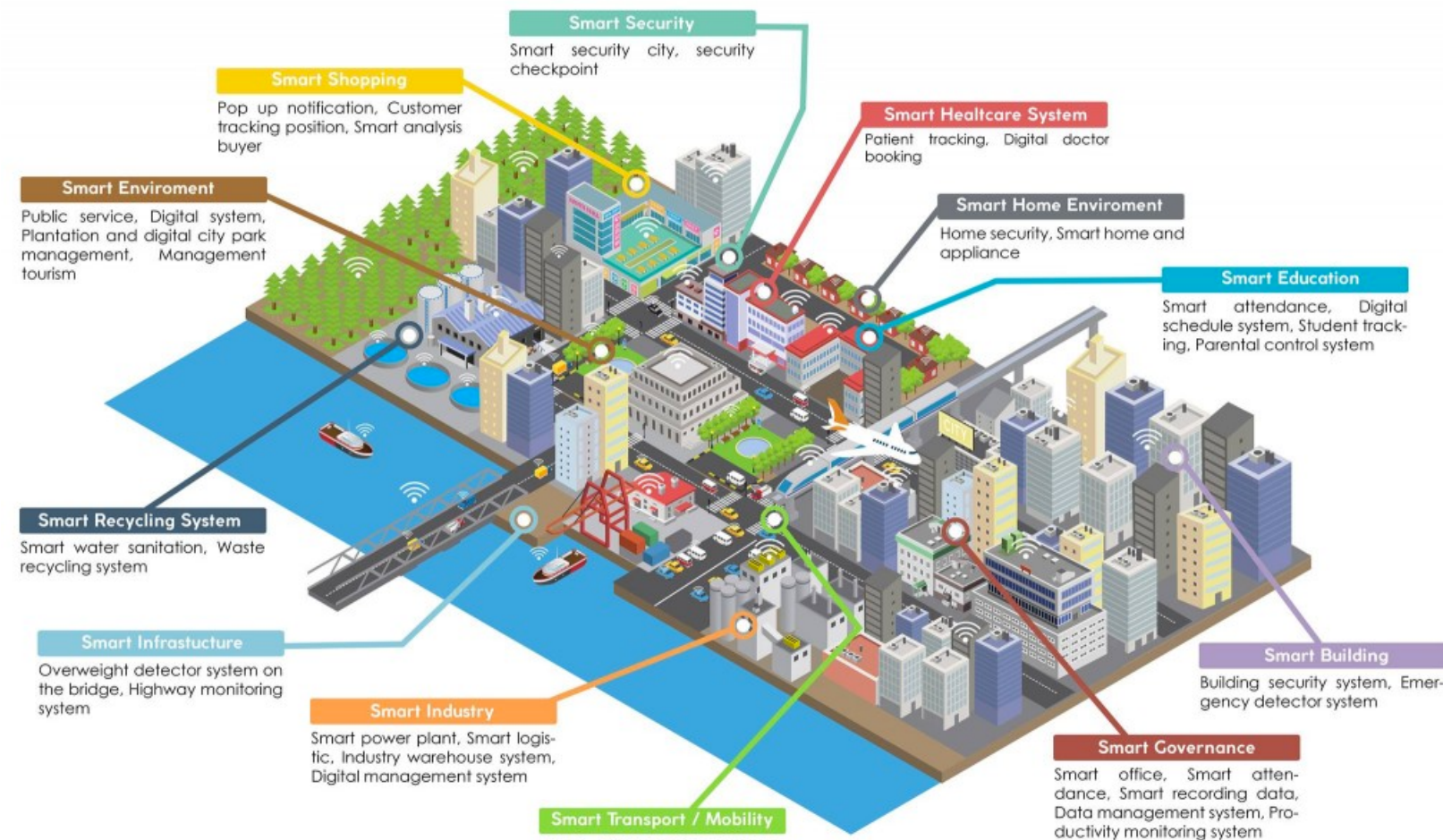
© cubeacon

# Contexte de recherche

- Des réseaux de capteurs sans fils (WSN) à l'Internet des objets (IoT)

- Objets (très) contraints et communications multi-sauts

- ➔ Efficacité énergétique ?
- ➔ Cohabitation radio ?
- ➔ Gestion de l'hétérogénéité ?
- ➔ Gestion de la dynamique ?
- ➔ Management/monitoring ?
- ➔ Sécurité ?
- ➔ Tolérance aux pannes ?
- ...



© cubeacon

# Dans cette présentation

---

- **Efficacité énergétique et contrôle de l'accès au medium (MAC) ?**
  - Ecoute à basse consommation (*low power listening*, LPL)
- **Configurations hétérogènes des paramètres LPL ?**
- **Adaptation des paramètres LPL face à la dynamique ?**
  - Trafic variable ?
  - Mobilité des objets ?
- **Conclusions**
- **Travaux connexes**
- **Perspectives**

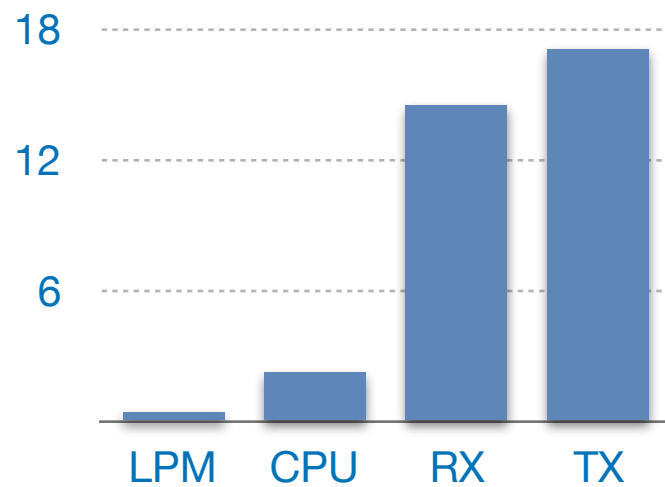
- **Efficacité énergétique et contrôle de l'accès au medium (MAC) ?**
  - Configurations hétérogènes des paramètres LPL ?
  - Adaptation des paramètres LPL face à la dynamique ?
    - Trafic variable ?
    - Mobilité des objets ?
  - Conclusions
  - Travaux connexes
  - Perspectives
- 

# **Efficacité énergétique et contrôle de l'accès au medium (MAC) ?**



# Efficacité énergétique ?

---



- Mise en veille de la radio

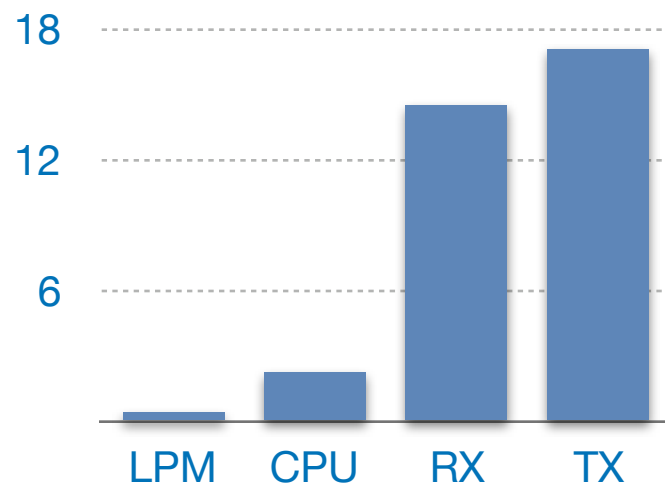
⇒ Organisation des communications ?

J. Eriksson, F. Österlind, N. Finne, A. Dunkels, N. Tsiftes and T. Voigt, "Accurate Network-Scale Power Profiling for Sensor Network Simulators", Wireless Sensor Networks, 2009



# Efficacité énergétique ?

---



- **Mise en veille de la radio**

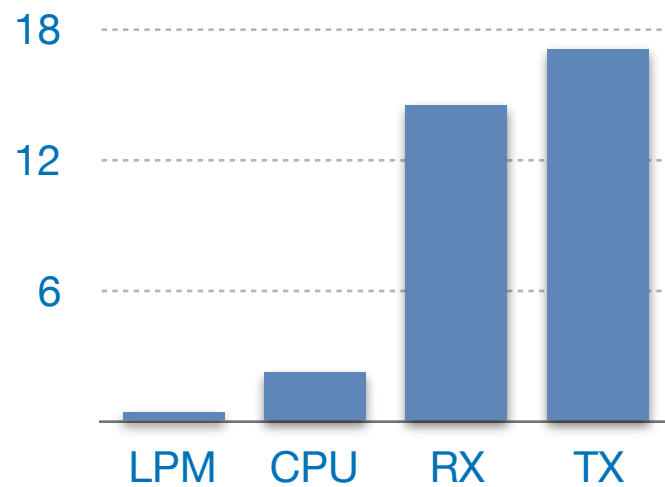
➡ Organisation des communications ?

J. Eriksson, F. Österlind, N. Finne, A. Dunkels, N. Tsiftes and T. Voigt, "Accurate Network-Scale Power Profiling for Sensor Network Simulators", Wireless Sensor Networks, 2009



# Efficacité énergétique ?

---



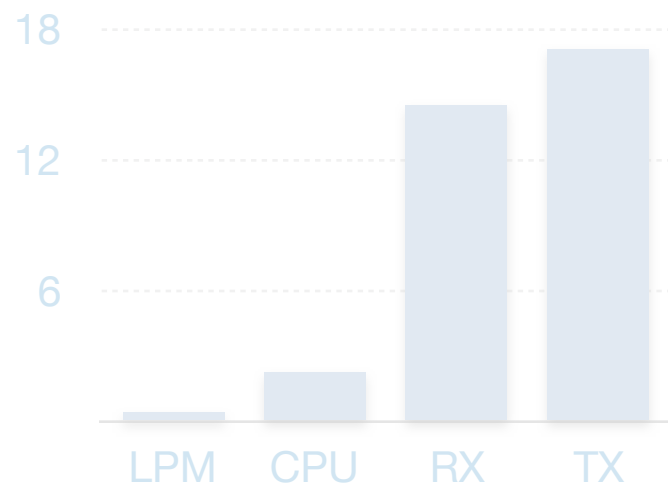
- **Mise en veille de la radio**

➡ Organisation des communications ?

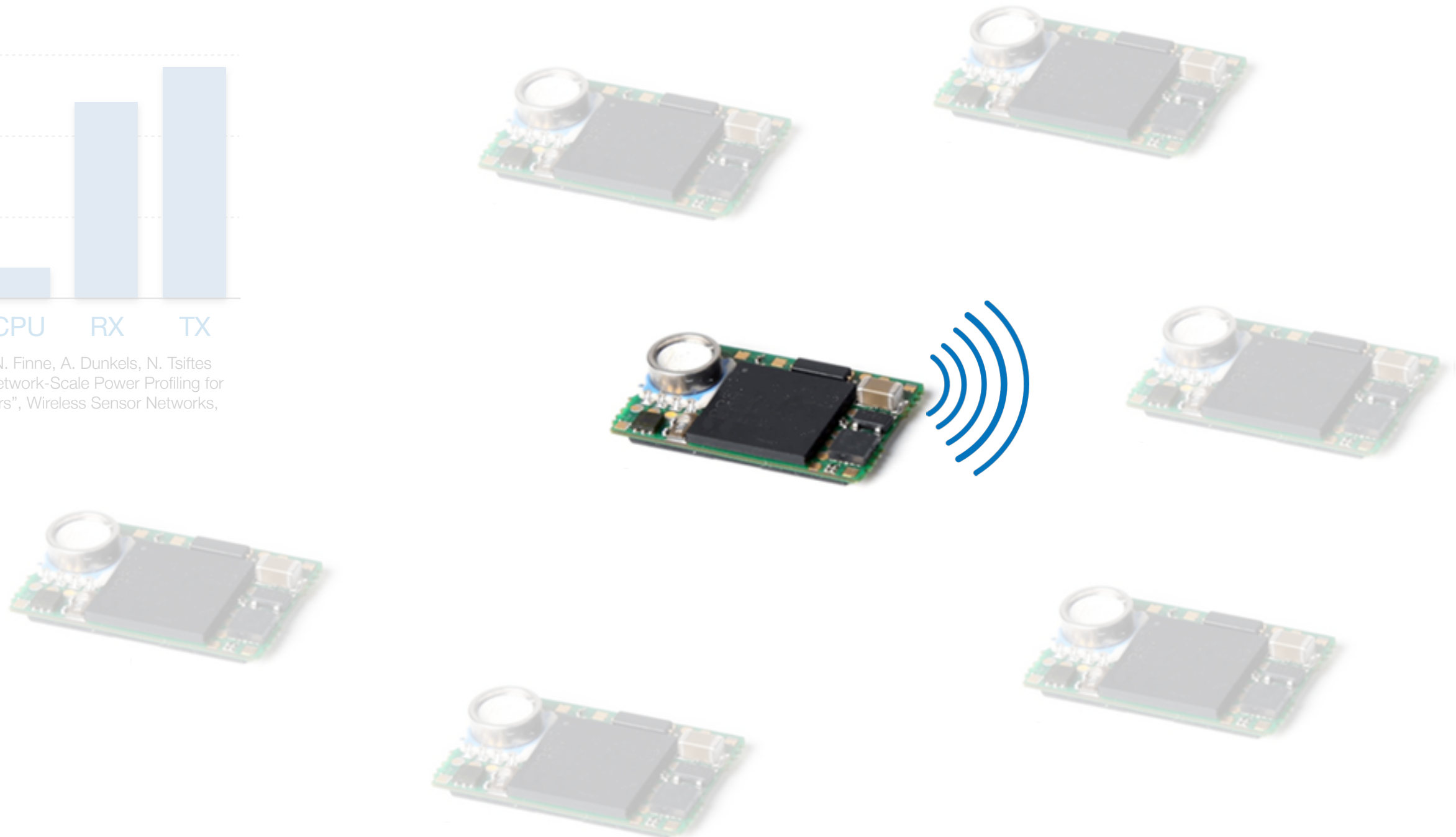
J. Eriksson, F. Österlind, N. Finne, A. Dunkels, N. Tsiftes and T. Voigt, "Accurate Network-Scale Power Profiling for Sensor Network Simulators", Wireless Sensor Networks, 2009



# Efficacité énergétique ?

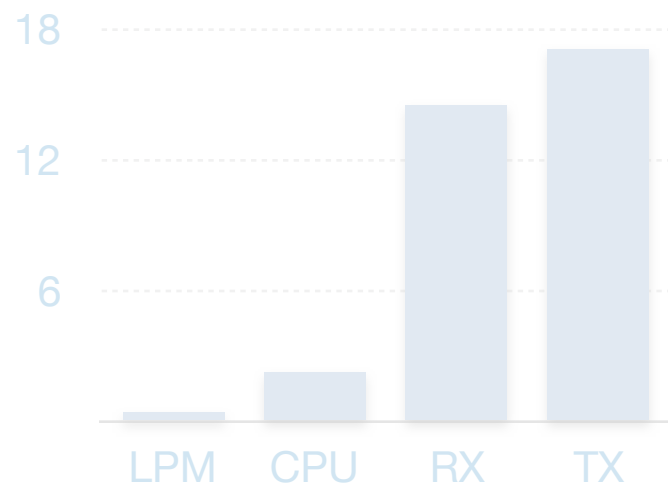


J. Eriksson, F. Österlind, N. Finne, A. Dunkels, N. Tsiftes and T. Voigt, "Accurate Network-Scale Power Profiling for Sensor Network Simulators", Wireless Sensor Networks, 2009



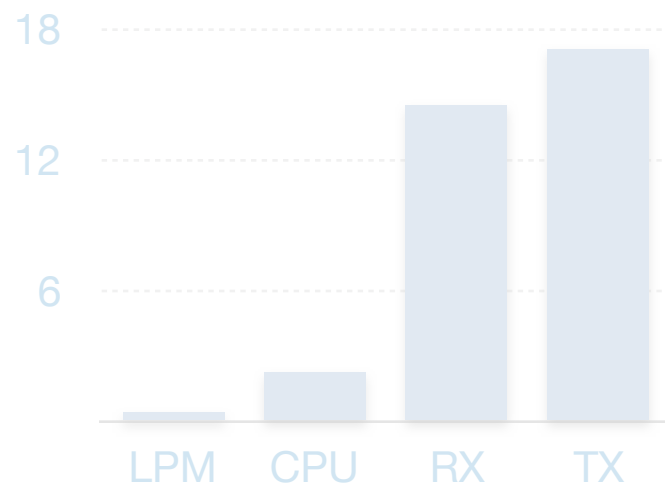


# Efficacité énergétique ?



J. Eriksson, F. Österlind, N. Finne, A. Dunkels, N. Tsiftes and T. Voigt, "Accurate Network-Scale Power Profiling for Sensor Network Simulators", Wireless Sensor Networks, 2009

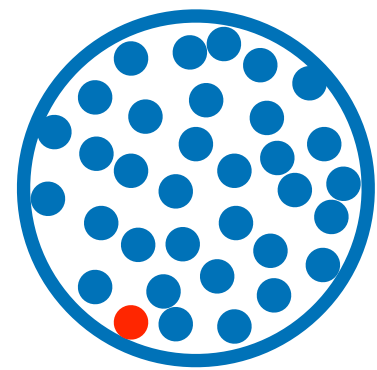
# Efficacité énergétique ?



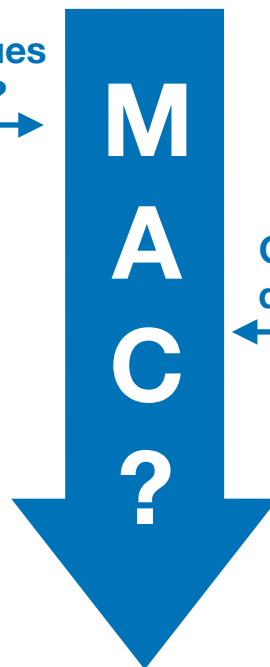
J. Eriksson, F. Österlind, N. Finne, A. Dunkels, N. Tsiftes and T. Voigt, "Accurate Network-Scale Power Profiling for Sensor Network Simulators", Wireless Sensor Networks, 2009

- ➔ Quand émettre ?
- ➔ Quand écouter ?
- ➔ Quand être en veille ?
- ➔ **Contrôle de l'accès au medium (MAC)**

# Quel contrôle de l'accès au medium (MAC) ?



Caractéristiques  
du réseau ?

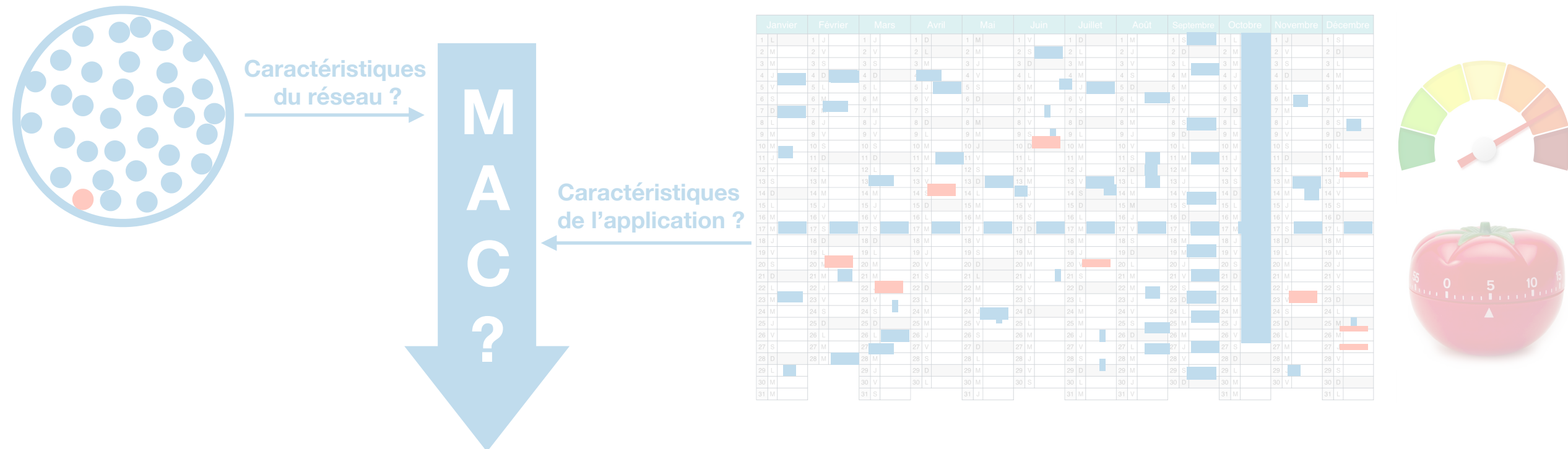


Caractéristiques  
de l'application ?

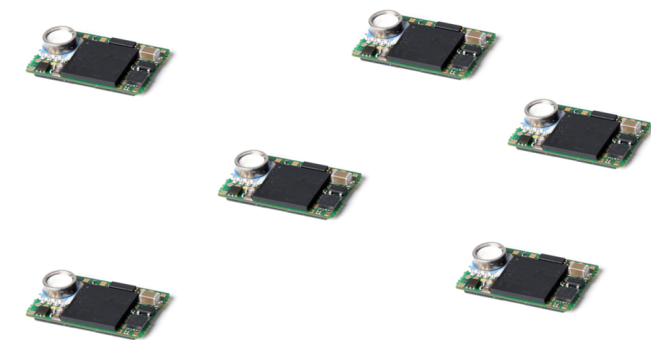
| Janvier | Février | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juillet | Août | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre |
|---------|---------|------|-------|------|------|---------|------|-----------|---------|----------|----------|
| 1 L     | 1 J     | 1 J  | 1 D   | 1 M  | 1 V  | 1 D     | 1 M  | 1 S       | 1 L     | 1 J      | 1 S      |
| 2 M     | 2 V     | 2 V  | 2 L   | 2 M  | 2 S  | 2 L     | 2 J  | 2 D       | 2 M     | 2 V      | 2 D      |
| 3 M     | 3 S     | 3 S  | 3 M   | 3 J  | 3 D  | 3 M     | 3 V  | 3 L       | 3 M     | 3 S      | 3 L      |
| 4 J     | 4 D     | 4 D  | 4 V   | 4 V  | 4 L  | 4 M     | 4 S  | 4 M       | 4 J     | 4 D      | 4 M      |
| 5 V     | 5 L     | 5 L  | 5 J   | 5 S  | 5 M  | 5 D     | 5 D  | 5 M       | 5 V     | 5 L      | 5 M      |
| 6 S     | 6 M     | 6 M  | 6 V   | 6 D  | 6 M  | 6 V     | 6 L  | 6 J       | 6 S     | 6 M      | 6 J      |
| 7 D     | 7 J     | 7 M  | 7 S   | 7 L  | 7 J  | 7 S     | 7 M  | 7 V       | 7 D     | 7 M      | 7 V      |
| 8 L     | 8 J     | 8 J  | 8 D   | 8 M  | 8 V  | 8 D     | 8 M  | 8 S       | 8 L     | 8 J      | 8 S      |
| 9 M     | 9 V     | 9 V  | 9 L   | 9 M  | 9 S  | 9 L     | 9 J  | 9 D       | 9 M     | 9 V      | 9 D      |
| 10 M    | 10 S    | 10 S | 10 M  | 10 J | 10 D | 10 M    | 10 V | 10 L      | 10 M    | 10 S     | 10 L     |
| 11 J    | 11 D    | 11 D | 11 M  | 11 V | 11 L | 11 M    | 11 S | 11 M      | 11 J    | 11 D     | 11 M     |
| 12 V    | 12 L    | 12 L | 12 J  | 12 S | 12 M | 12 J    | 12 D | 12 M      | 12 V    | 12 L     | 12 M     |
| 13 S    | 13 M    | 13 M | 13 V  | 13 D | 13 M | 13 V    | 13 L | 13 J      | 13 S    | 13 M     | 13 J     |
| 14 D    | 14 M    | 14 M | 14 J  | 14 L | 14 S | 14 M    | 14 V | 14 D      | 14 M    | 14 V     | 14 D     |
| 15 L    | 15 J    | 15 J | 15 D  | 15 M | 15 V | 15 D    | 15 M | 15 S      | 15 L    | 15 J     | 15 S     |
| 16 M    | 16 V    | 16 V | 16 L  | 16 M | 16 S | 16 L    | 16 J | 16 D      | 16 M    | 16 V     | 16 D     |
| 17 M    | 17 S    | 17 S | 17 M  | 17 J | 17 D | 17 M    | 17 V | 17 L      | 17 M    | 17 S     | 17 L     |
| 18 J    | 18 D    | 18 D | 18 M  | 18 V | 18 L | 18 M    | 18 S | 18 M      | 18 J    | 18 D     | 18 M     |
| 19 V    | 19 L    | 19 L | 19 J  | 19 S | 19 M | 19 J    | 19 D | 19 M      | 19 V    | 19 L     | 19 M     |
| 20 S    | 20 V    | 20 M | 20 V  | 20 D | 20 M | 20 V    | 20 L | 20 J      | 20 S    | 20 M     | 20 J     |
| 21 D    | 21 M    | 21 M | 21 S  | 21 L | 21 J | 21 S    | 21 M | 21 V      | 21 D    | 21 M     | 21 V     |
| 22 L    | 22 J    | 22 J | 22 D  | 22 M | 22 V | 22 D    | 22 M | 22 S      | 22 L    | 22 J     | 22 S     |
| 23 M    | 23 V    | 23 V | 23 L  | 23 M | 23 S | 23 L    | 23 J | 23 D      | 23 M    | 23 V     | 23 D     |
| 24 M    | 24 S    | 24 S | 24 M  | 24 J | 24 D | 24 M    | 24 V | 24 L      | 24 M    | 24 S     | 24 L     |
| 25 J    | 25 D    | 25 D | 25 M  | 25 V | 25 L | 25 M    | 25 S | 25 M      | 25 J    | 25 D     | 25 M     |
| 26 V    | 26 L    | 26 L | 26 J  | 26 S | 26 M | 26 J    | 26 D | 26 M      | 26 V    | 26 L     | 26 M     |
| 27 S    | 27 M    | 27 M | 27 V  | 27 L | 27 M | 27 V    | 27 L | 27 J      | 27 S    | 27 M     | 27 S     |
| 28 D    | 28 M    | 28 M | 28 S  | 28 L | 28 J | 28 S    | 28 M | 28 V      | 28 D    | 28 M     | 28 V     |
| 29 L    | 29 J    | 29 J | 29 D  | 29 M | 29 V | 29 D    | 29 M | 29 S      | 29 L    | 29 J     | 29 S     |
| 30 M    | 30 V    | 30 V | 30 L  | 30 M | 30 S | 30 L    | 30 J | 30 D      | 30 M    | 30 V     | 30 D     |
| 31 M    | 31 S    | 31 S | 31 J  | 31 M | 31 V | 31 M    | 31 V | 31 M      | 31 M    | 31 L     | 31 L     |



# Quel contrôle de l'accès au medium (MAC) ?



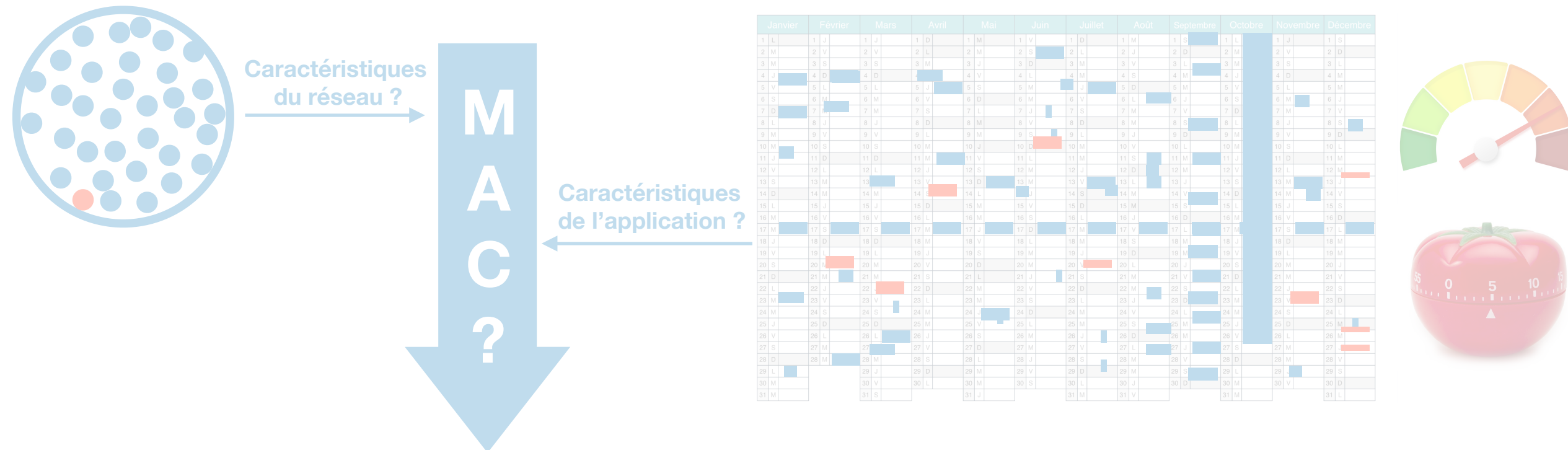
- **Approches synchronisées**
  - Horloge commune
  - S'accorder sur les temps de parole



V. Rajendran, K. Obraczka, and J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. *ACM SenSys*, pp 181–192, November 2003.

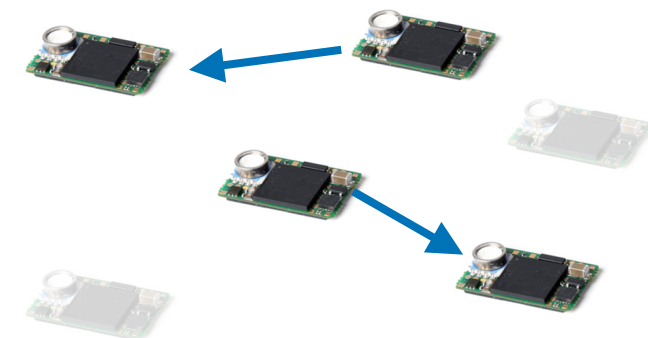
W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(3):493–506, June 2004.

# Quel contrôle de l'accès au medium (MAC) ?



- **Approches synchronisées**

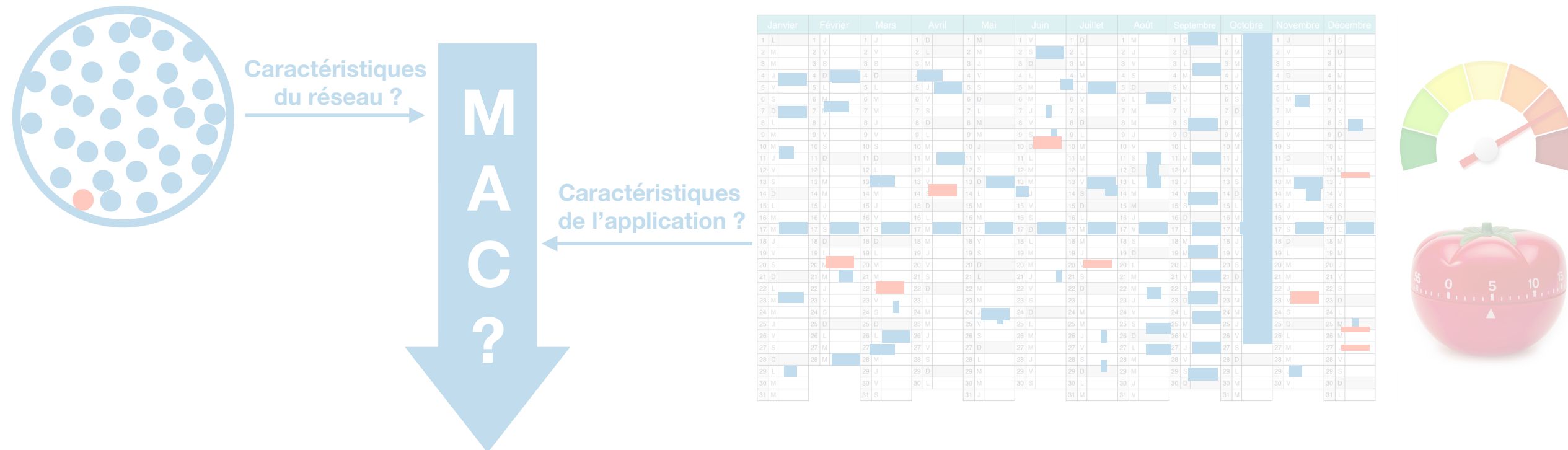
- Horloge commune
- S'accorder sur les temps de parole



V. Rajendran, K. Obraczka, and J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. ACM SenSys, pp 181–192, November 2003.

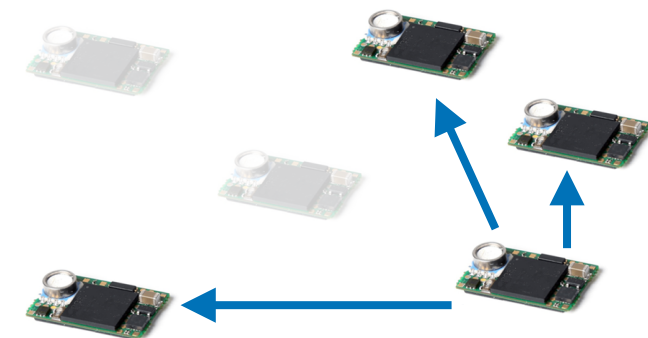
W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 12(3):493–506, June 2004.

# Quel contrôle de l'accès au medium (MAC) ?



## • Approches synchronisées

- Horloge commune
- S'accorder sur les temps de parole

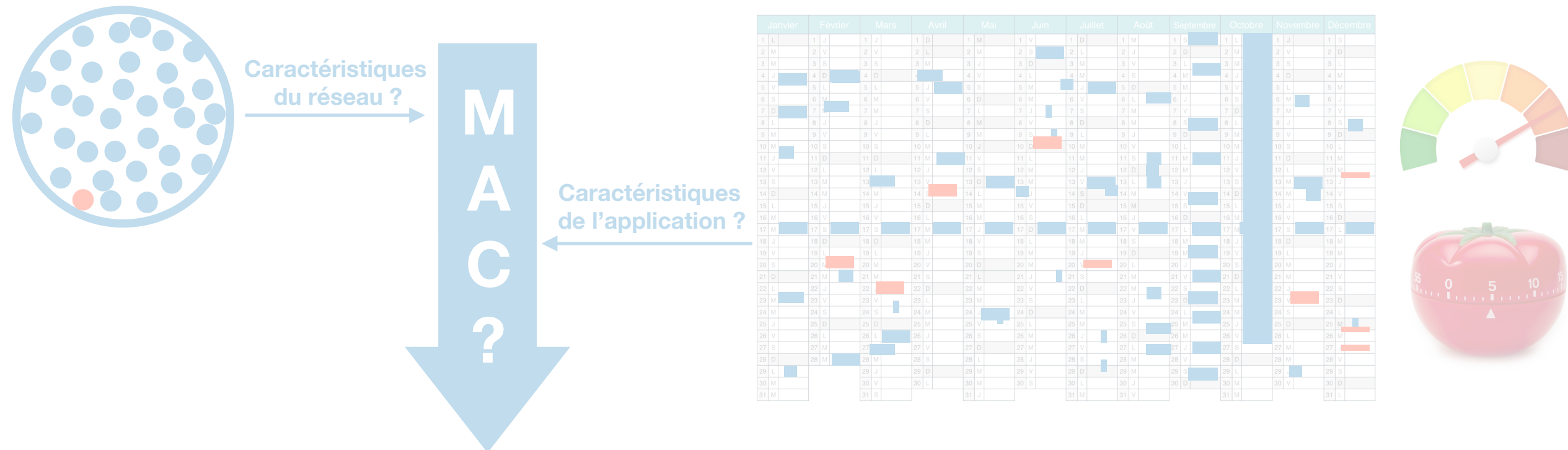


V. Rajendran, K. Obraczka, and J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. ACM SenSys, pp 181–192, November 2003.

W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 12(3):493–506, June 2004.

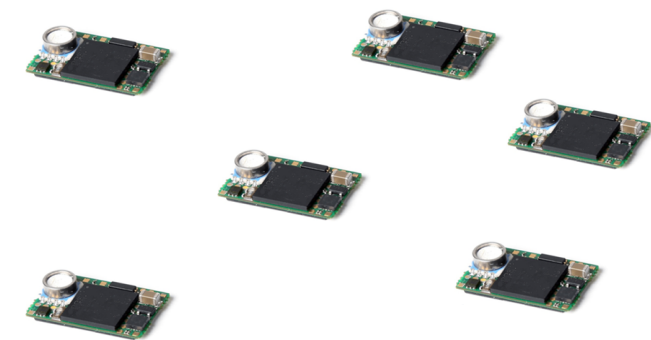


# Quel contrôle de l'accès au medium (MAC) ?



## • Approches synchronisées

- Horloge commune
- S'accorder sur les temps de parole

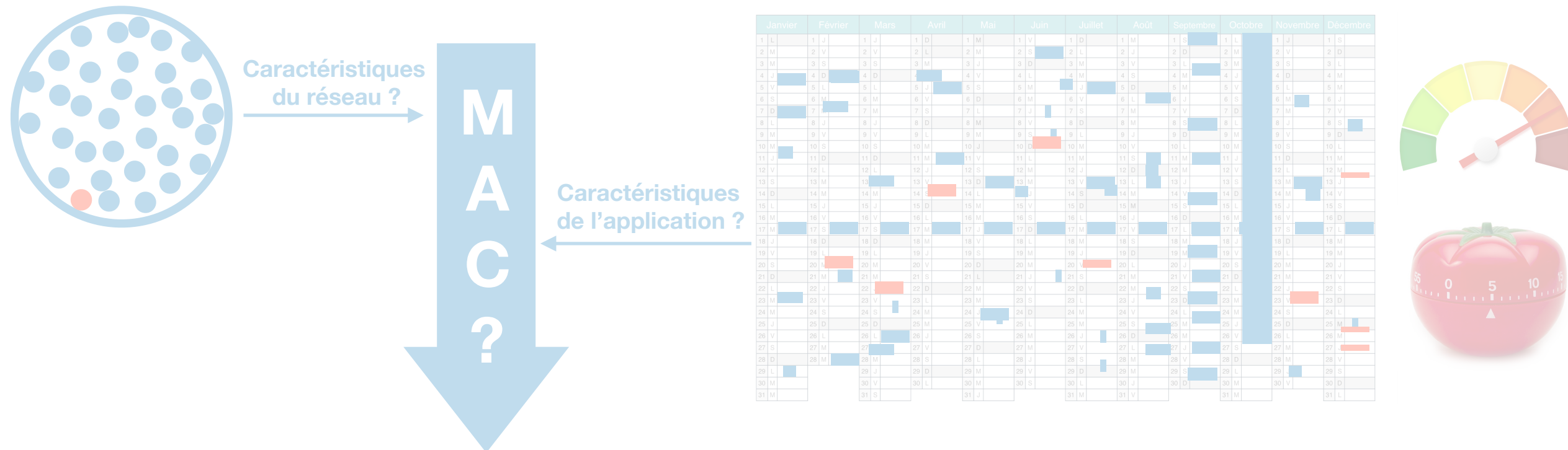


V. Rajendran, K. Obraczka, and J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. ACM SenSys, pp 181–192, November 2003.

W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 12(3):493–506, June 2004.



# Quel contrôle de l'accès au medium (MAC) ?



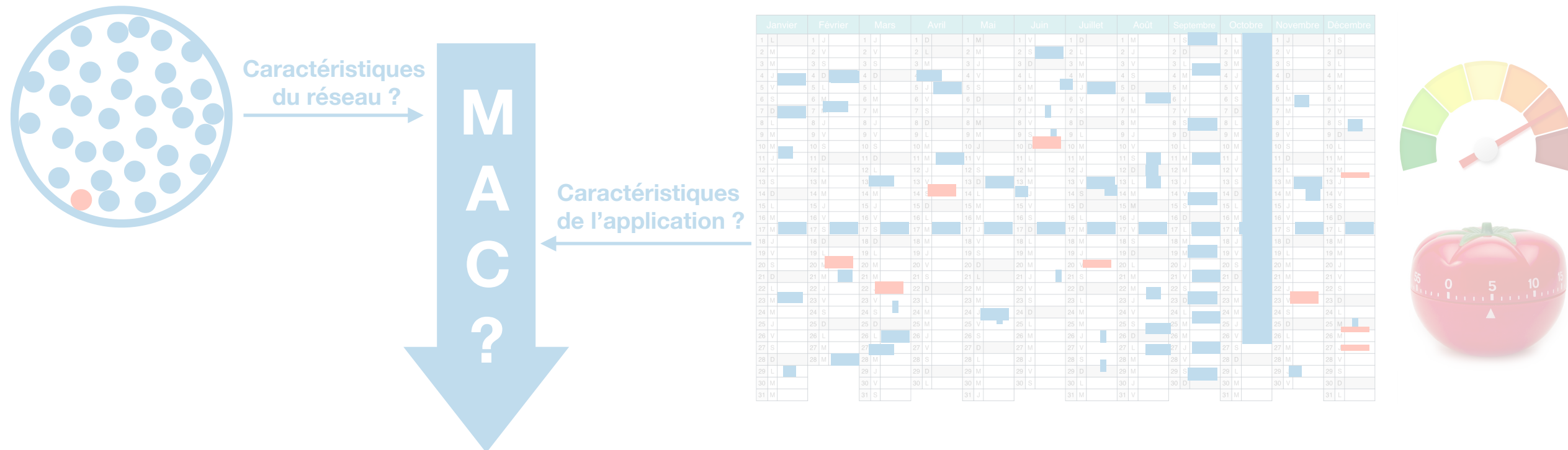
- **Approches asynchrones**

- Ecoute à basse consommation (*Low-power listening*, LPL)

[B-MAC] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. ACM SenSys, pp 95–107, November 2004.

M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. ACM SenSys, pp 307–320, October 2006.

# Quel contrôle de l'accès au medium (MAC) ?

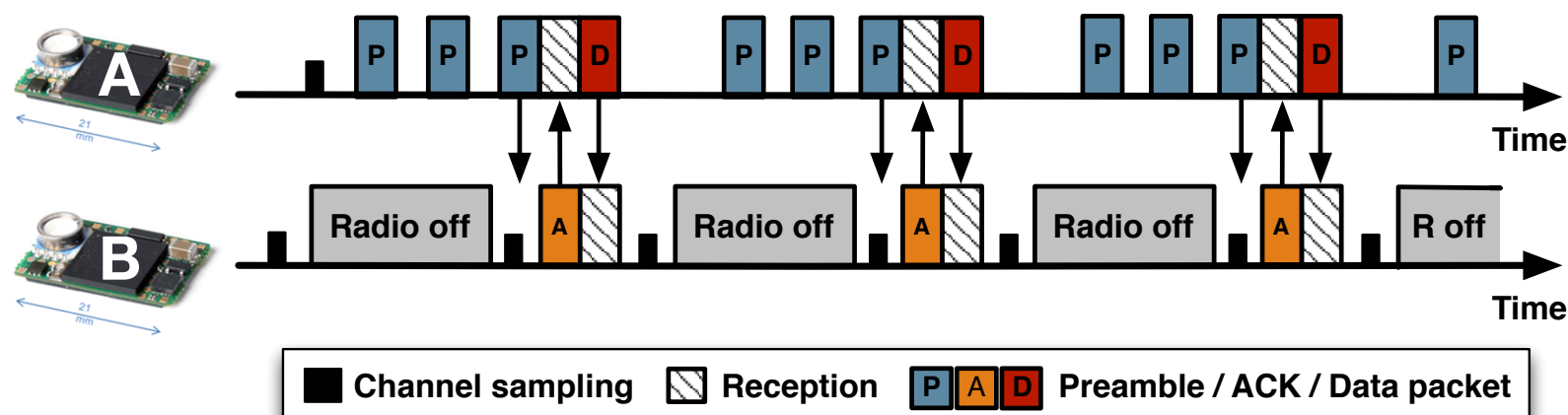


## • Approches asynchrones

- Ecoute à basse consommation (*Low-power listening*, LPL)

[B-MAC] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. ACM SenSys, pp 95–107, November 2004.

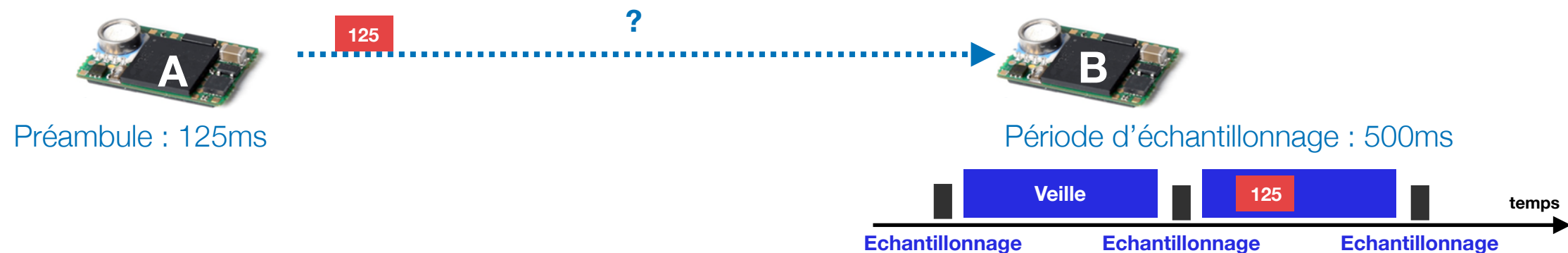
M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. ACM SenSys, pp 307–320, October 2006.



# Choix : *Low Power Listening* (LPL)

- **Etude des déploiements existants**

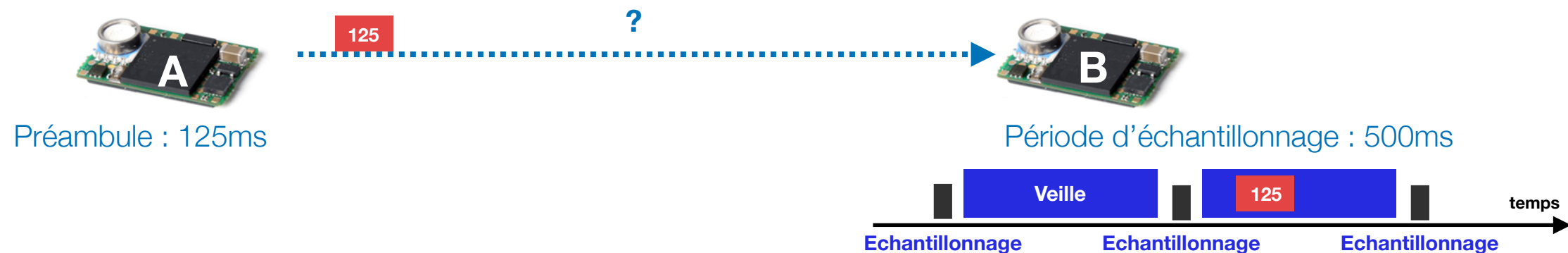
- Paramètres LPL (durée préambule et veille) fixés a priori et conservés statiques
- Paramètres identiques pour tous les noeuds
  - ➔ Sinon, risque de perte de connectivité



# Choix : *Low Power Listening* (LPL)

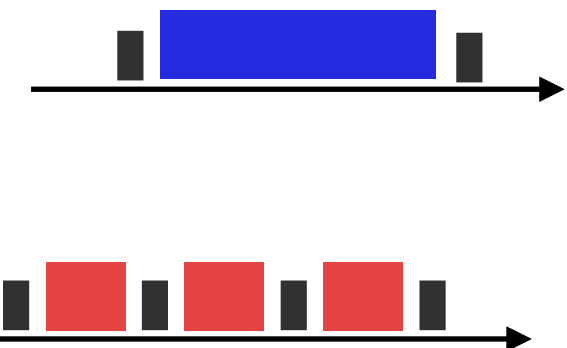
- **Etude des déploiements existants**

- Paramètres LPL (durée préambule et veille) fixés a priori et conservés statiques
- Paramètres identiques pour tous les noeuds
  - ➔ Sinon, risque de perte de connectivité



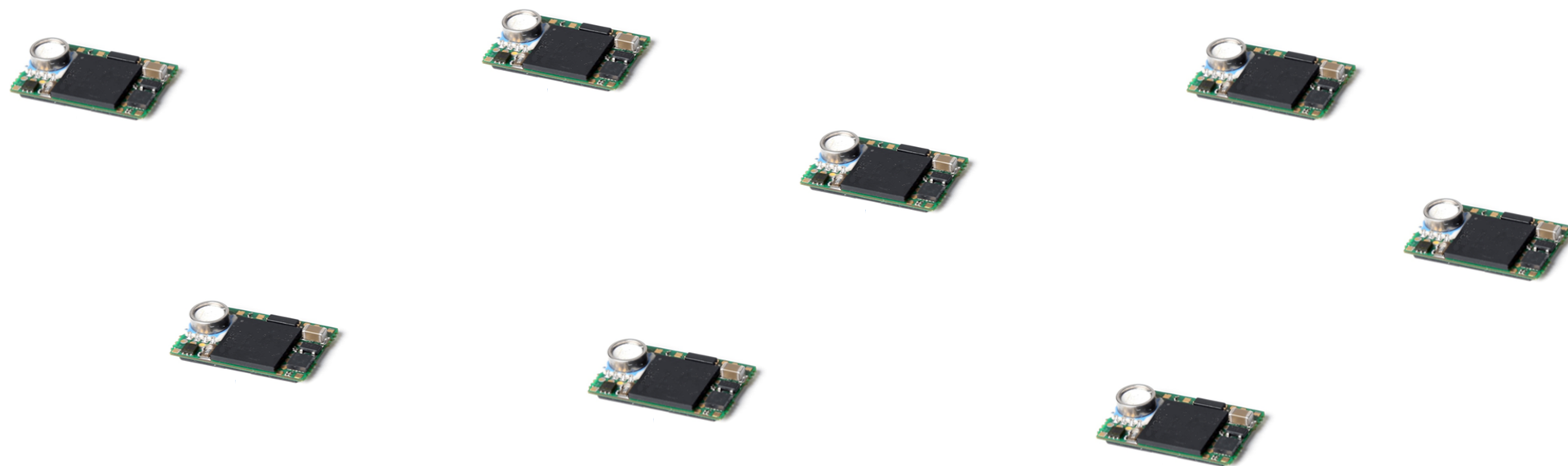
- **Problème**

- Longues périodes de veille
  - ➔ Economies d'énergie mais coût pour les émetteurs
- Courtes périodes de veille
  - ➔ Noeuds réactifs mais coût pour les récepteurs



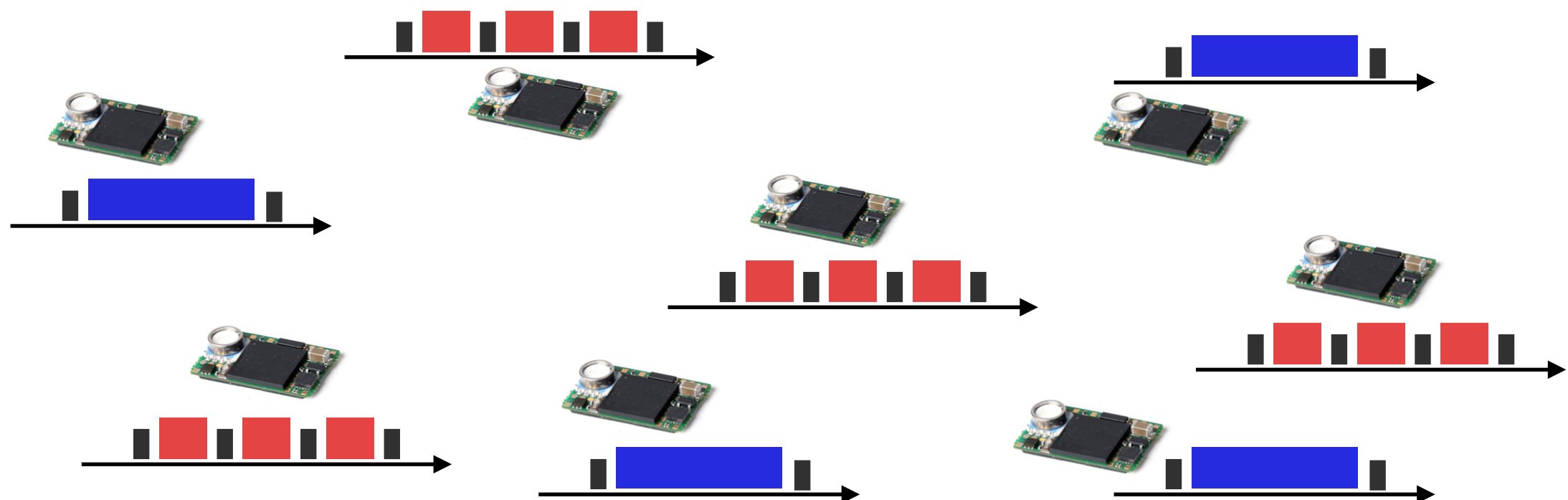
- Efficacité énergétique et contrôle de l'accès au medium (MAC) ?
  - **Configurations hétérogènes des paramètres LPL ?**
  - Adaptation des paramètres LPL face à la dynamique ?
    - Trafic variable ?
    - Mobilité des objets ?
  - Conclusions
  - Travaux connexes
  - Perspectives
- 

# Configurations hétérogènes des paramètres LPL ?



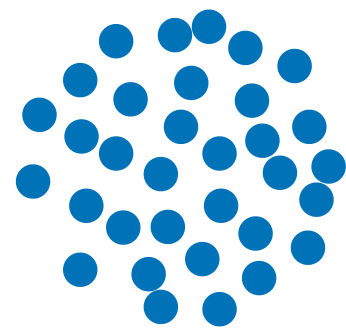
- Efficacité énergétique et contrôle de l'accès au medium (MAC) ?
  - **Configurations hétérogènes des paramètres LPL ?**
  - Adaptation des paramètres LPL face à la dynamique ?
    - Trafic variable ?
    - Mobilité des objets ?
  - Conclusions
  - Travaux connexes
  - Perspectives
- 

## Configurations hétérogènes des paramètres LPL ?





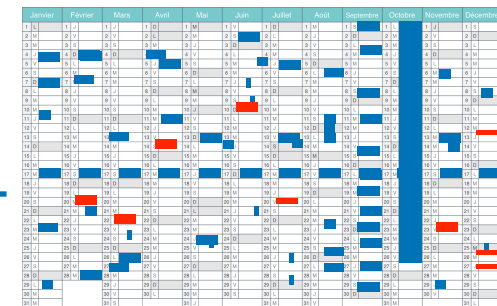
# Configuration des paramètres LPL



Etat du réseau ?

Configuration  
des paramètres LPL

Caractéristiques  
de l'application ?

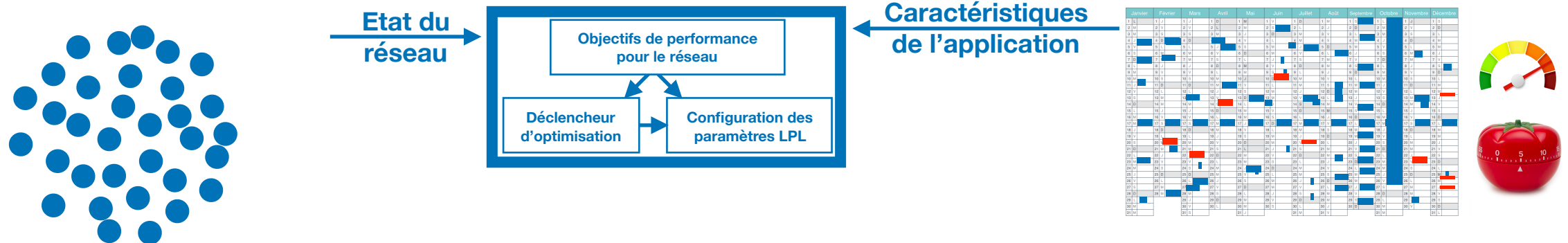






# Configuration des paramètres LPL

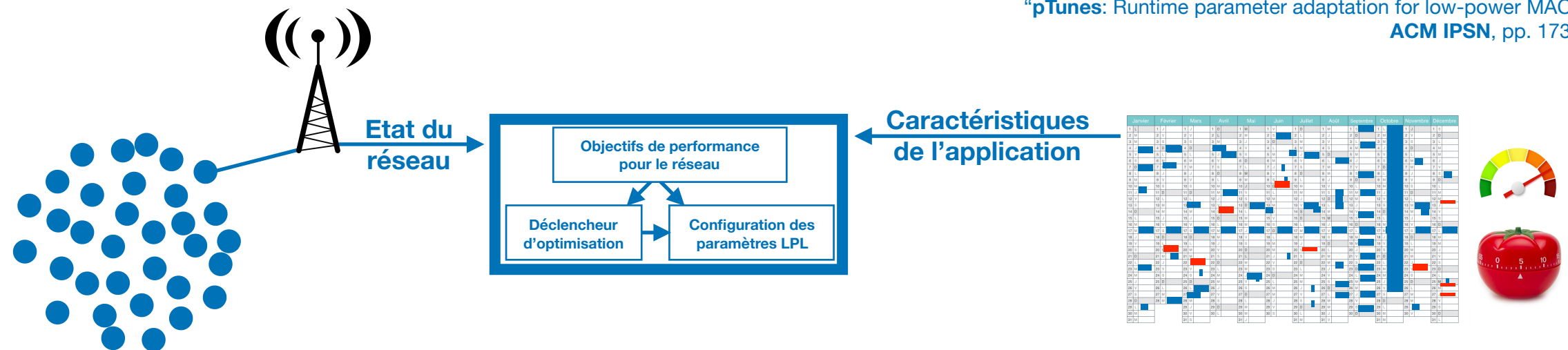
M. Zimmerling, F. Ferrari, L. Mottola, T. Voigt, and L. Thiele,  
“pTunes: Runtime parameter adaptation for low-power MAC protocols,”  
ACM IPSN, pp. 173–184, 2012.





# Configuration des paramètres LPL

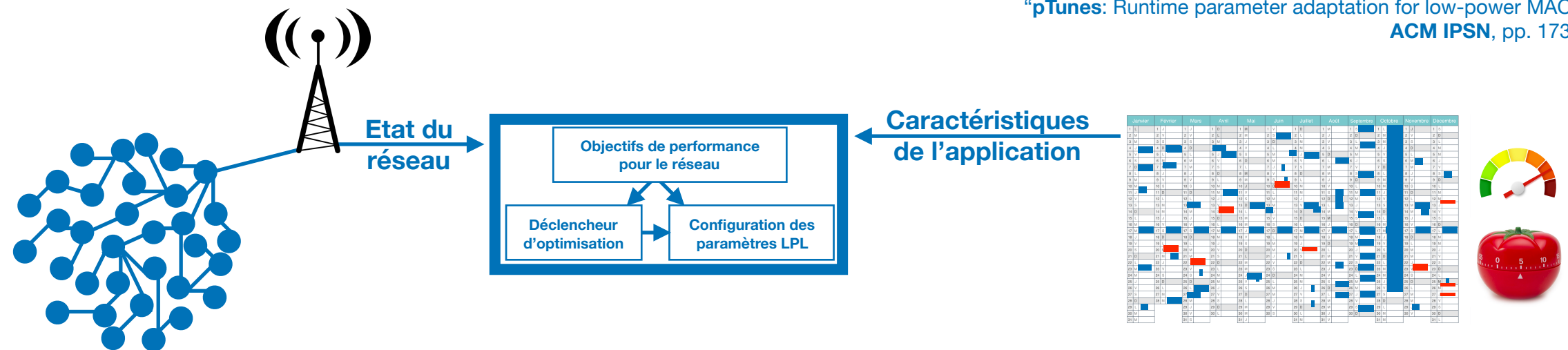
M. Zimmerling, F. Ferrari, L. Mottola, T. Voigt, and L. Thiele,  
“pTunes: Runtime parameter adaptation for low-power MAC protocols,”  
ACM IPSN, pp. 173–184, 2012.





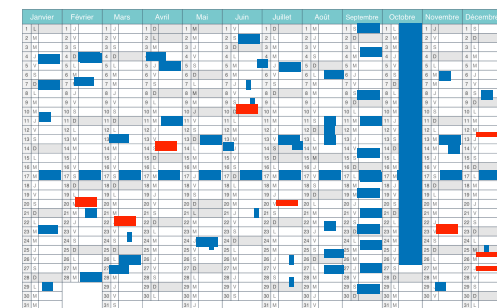
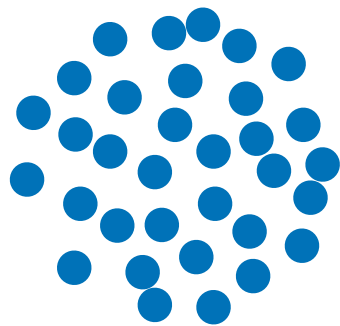
# Configuration des paramètres LPL

M. Zimmerling, F. Ferrari, L. Mottola, T. Voigt, and L. Thiele,  
“pTunes: Runtime parameter adaptation for low-power MAC protocols,”  
ACM IPSN, pp. 173–184, 2012.



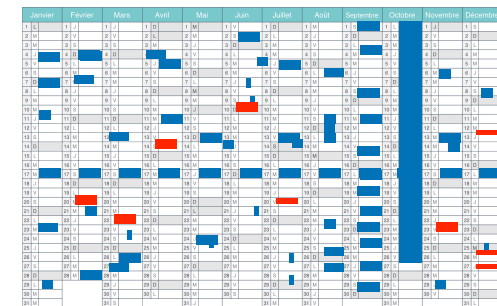
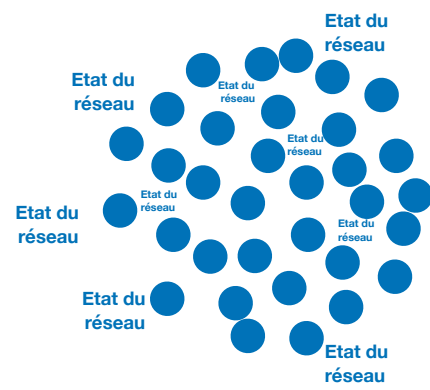


# Configuration des paramètres LPL



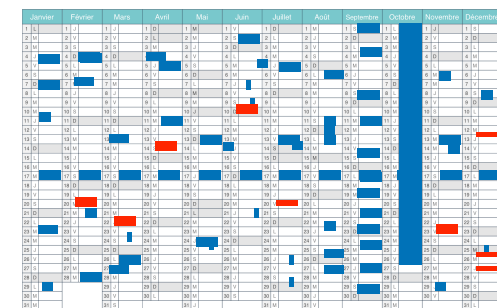
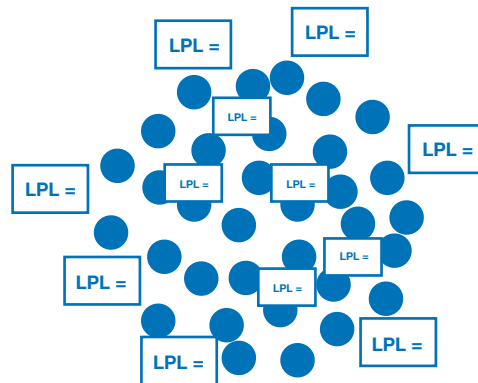


# Configuration des paramètres LPL

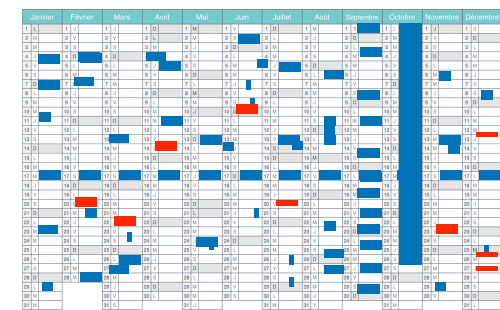
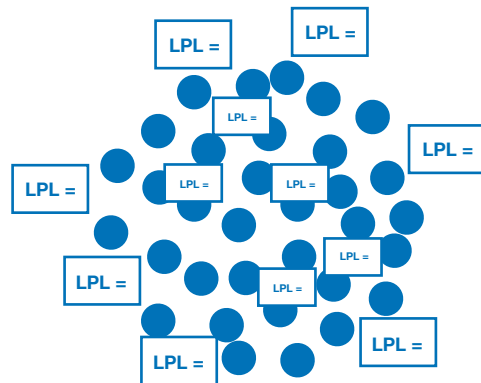




# Configuration des paramètres LPL



# Configuration des paramètres LPL



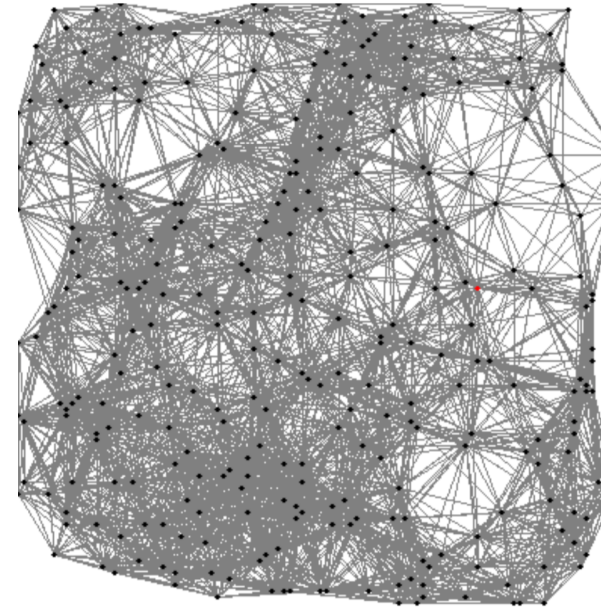
- **Comment auto-configurer les paramètres LPL ?**
  - Idée : différencier les noeuds (i.e.,  ou  ?)
    - Rôle dans la topologie du réseau ?
    - Rôle dans l'application ?



# Rôle dans la topologie du réseau

---

- Relais / “non relais” ?



# Rôle dans la topologie du réseau

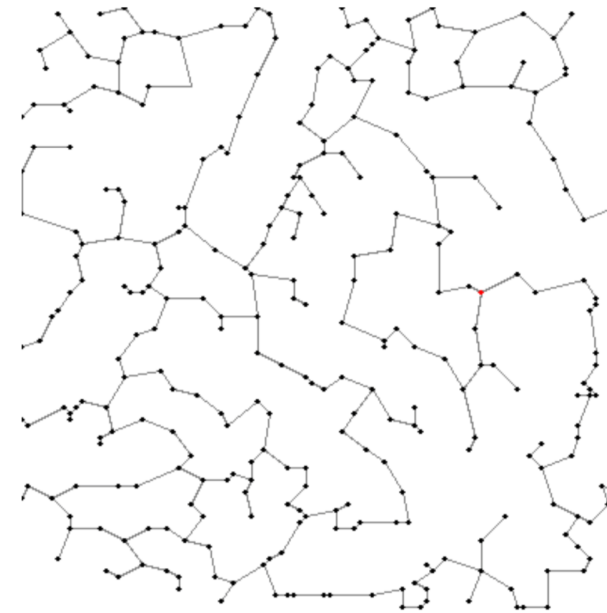
X.-Y. Li, Y. Wang, and W.-Z. Song, "Applications of k-local MST for topology control and broadcasting in wireless ad hoc networks,"  
IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), vol. 15, no. 12, pp. 1057–1069, 2004.

- **Relais / “non relais” ?**

- ➡ Topologie physique

- Trouver l'arbre couvrant minimal...
    - ...de façon localisée.

- ➡ Feuilles non relais (*sensing-only*)



1. Every node  $u$  collects the location information of  $N_2(u)$  based on an efficient method described in [32] (reviewed in detail later).
2. Every node  $u$  computes the Euclidean minimum spanning tree  $MST(N_2(u))$  of its 2-hop neighbors  $N_2(u)$ , including  $u$  itself.
3. A node  $u$  proposes to add a directed edge  $\overrightarrow{uv}$  if  $uv \in MST(N_2(u))$  and  $\|uv\| \leq 1$ .

# Rôle dans la topologie du réseau

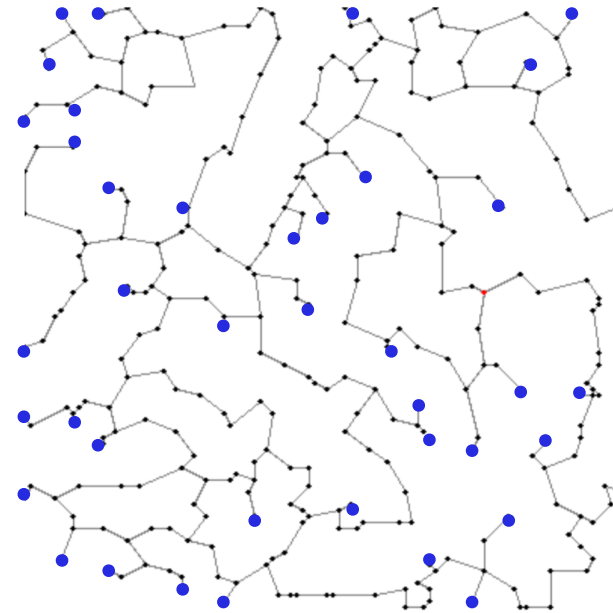
X.-Y. Li, Y. Wang, and W.-Z. Song, "Applications of k-local MST for topology control and broadcasting in wireless ad hoc networks,"  
IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), vol. 15, no. 12, pp. 1057–1069, 2004.

- **Relais / “non relais” ?**

- ➡ Topologie physique

- Trouver l'arbre couvrant minimal...
    - ...de façon localisée.

- ➡ Feuilles non relais (*sensing-only*)



1. Every node  $u$  collects the location information of  $N_2(u)$  based on an efficient method described in [32] (reviewed in detail later).
2. Every node  $u$  computes the Euclidean minimum spanning tree  $MST(N_2(u))$  of its 2-hop neighbors  $N_2(u)$ , including  $u$  itself.
3. A node  $u$  proposes to add a directed edge  $\overrightarrow{uv}$  if  $uv \in MST(N_2(u))$  and  $\|uv\| \leq 1$ .

# Rôle dans la topologie du réseau

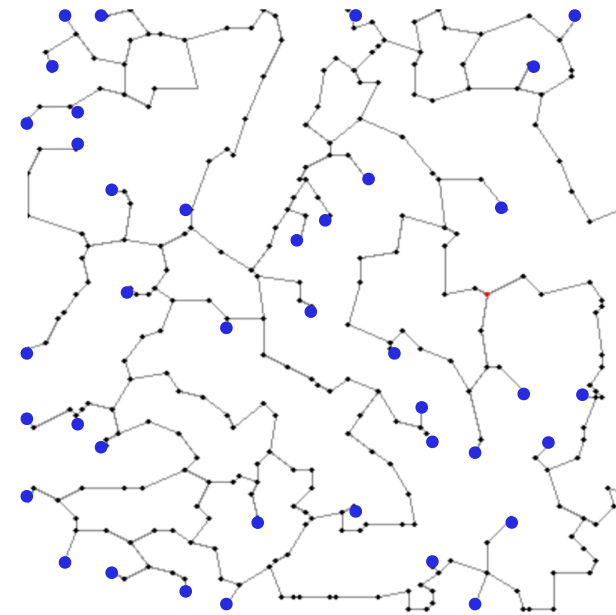
X.-Y. Li, Y. Wang, and W.-Z. Song, "Applications of k-local MST for topology control and broadcasting in wireless ad hoc networks,"  
IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), vol. 15, no. 12, pp. 1057–1069, 2004.

- Relais / “non relais” ?

- ➡ Topologie physique

- Trouver l’arbre couvrant minimal...
    - ...de façon localisée.

- ➡ Feuilles non relais (*sensing-only*)

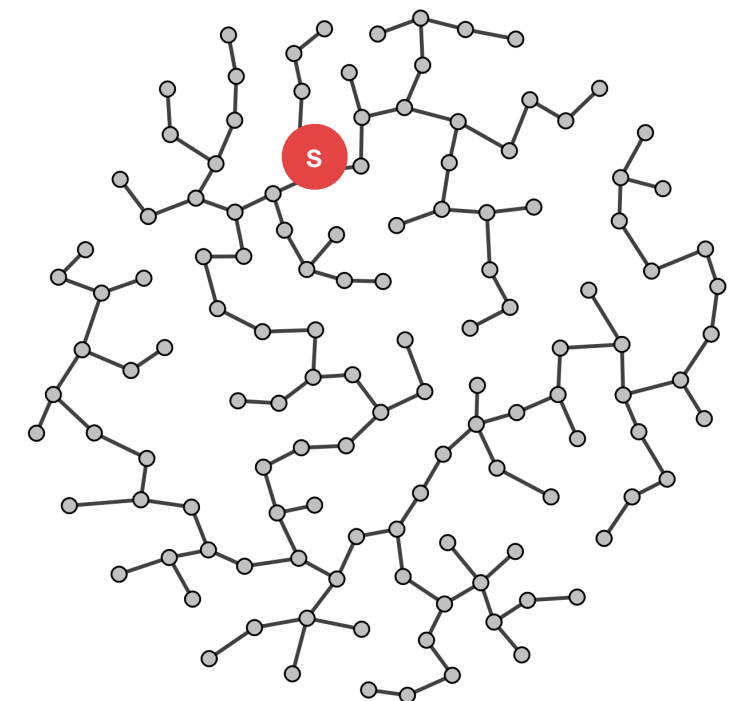


1. Every node  $u$  collects the location information of  $N_2(u)$  based on an efficient method described in [32] (reviewed in detail later).
2. Every node  $u$  computes the Euclidean minimum spanning tree  $MST(N_2(u))$  of its 2-hop neighbors  $N_2(u)$ , including  $u$  itself.
3. A node  $u$  proposes to add a directed edge  $\overrightarrow{uv}$  if  $uv \in MST(N_2(u))$  and  $\|uv\| \leq 1$ .

- ➡ Topologie logique

- Exemple : topologie de routage (gradient)

- ➡ Feuilles non relais (*sensing-only*)



C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva, "Directed diffusion for wireless sensor networking,"  
IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN), vol. 11, no. 1, pp. 2–16, 2003.

T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struik, J. Vasseur, and R. Alexander,  
“RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks,”  
Internet Engineering Task Force Request for Comments (RFC) 6550, 2012.

# Rôle dans la topologie du réseau

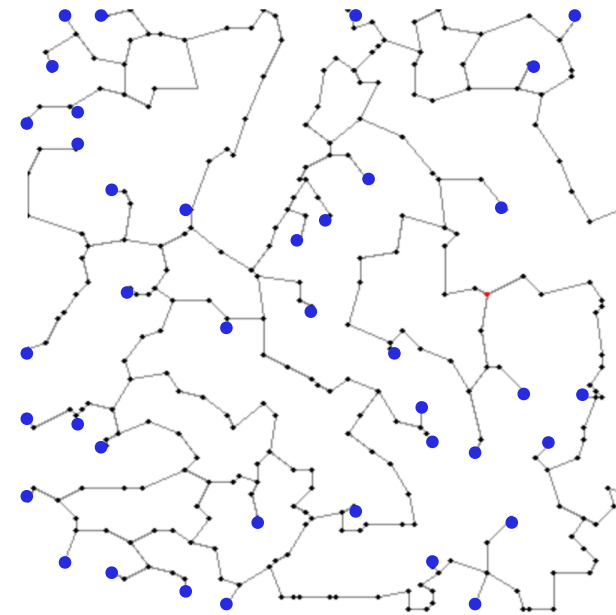
X.-Y. Li, Y. Wang, and W.-Z. Song, "Applications of k-local MST for topology control and broadcasting in wireless ad hoc networks,"  
 IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), vol. 15, no. 12, pp. 1057–1069, 2004.

## • Relais / "non relais" ?

### ➡ Topologie physique

- Trouver l'arbre couvrant minimal...
- ...de façon localisée.

### ➡ Feuilles non relais (*sensing-only*)

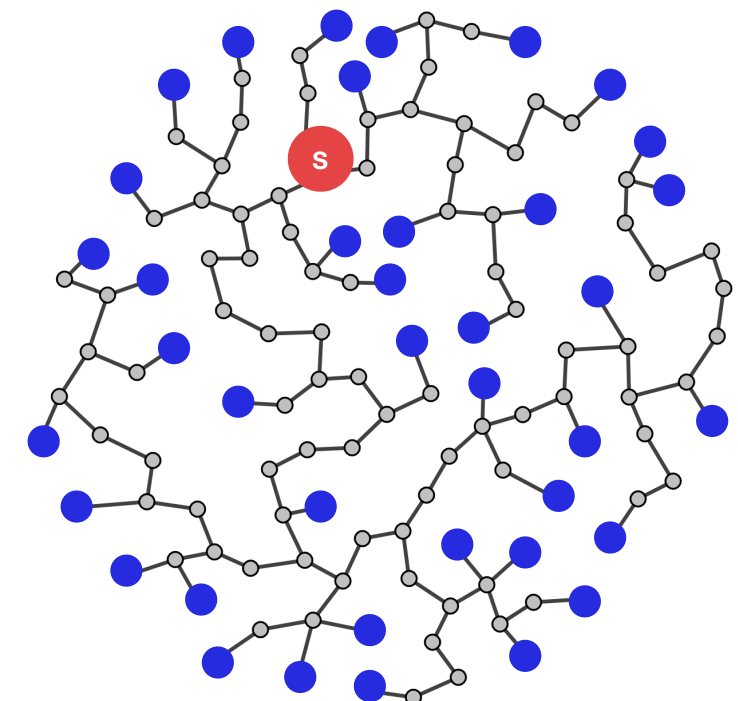


1. Every node  $u$  collects the location information of  $N_2(u)$  based on an efficient method described in [32] (reviewed in detail later).
2. Every node  $u$  computes the Euclidean minimum spanning tree  $MST(N_2(u))$  of its 2-hop neighbors  $N_2(u)$ , including  $u$  itself.
3. A node  $u$  proposes to add a directed edge  $\overrightarrow{uv}$  if  $uv \in MST(N_2(u))$  and  $\|uv\| \leq 1$ .

### ➡ Topologie logique

- Exemple : topologie de routage (gradient)

### ➡ Feuilles non relais (*sensing-only*)



C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva, "Directed diffusion for wireless sensor networking,"  
 IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN), vol. 11, no. 1, pp. 2–16, 2003.

T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struik, J. Vasseur, and R. Alexander,  
 "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks,"  
 Internet Engineering Task Force Request for Comments (RFC) 6550, 2012.

# Rôle dans la topologie du réseau

- Relais / “non relais” ?

- ➡ Topologie physique

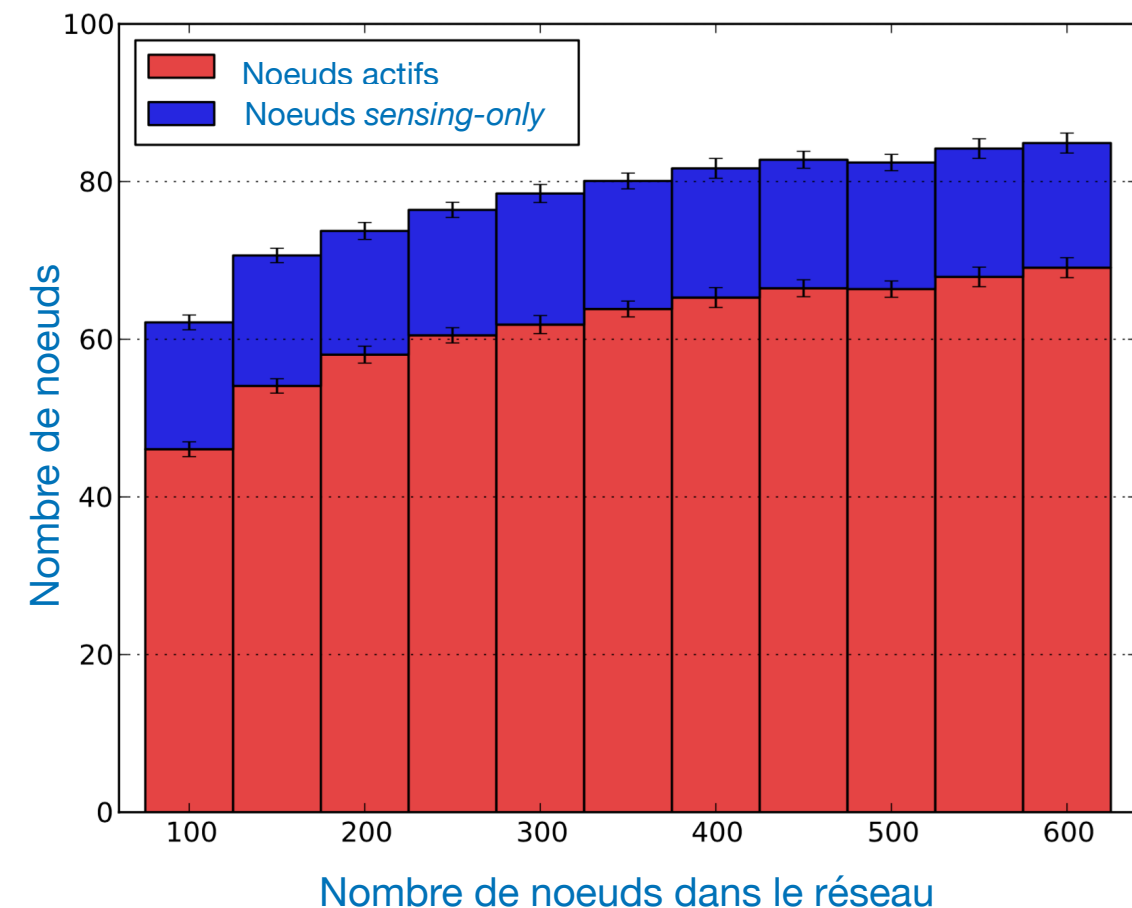
- Trouver l'arbre couvrant minimal...
    - ...de façon localisée.

- ➡ Feuilles non relais (*sensing-only*)

- ➡ Topologie logique

- Exemple : topologie de routage (gradient)

- ➡ Feuilles non relais (*sensing-only*)



# Rôle dans la topologie du réseau

- Relais / “non relais” ?

- ➡ Topologie physique

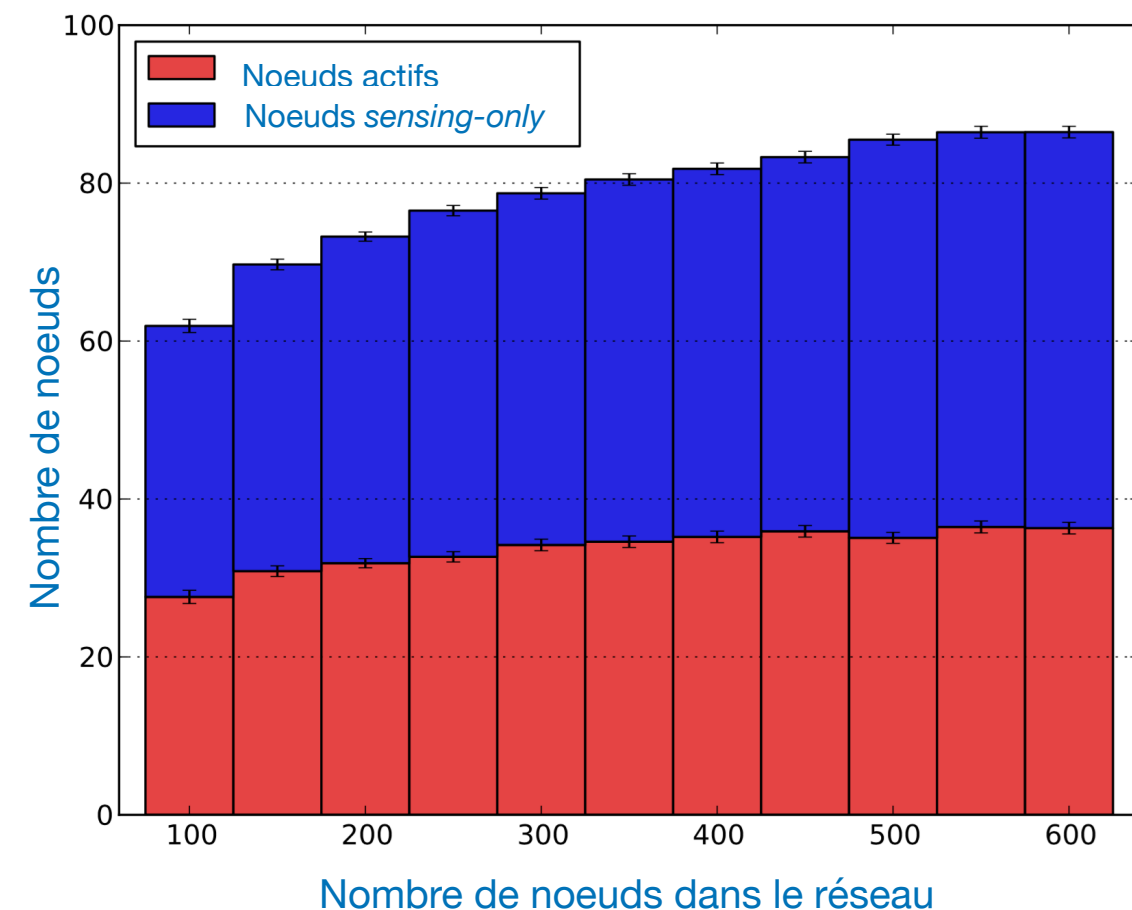
- Trouver l'arbre couvrant minimal...
    - ...de façon localisée.

- ➡ Feuilles non relais (*sensing-only*)

- ➡ Topologie logique

- Exemple : topologie de routage (gradient)

- ➡ Feuilles non relais (*sensing-only*)

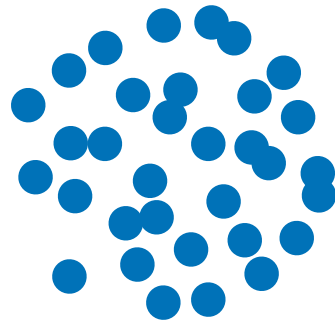




# Rôle dans l'application

---

- Partitionnement : utilité d'un noeud pour l'application => niveau d'activité ?

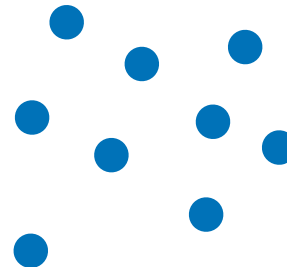
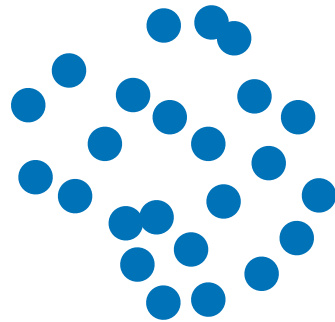




# Rôle dans l'application

---

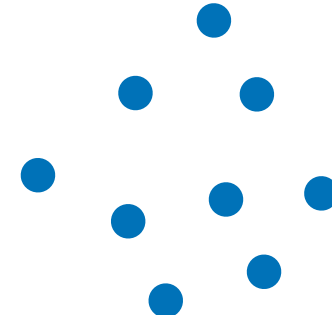
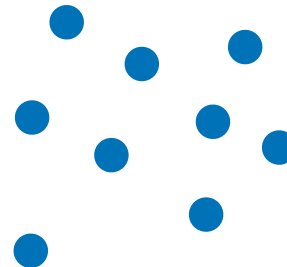
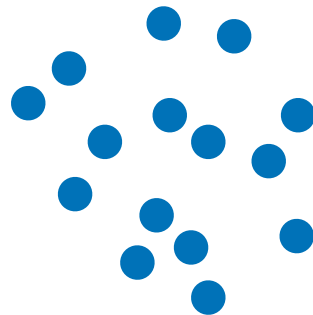
- Partitionnement : utilité d'un noeud pour l'application => niveau d'activité ?



# Rôle dans l'application

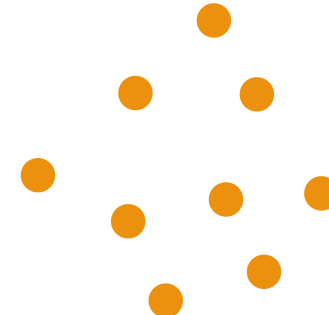
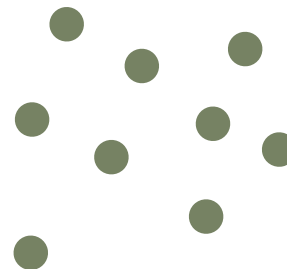
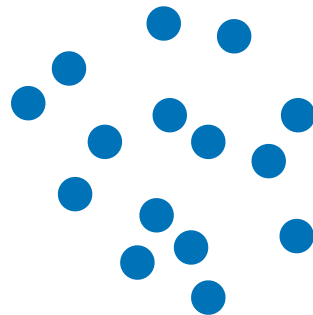
---

- Partitionnement : utilité d'un noeud pour l'application => niveau d'activité ?



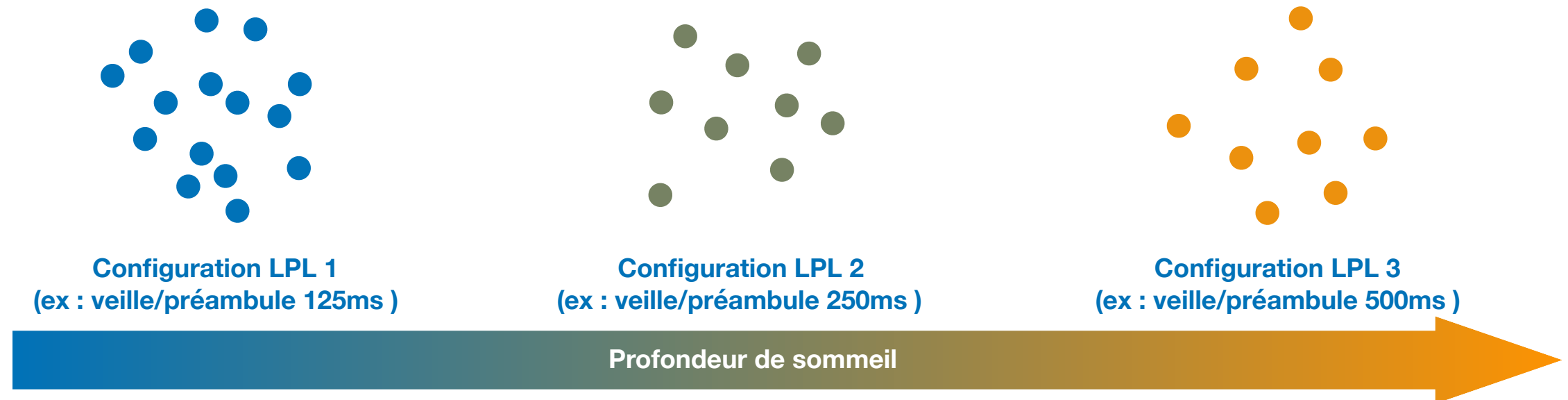
# Rôle dans l'application

- Partitionnement : utilité d'un noeud pour l'application => niveau d'activité ?



# Rôle dans l'application

- Partitionnement : utilité d'un noeud pour l'application => niveau d'activité ?



- Préambule noeud de couche  $n+1 >$  période de veille noeud de couche  $n$   
➔ Noeud de couche  $n$  peut communiquer avec noeud de couche  $m$  (où  $m < n$ )

# Rôle dans l'application

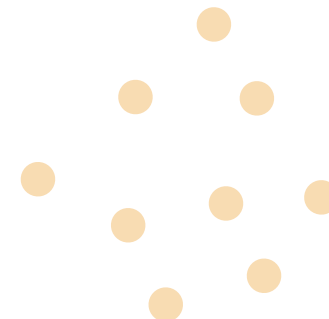
- Partitionnement : utilité d'un noeud pour l'application => niveau d'activité ?



Configuration LPL 1  
(ex : veille/préambule 125ms )



Configuration LPL 2  
(ex : veille/préambule 250ms )



Configuration LPL 3  
(ex : veille/préambule 500ms )

Profondeur de sommeil



**Critère de partitionnement**  
=  
**contrôle de densité**  
(après un temps d'attente,  
si x voisins à niveau i, alors niveau i++)

# Rôle dans l'application

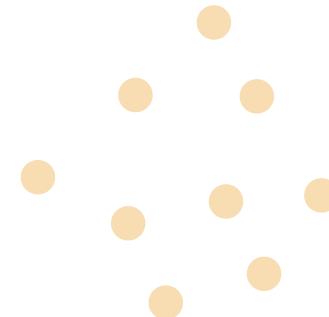
- Partitionnement : utilité d'un noeud pour l'application => niveau d'activité ?



Configuration LPL 1  
(ex : veille/préambule 125ms )

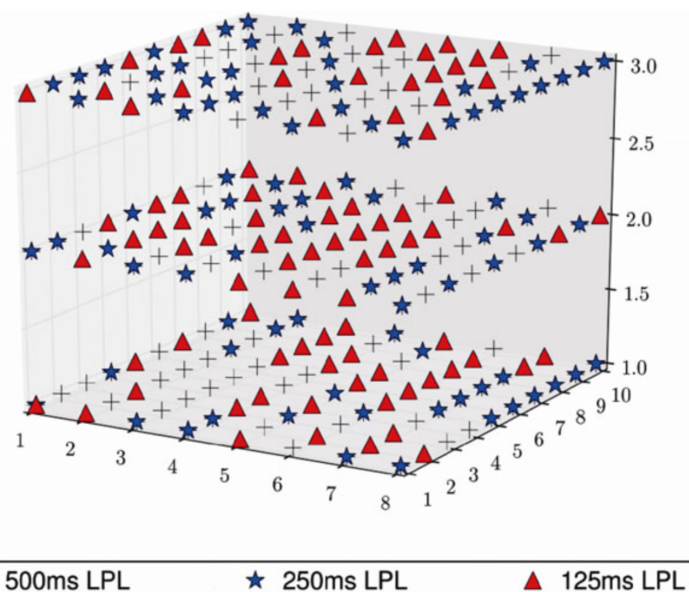


Configuration LPL 2  
(ex : veille/préambule 250ms )



Configuration LPL 3  
(ex : veille/préambule 500ms )

Profondeur de sommeil



**Critère de partitionnement**  
=  
**contrôle de densité**  
(après un temps d'attente,  
si x voisins à niveau i, alors niveau i++)

# Rôle dans l'application

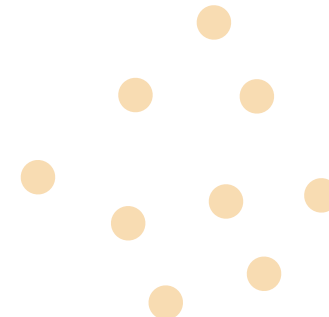
- Partitionnement : utilité d'un noeud pour l'application => niveau d'activité ?



Configuration LPL 1  
(ex : veille/préambule 125ms)

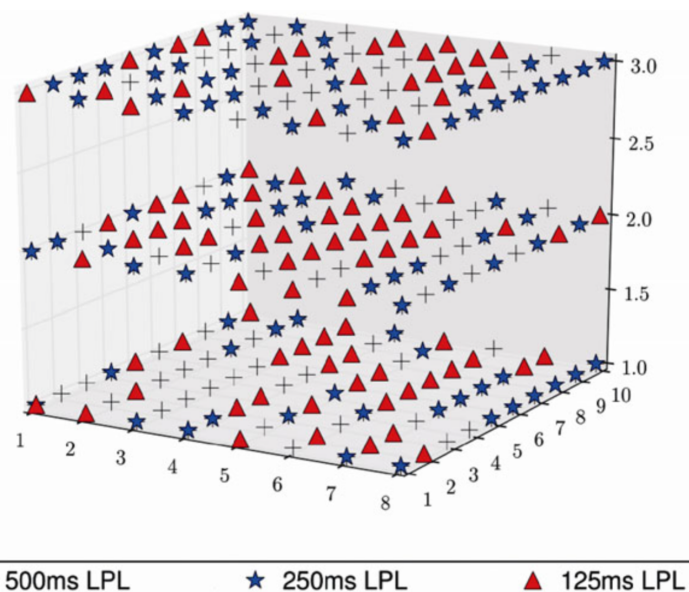


Configuration LPL 2  
(ex : veille/préambule 250ms)

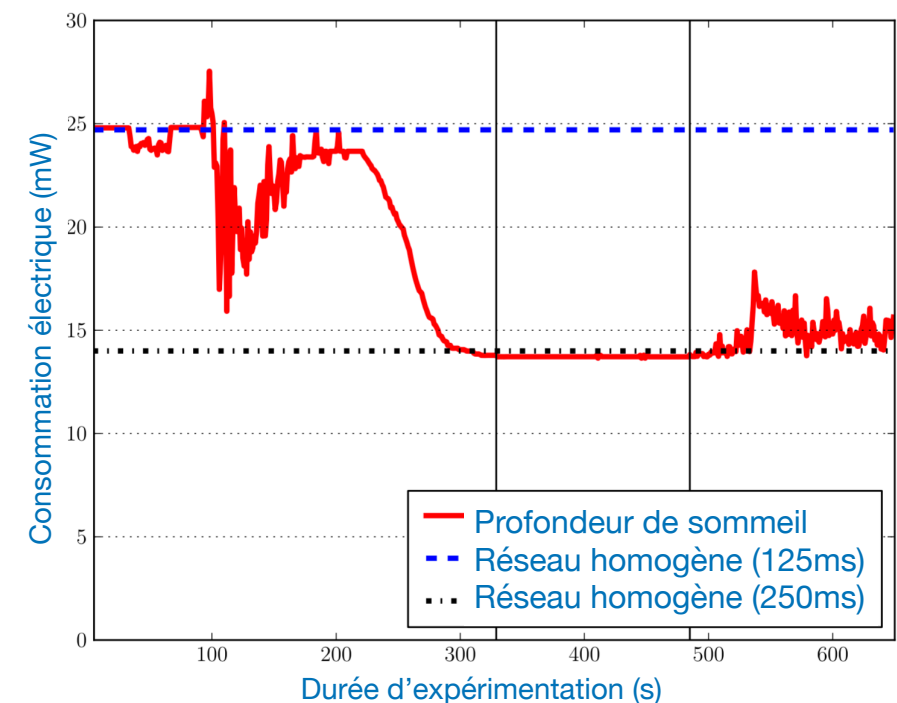


Configuration LPL 3  
(ex : veille/préambule 500ms)

Profondeur de sommeil



**Critère de partitionnement**  
=  
**contrôle de densité**  
(après un temps d'attente,  
si x voisins à niveau i, alors niveau i++)







# Auto-configuration des paramètres LPL

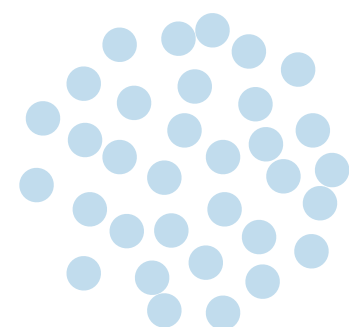
---

- **Configurations LPL hétérogènes selon**
  - le rôle joué dans la topologie (physique ou logique)
  - le rôle joué dans l'application
- **Décisions locales des noeuds, réseau global connecté**
- **LPL dans des scenarios dynamiques ?**
  - Trafic non anticipé
  - Topologie variable (mobilité, pannes)



- Efficacité énergétique et contrôle de l'accès au medium (MAC) ?
- Configurations hétérogènes des paramètres LPL ?
- **Adaptation des paramètres LPL face à la dynamique ?**
  - Trafic variable ?
  - Mobilité des objets ?
- Conclusions
- Travaux connexes
- Perspectives

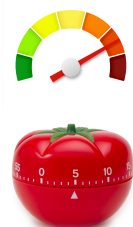
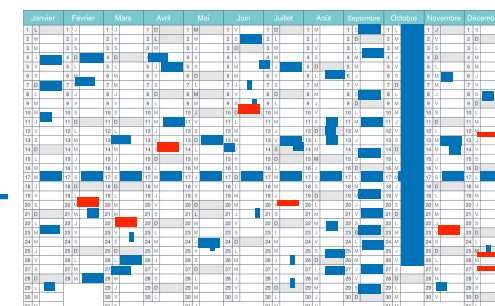
# Adaptation des paramètres LPL : trafic variable ?



Etat du réseau ?

Configuration  
des paramètres LPL

Caractéristiques  
de l'application ?





# Adapter les paramètres LPL

- **Application mixte : relevés réguliers et rafale de trafic (burst) si événement** 

- Période de veille longue : économies sur les récepteurs



- Préambule court : économies sur les émetteurs





# Adapter les paramètres LPL

- **Application mixte : relevés réguliers et rafale de trafic (burst) si événement** 

- Période de veille longue : économies sur les récepteurs



- Préambule court : économies sur les émetteurs



- **Proposition : Burst-oriented X-MAC (BOX-MAC)**

➡ Négociation de liens économes en énergie (EE) pour les communications



# Adapter les paramètres LPL

- **Application mixte : relevés réguliers et rafale de trafic (burst) si événement** 

- Période de veille longue : économies sur les récepteurs

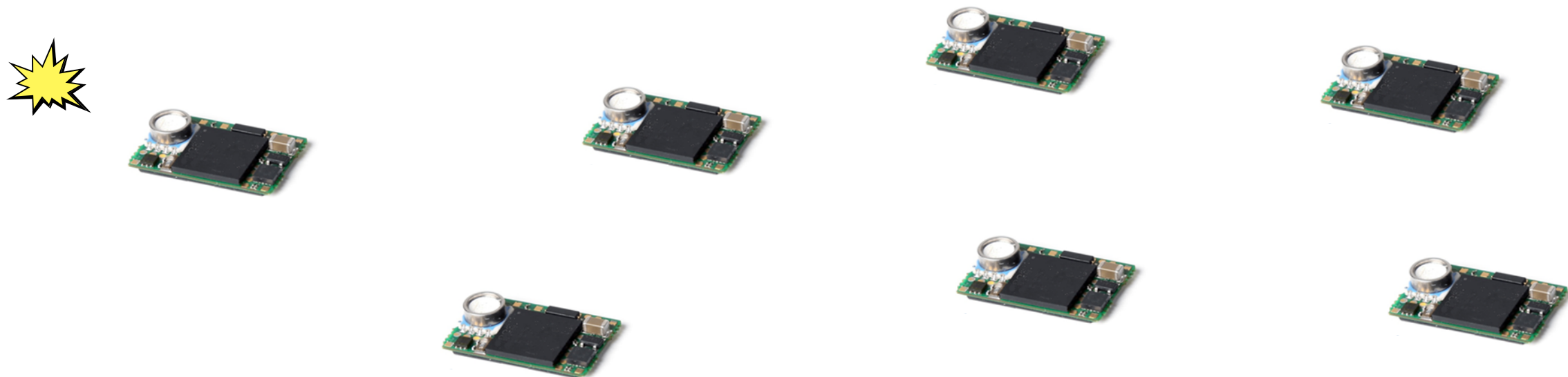


- Préambule court : économies sur les émetteurs



- **Proposition : Burst-oriented X-MAC (BOX-MAC)**

➔ Négociation de liens économes en énergie (EE) pour les communications





# Adapter les paramètres LPL

- **Application mixte : relevés réguliers et rafale de trafic (burst) si événement** 

- Période de veille longue : économies sur les récepteurs

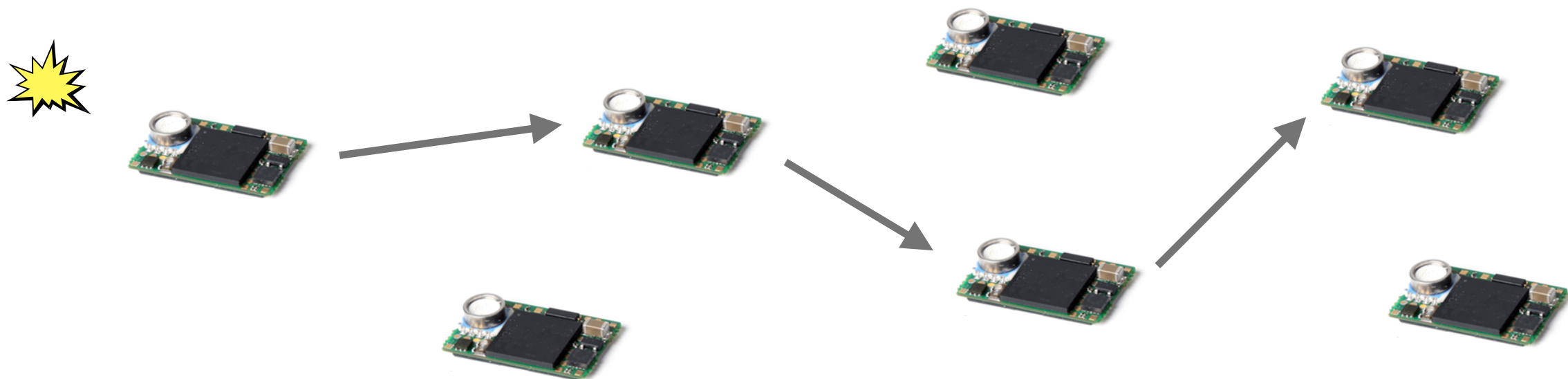


- Préambule court : économies sur les émetteurs



- **Proposition : Burst-oriented X-MAC (BOX-MAC)**

➔ Négociation de liens économes en énergie (EE) pour les communications





# Adapter les paramètres LPL

- **Application mixte : relevés réguliers et rafale de trafic (burst) si événement** 

- Période de veille longue : économies sur les récepteurs

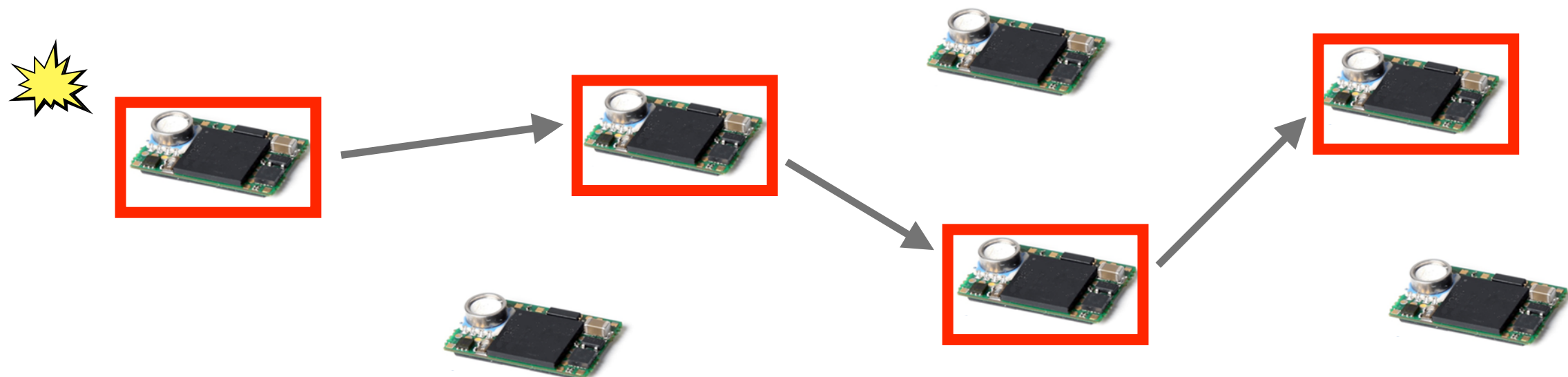


- Préambule court : économies sur les émetteurs



- **Proposition : Burst-oriented X-MAC (BOX-MAC)**

➔ Négociation de liens économes en énergie (EE) pour les communications



# Adapter les paramètres LPL

- **Application mixte : relevés réguliers et rafale de trafic (burst) si événement**

- Période de veille longue : économies sur les récepteurs

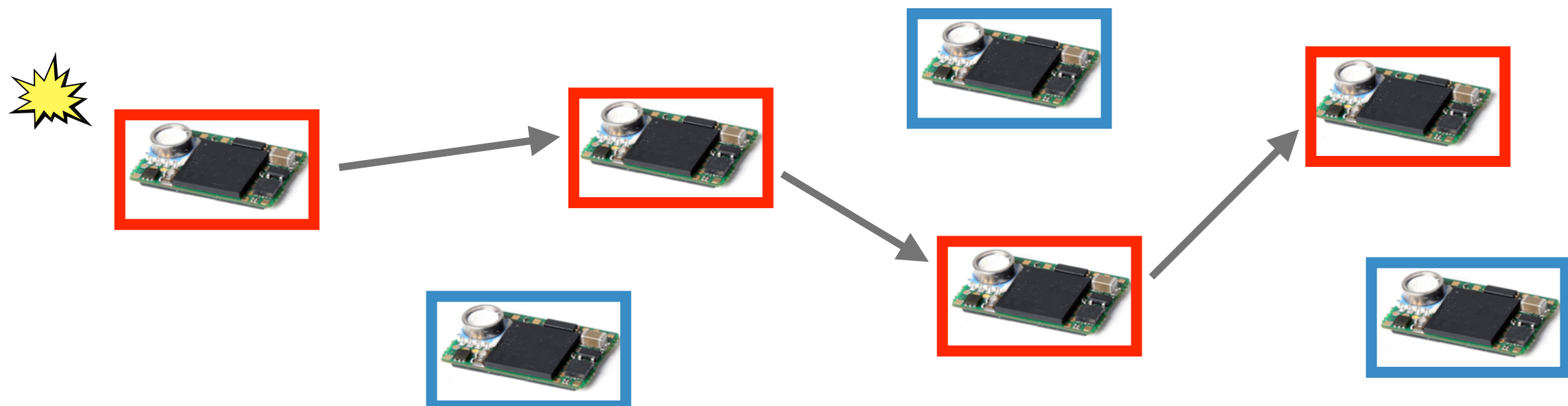


- Préambule court : économies sur les émetteurs



- **Proposition : Burst-oriented X-MAC (BOX-MAC)**

➡ Négociation de liens économes en énergie (EE) pour les communications







# Adapter les paramètres LPL

- **Application mixte : relevés réguliers et rafale de trafic (burst) si événement** 

- Période de veille longue : économies sur les récepteurs

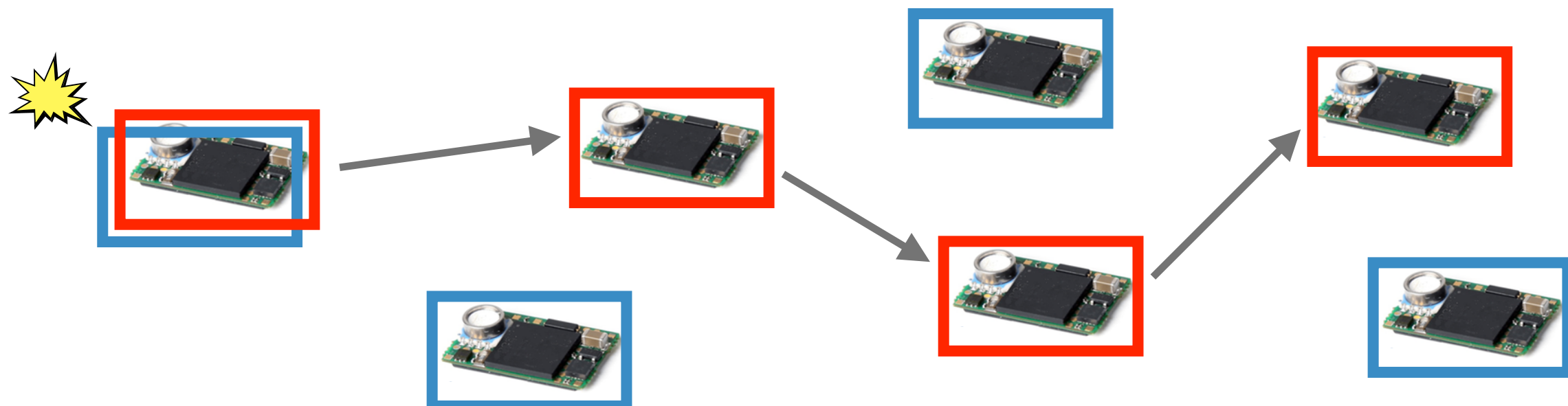


- Préambule court : économies sur les émetteurs



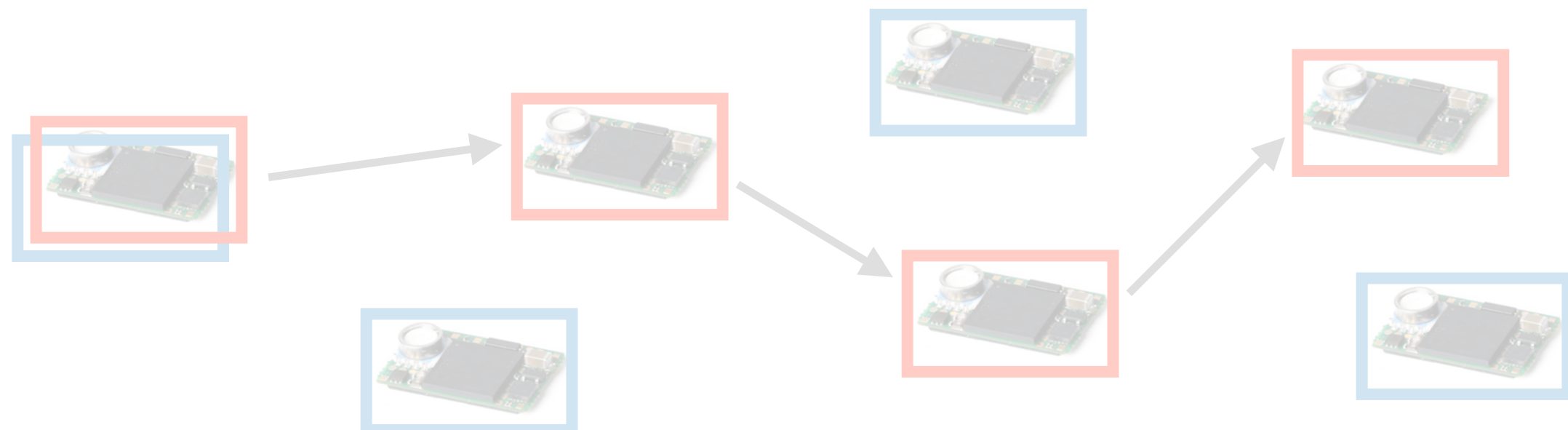
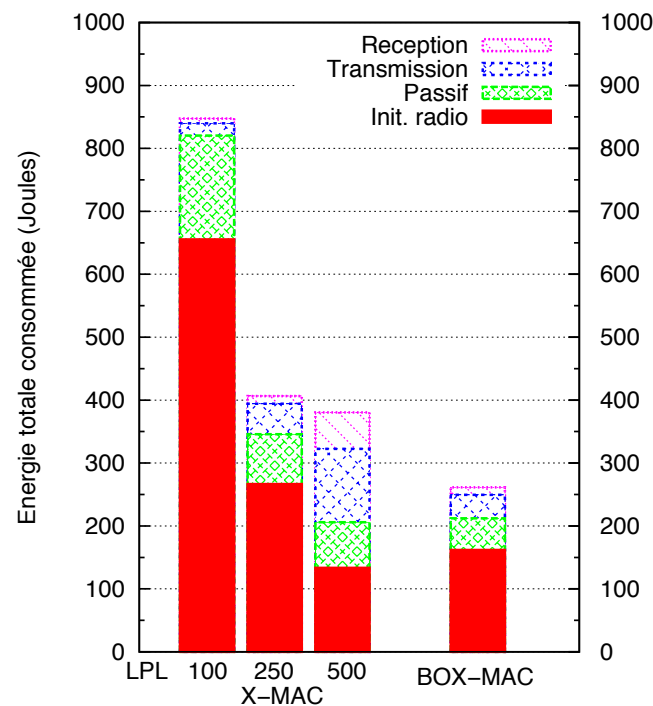
- **Proposition : Burst-oriented X-MAC (BOX-MAC)**

➔ Négociation de liens économes en énergie (EE) pour les communications

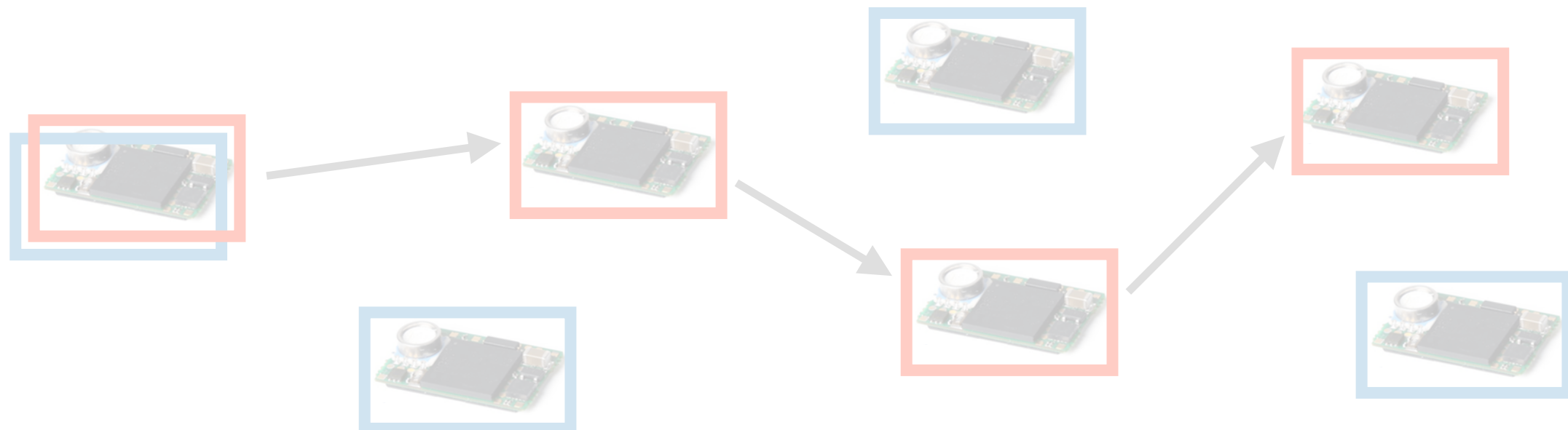
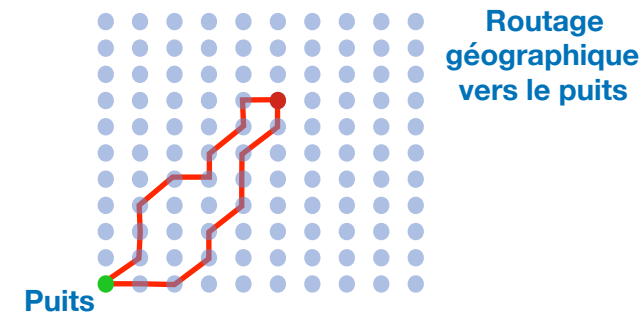
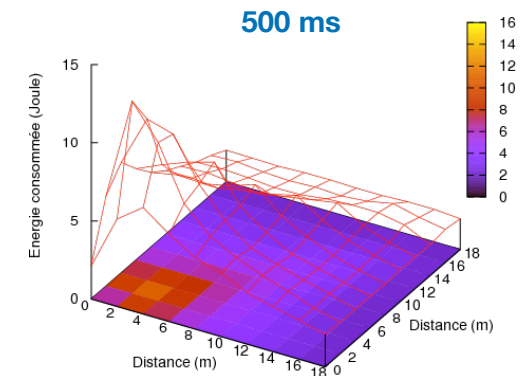
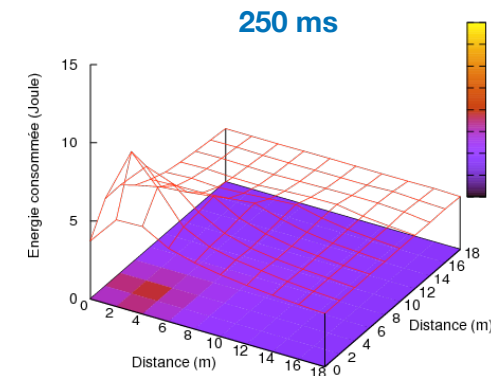
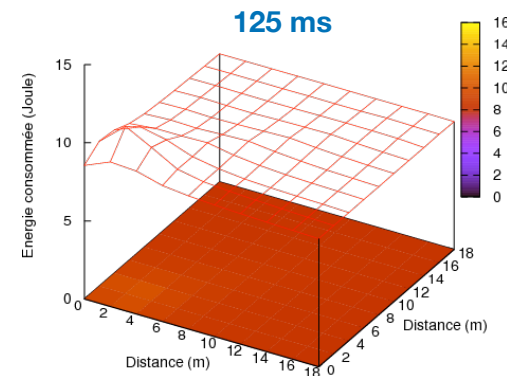
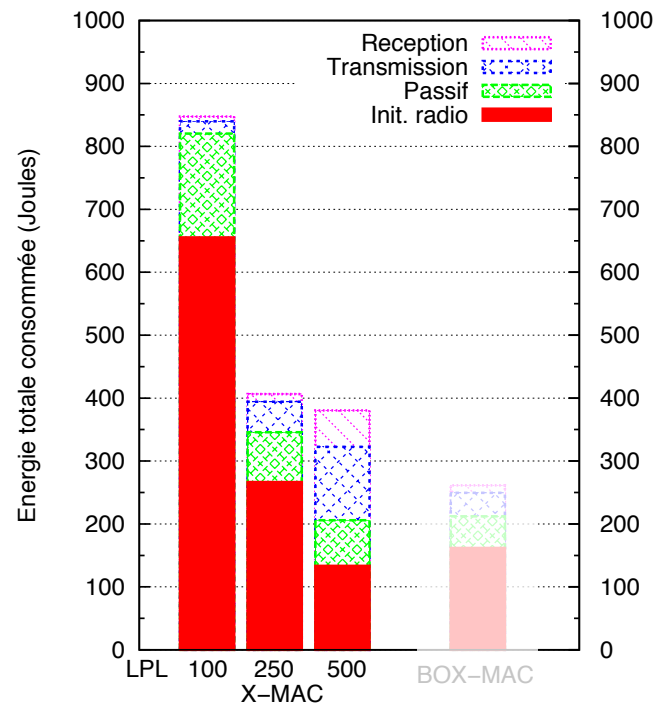




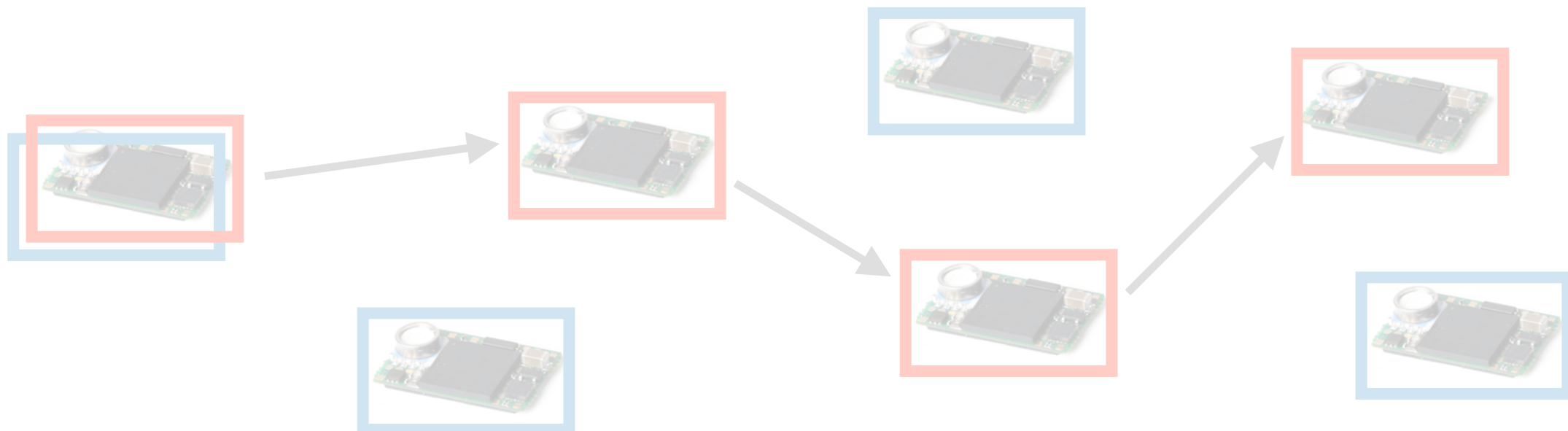
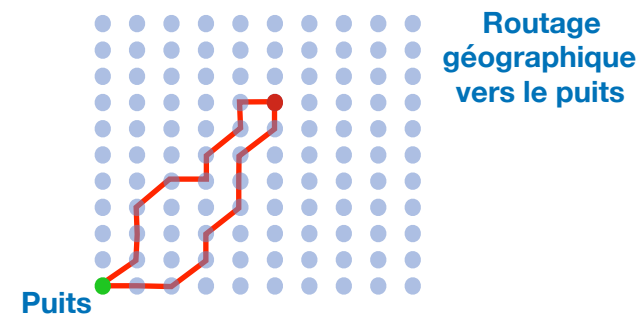
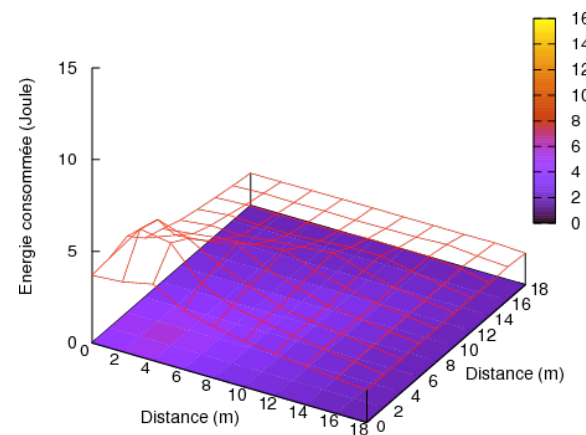
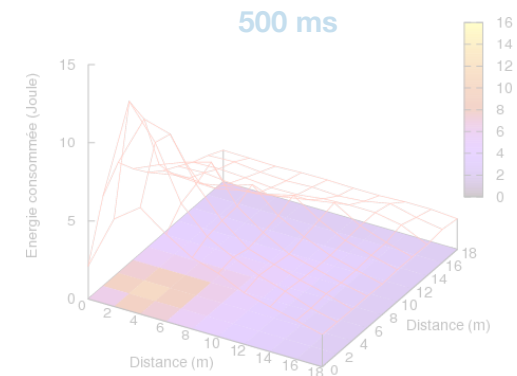
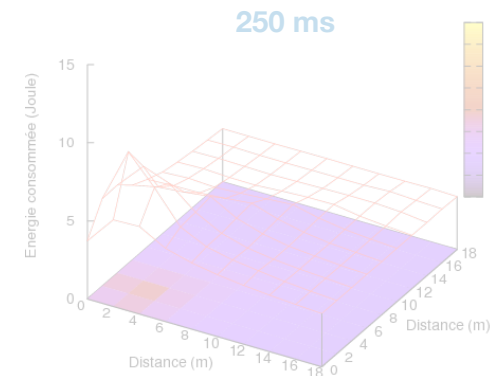
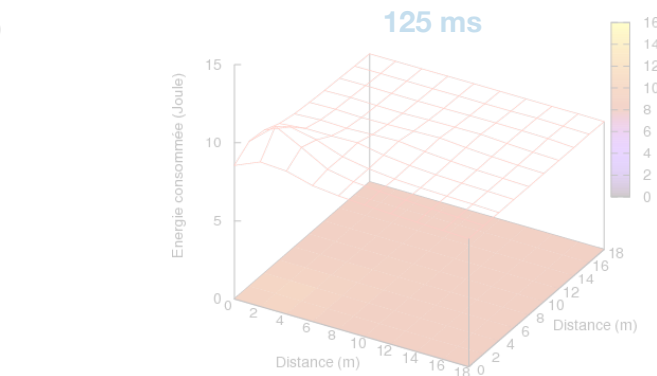
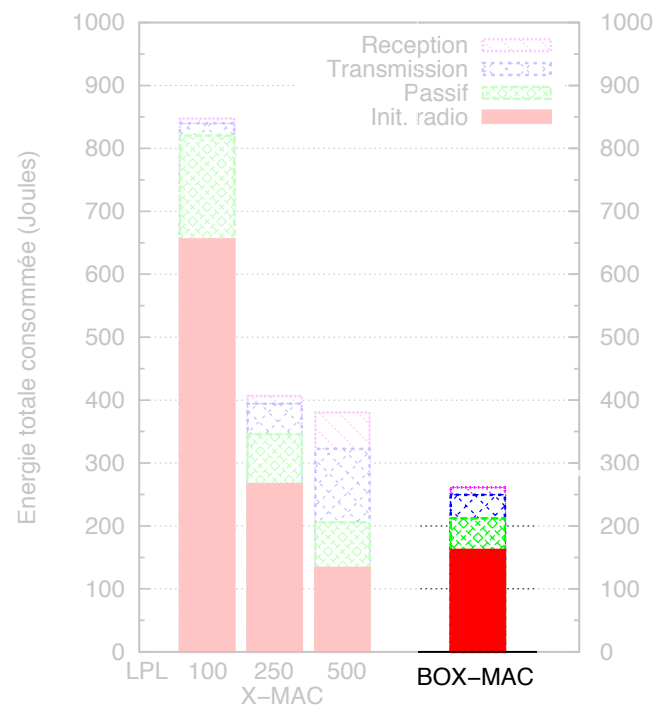
# Adapter les paramètres LPL



# Adapter les paramètres LPL



# Adapter les paramètres LPL

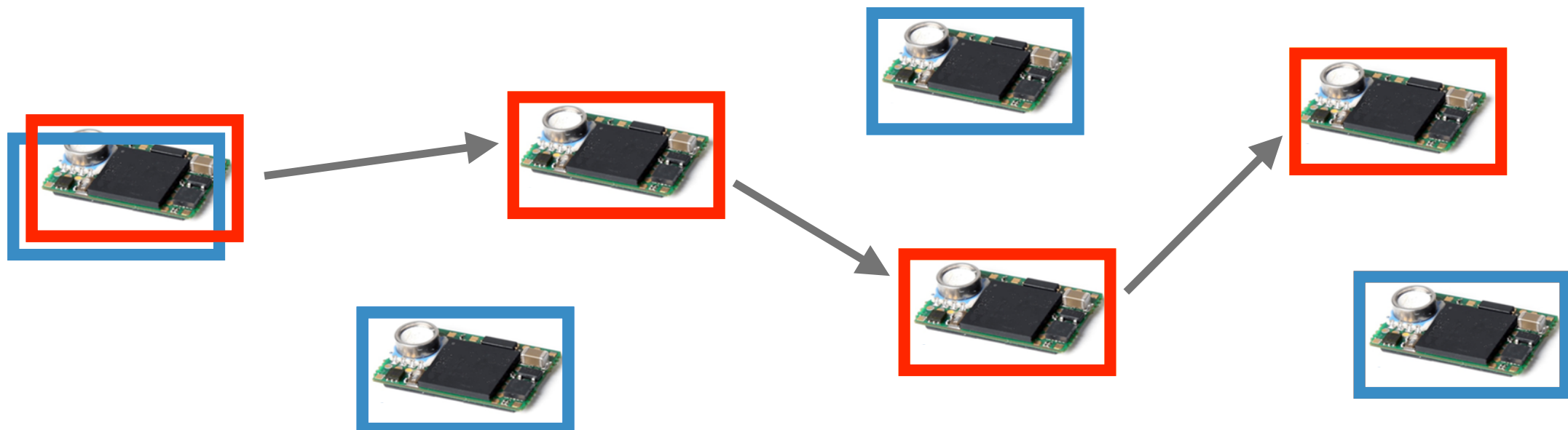




# Adapter les paramètres LPL

- **T-AAD: Traffic Auto-ADaptations**

- Extension de BOX-MAC
- Estimation de la durée envisagée d'une rafale de trafic
  - ➔ Pas de date limite fixée a priori pour la validité du lien EE

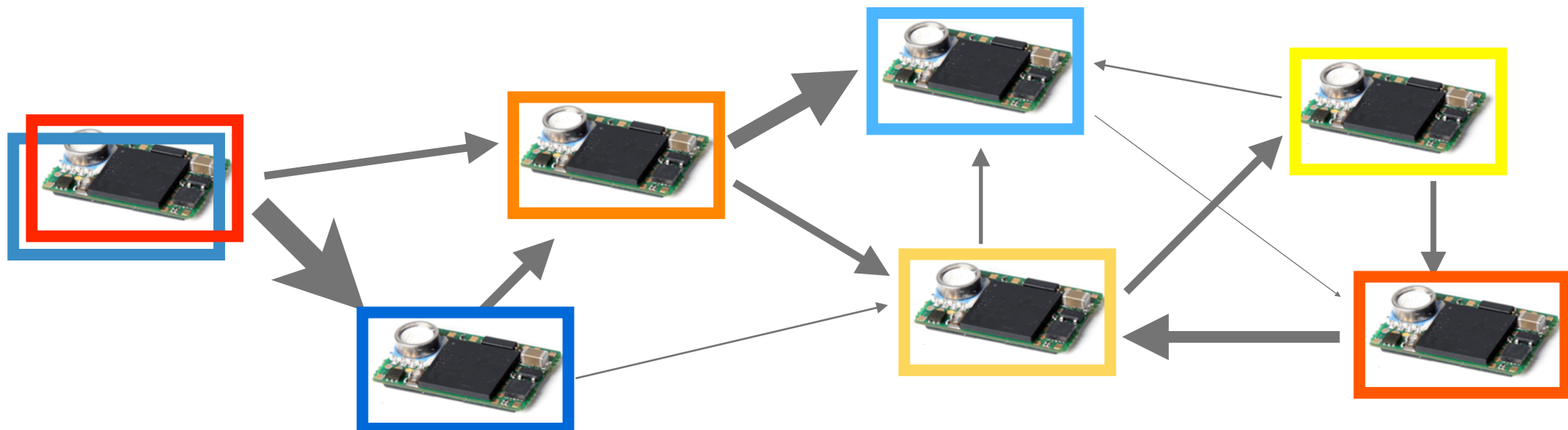




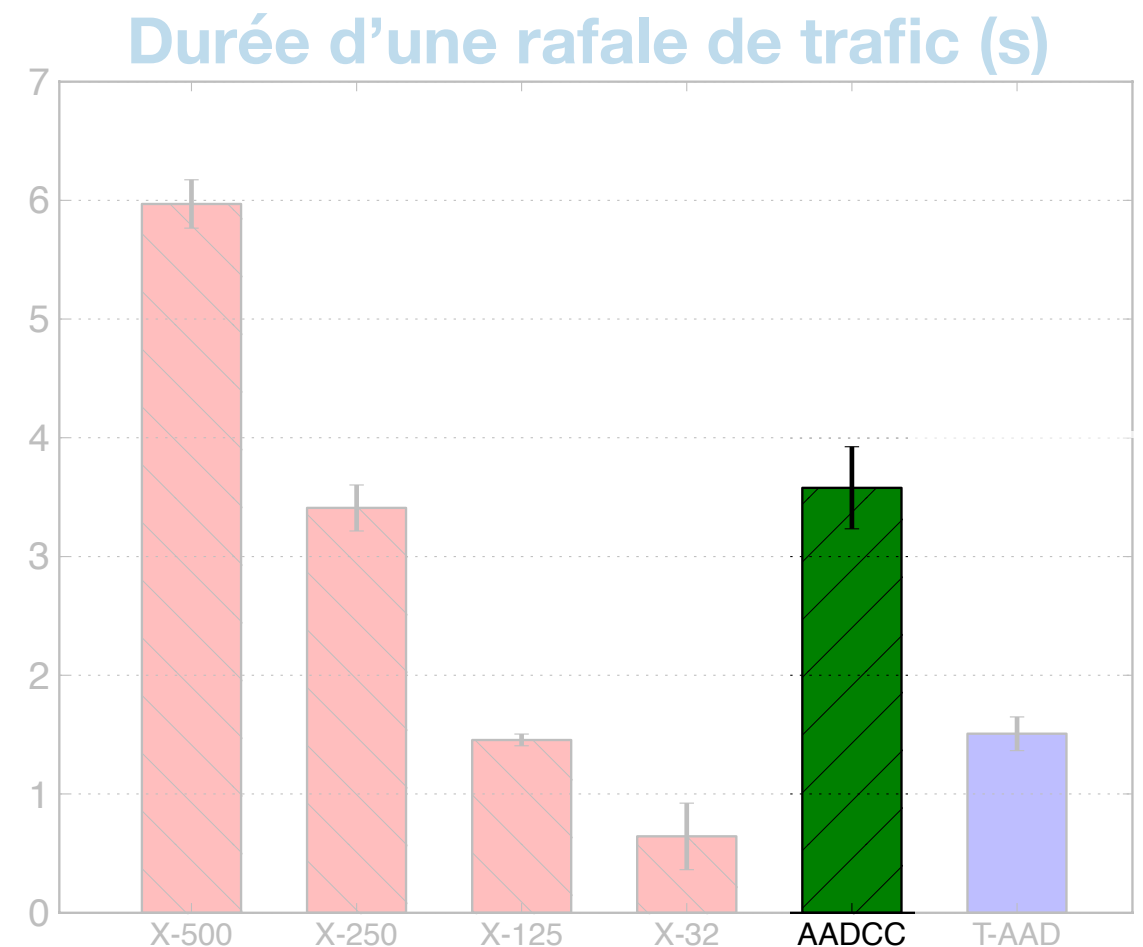
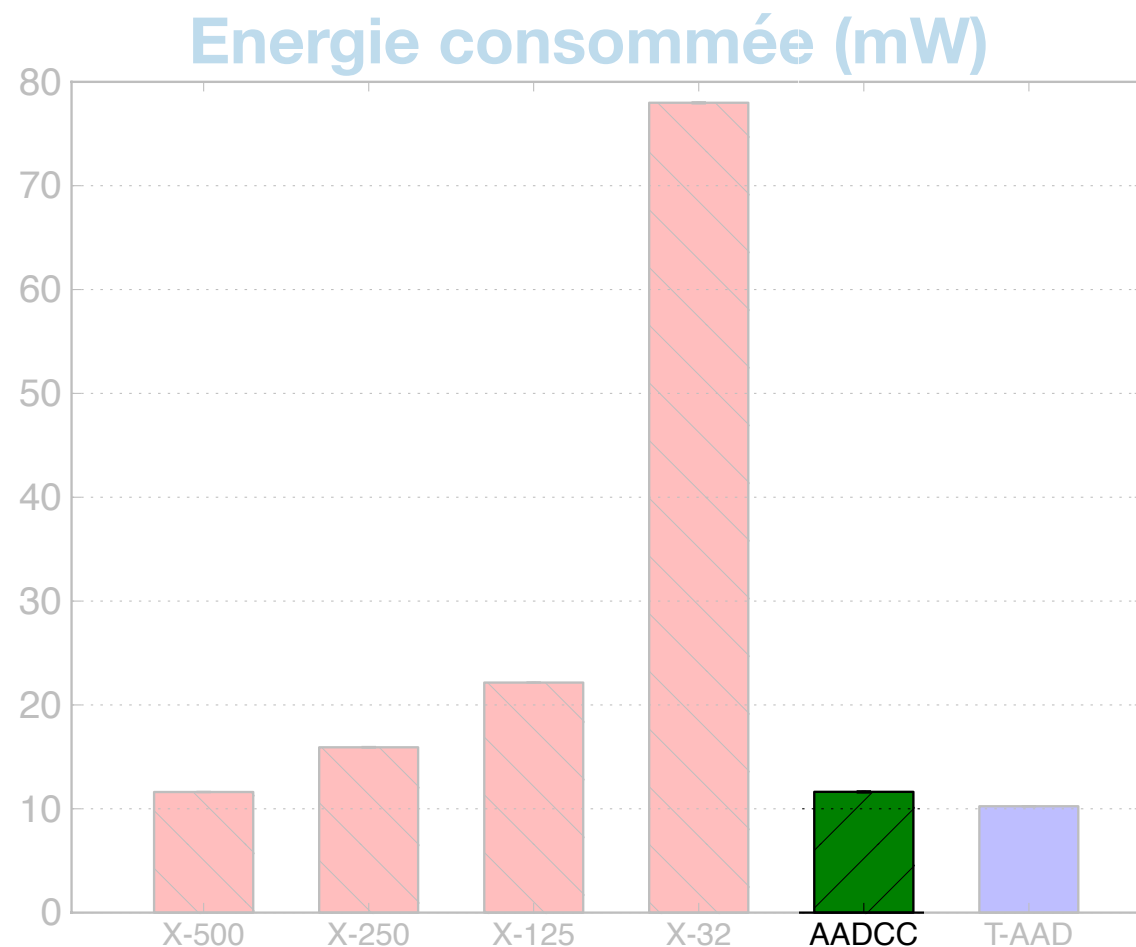
# Adapter les paramètres LPL

- **T-AAD: Traffic Auto-ADaptations**

- Extension de BOX-MAC
- Estimation de la durée envisagée d'une rafale de trafic
  - ➔ Pas de date limite fixée a priori pour la validité du lien EE



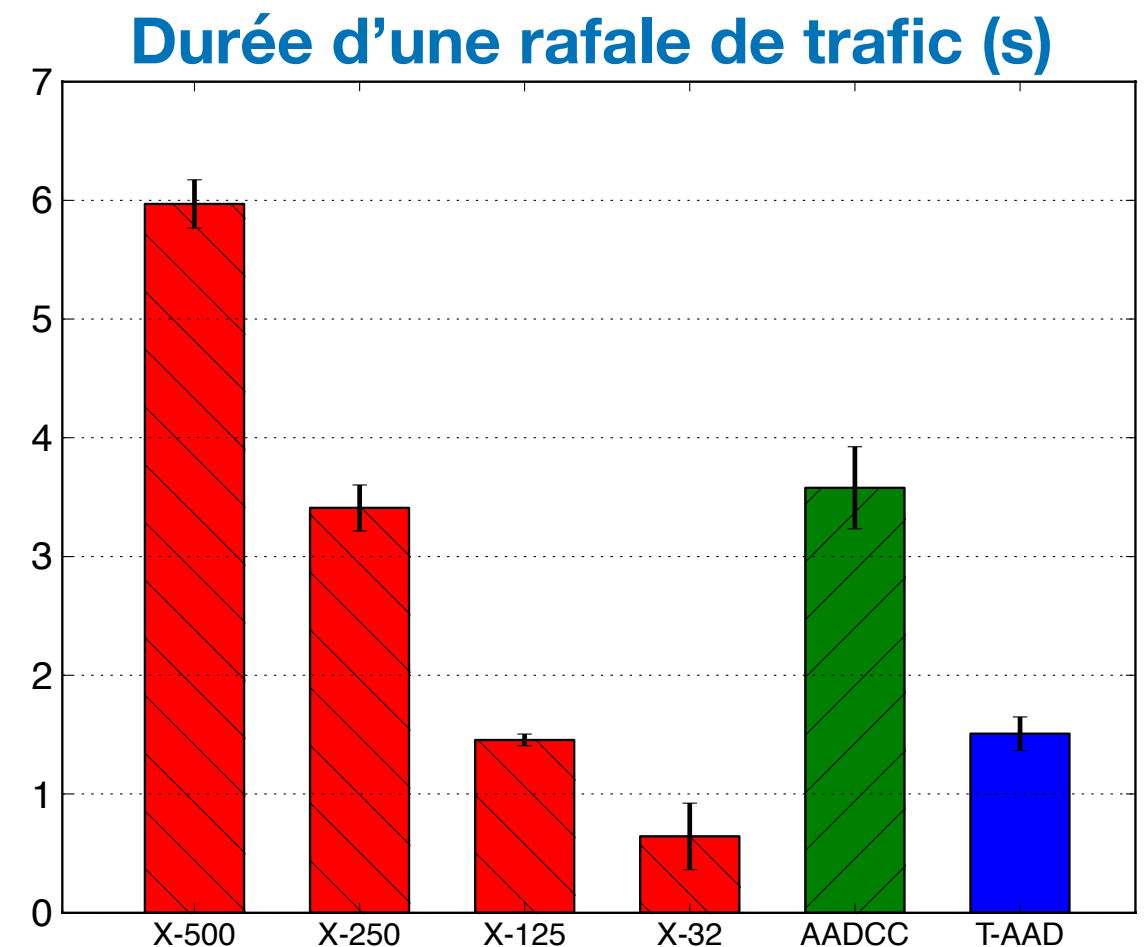
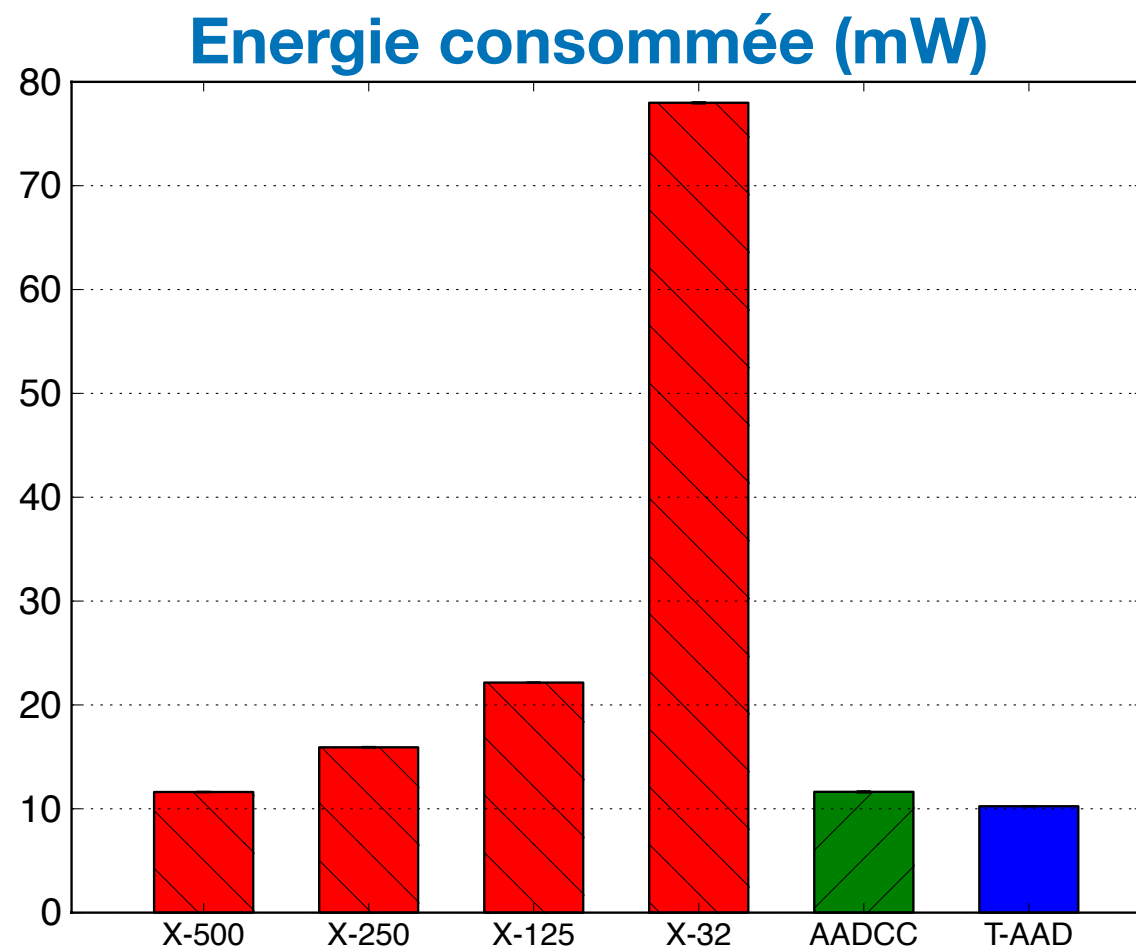
# Adapter les paramètres LPL



- **Asymmetric Additive Duty Cycle Control (AADCC)**
  - Période de veille en fonction du nombre de transmissions consécutives
  - +100ms pour 5 succès, -250ms à chaque échec

C. Merlin and W. Heinzelman. Duty Cycle Control for Low-Power-Listening MAC Protocols. IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 9, no. 11, pp. 1508 –1521, nov. 2010.

# Adapter les paramètres LPL



- **Compromis entre consommation d'énergie et délai**
  - T-AAD plus réactif ( $\neq$  valeurs fixes de AADCC)
  - Décisions localisées sans perte de connectivité

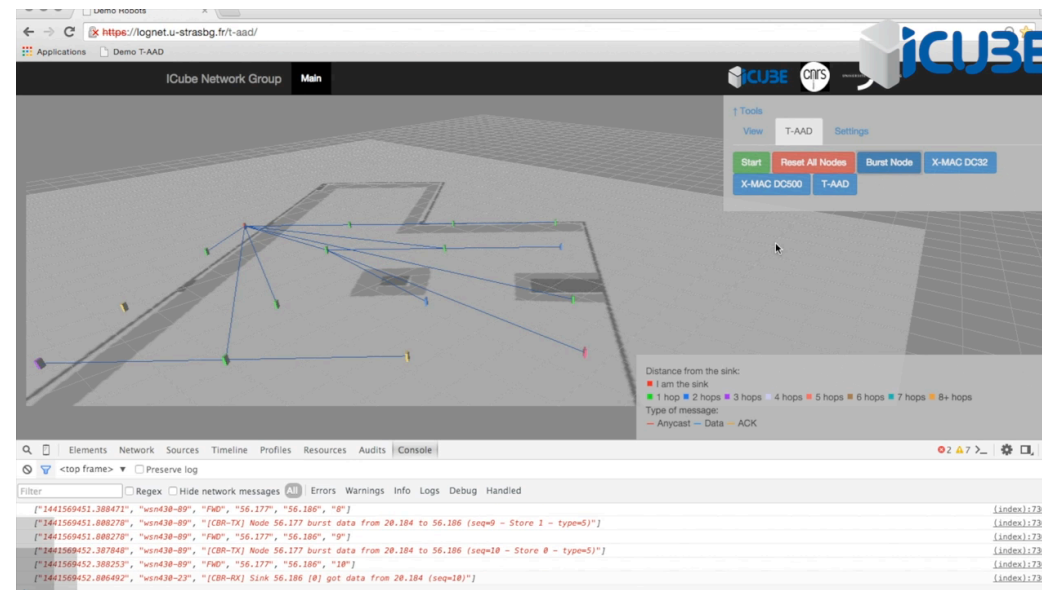
C. Merlin and W. Heinzelman. Duty Cycle Control for Low-Power-Listening MAC Protocols. IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 9, no. 11, pp. 1508 –1521, nov. 2010.





# Auto-adaptation des paramètres LPL

- Evolution des paramètres LPL face à la dynamique du trafic applicatif
  - Décisions localisées...
  - ...effectuées en fonction du trafic...
  - ...avec garantie de connectivité de la topologie (logique)...
  - ...et compromis énergie/délai.



@ G. Schreiner

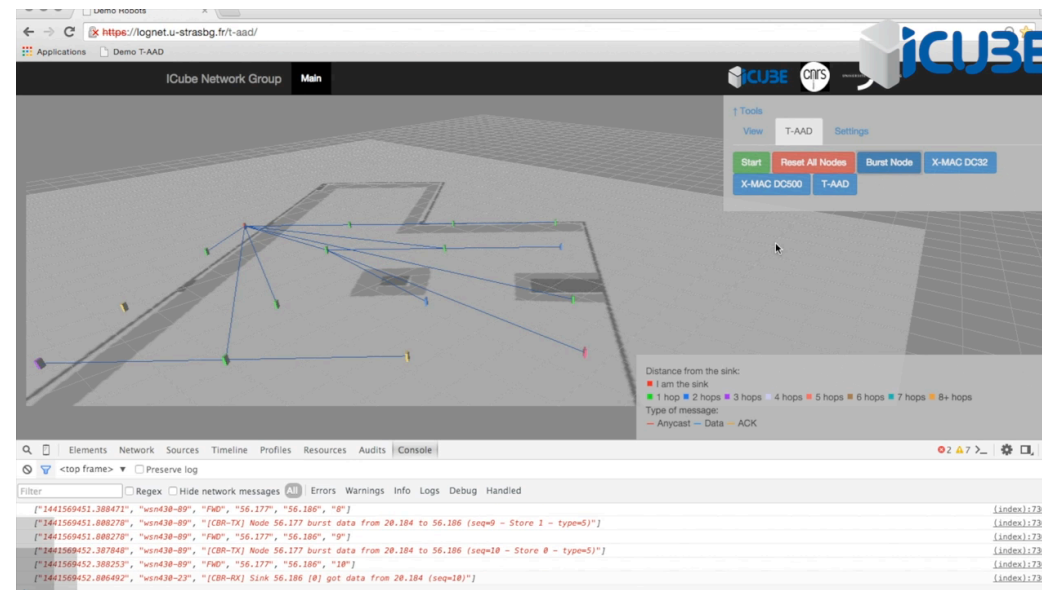
G. Z. Papadopoulos, A. Gallais, G. Schreiner and T. Noël.  
Live Adaptations of Low-power MAC Protocols.  
Demo at ACM MobiCom'15 - Paris, France, Sept. 2015.





# Auto-adaptation des paramètres LPL

- **Evolution des paramètres LPL face à la dynamique du trafic applicatif**
  - Décisions localisées...
  - ...effectuées en fonction du trafic...
  - ...avec garantie de connectivité de la topologie (logique)...
  - ...et compromis énergie/délai.

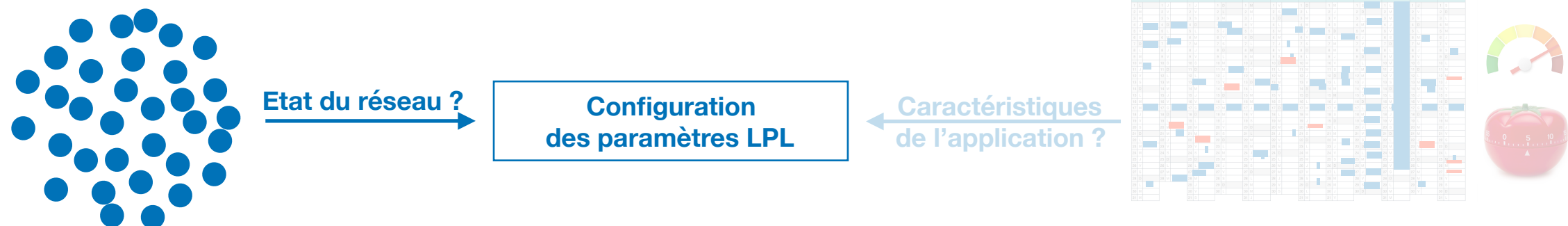


@ G. Schreiner

G. Z. Papadopoulos, A. Gallais, G. Schreiner and T. Noël.  
Live Adaptations of Low-power MAC Protocols.  
Demo at ACM MobiCom'15 - Paris, France, Sept. 2015.

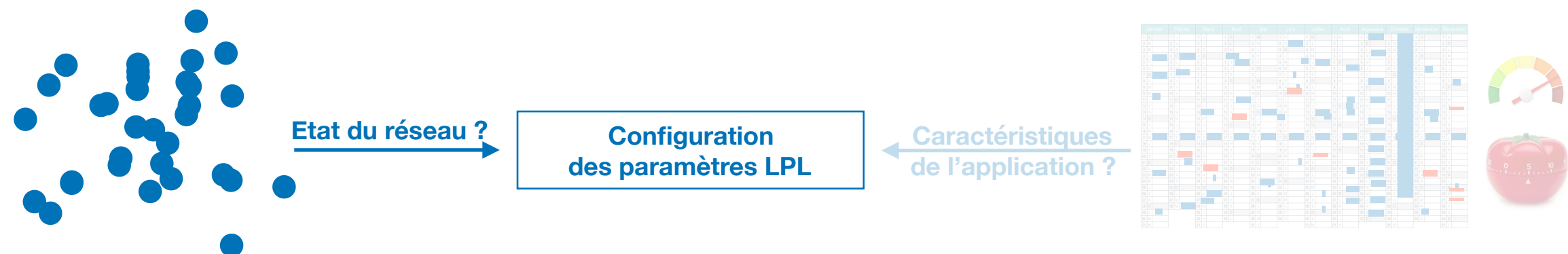
- Efficacité énergétique et contrôle de l'accès au medium (MAC) ?
  - Configurations hétérogènes des paramètres LPL ?
  - Adaptation des paramètres LPL face à la dynamique ?
    - Trafic variable ?
    - Mobilité des objets ?
  - Conclusions
  - Travaux connexes
  - Perspectives
- 

## Adaptation des paramètres LPL : mobilité ?



- Efficacité énergétique et contrôle de l'accès au medium (MAC) ?
  - Configurations hétérogènes des paramètres LPL ?
  - **Adaptation des paramètres LPL face à la dynamique ?**
    - Trafic variable ?
    - Mobilité des objets ?
  - Conclusions
  - Travaux connexes
  - Perspectives
- 

## Adaptation des paramètres LPL : mobilité ?





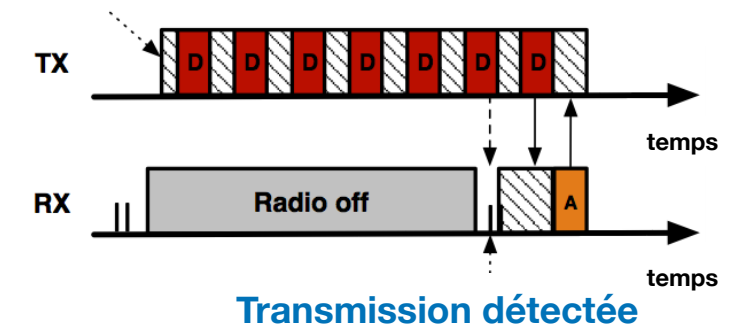
# Communications des noeuds mobiles ?

- **ContikiMAC (ContikiOS)**

- Intégration de nombreuses fonctionnalités
- Transmissions depuis les noeuds mobiles ?
  - Unicast : prochain saut inconnu
  - Broadcast : coûteux

A. Dunkels, "The **ContikiMAC** Radio Duty Cycling Protocol,"  
Swedish Institute of Computer Science Technical report T2011:13, 2011.

Données émises jusqu'à ACK



- || Echantillonnage
- ▨ Fenêtre réception
- D Paquet de données
- A Acquittement



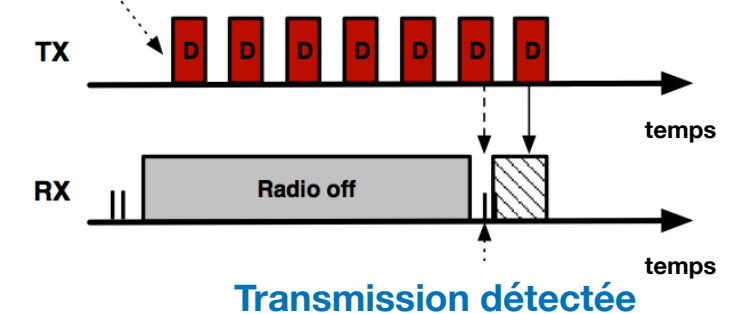
# Communications des noeuds mobiles ?

- **ContikiMAC (ContikiOS)**

- Intégration de nombreuses fonctionnalités
- Transmissions depuis les noeuds mobiles ?
  - Unicast : prochain saut inconnu
  - Broadcast : coûteux

A. Dunkels, "The **ContikiMAC** Radio Duty Cycling Protocol,"  
Swedish Institute of Computer Science Technical report T2011:13, 2011.

Données émises pendant toute la période



- || Echantillonnage
- ▨ Fenêtre réception
- D Paquet de données
- A Acquittement



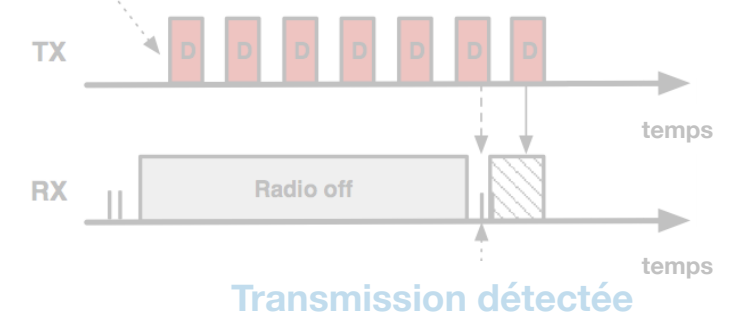
# Communications des noeuds mobiles ?

- **ContikiMAC (ContikiOS)**

- Intégration de nombreuses fonctionnalités
- Transmissions depuis les noeuds mobiles ?
  - Unicast : prochain saut inconnu
  - Broadcast : coûteux

A. Dunkels, "The **ContikiMAC** Radio Duty Cycling Protocol,"  
Swedish Institute of Computer Science Technical report T2011:13, 2011.

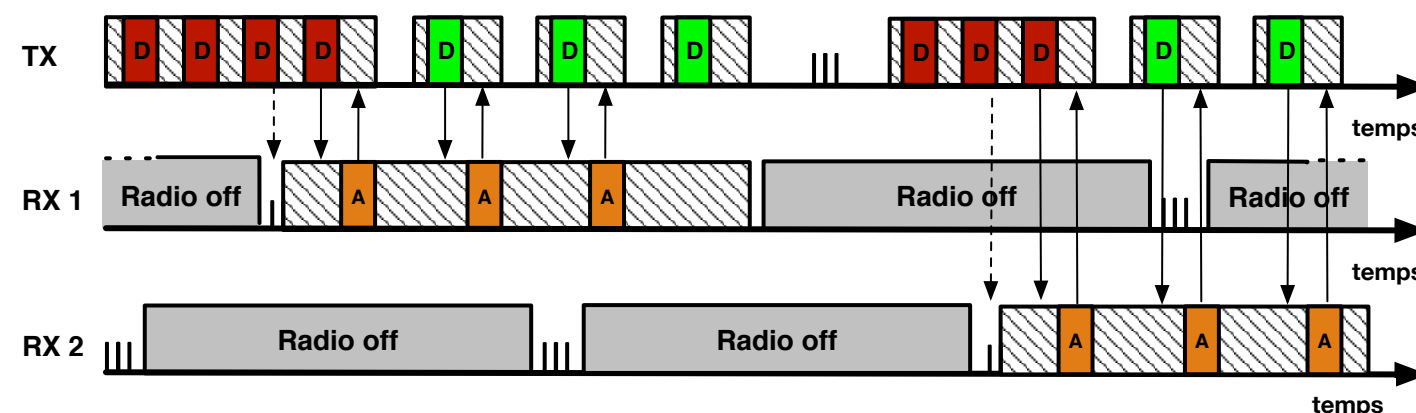
Données émises pendant toute la période



- || Echantillonnage
- ▨ Fenêtre réception
- D Paquet de données en anycast
- A Acquittement
- D Paquet de données en unicast

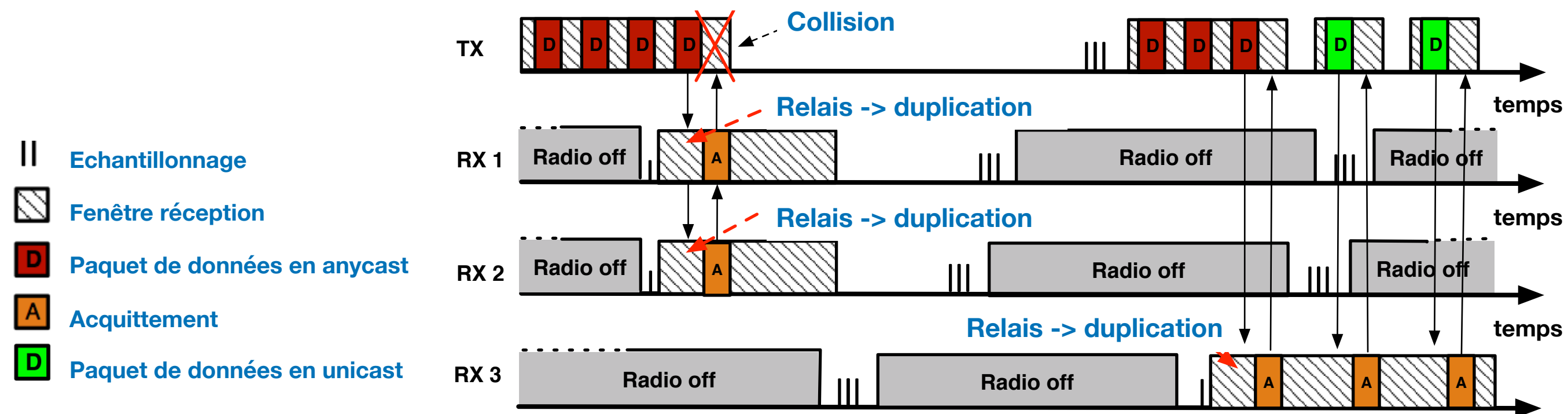
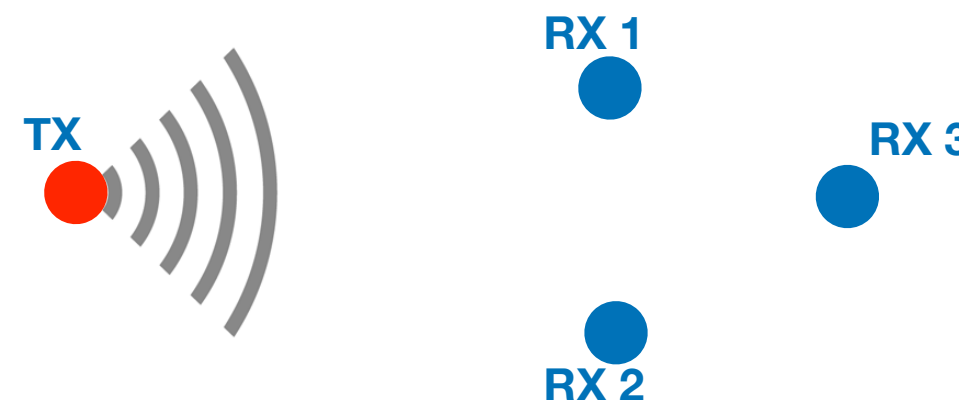
- **M-ContikiMAC**

- Anycast
- Reprise sur perte de prochain saut
  - RX1 → RX2



# Données dupliquées ?

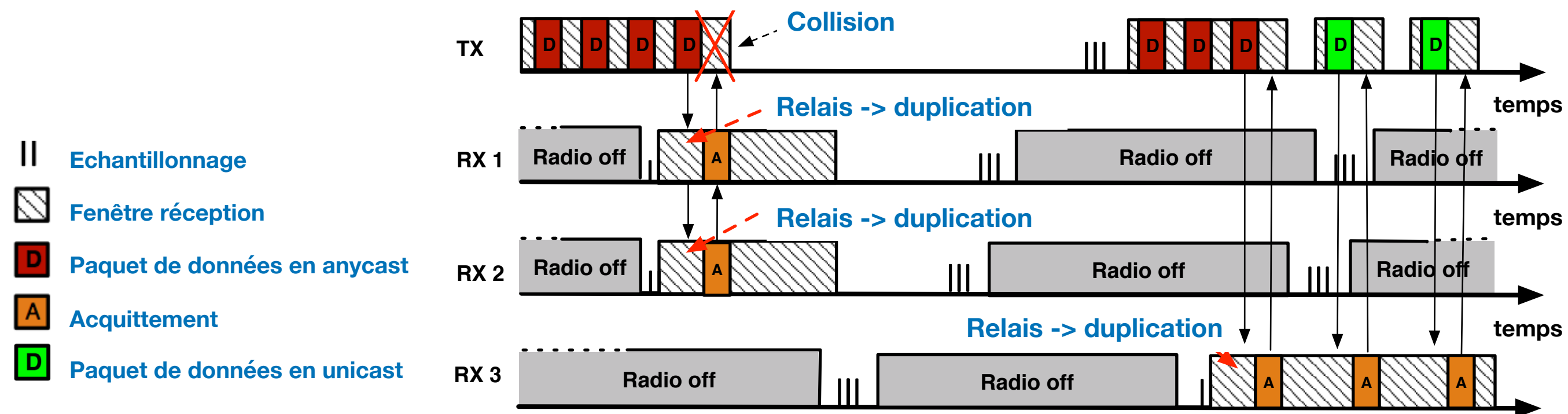
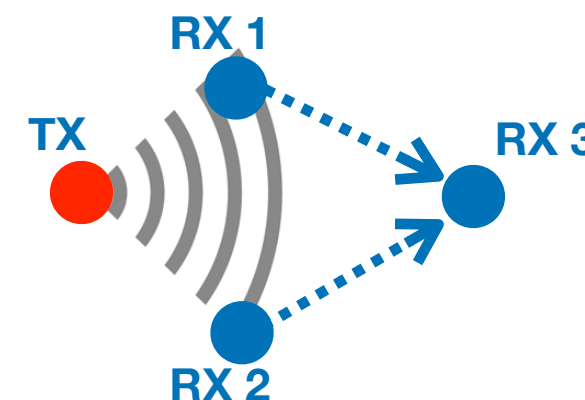
- Plus probables lorsque
  - Réseau dense et réactif
  - ➔ Echantillonnages nombreux et fréquents





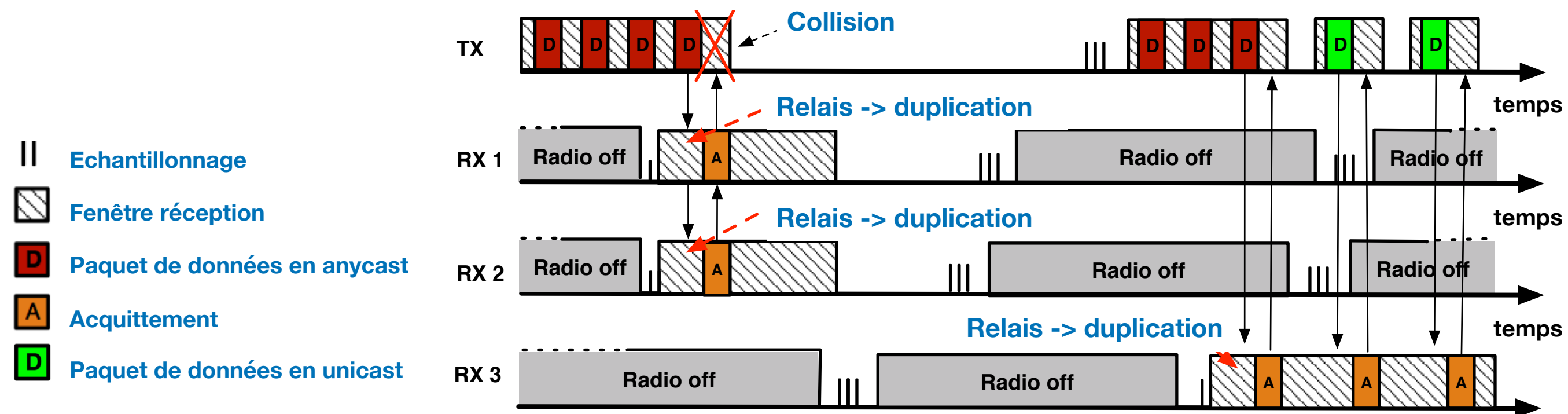
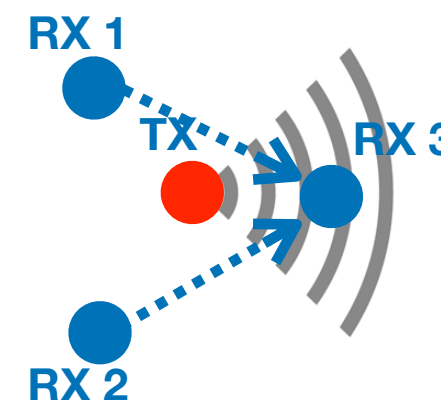
# Données dupliquées ?

- Plus probables lorsque
  - Réseau dense et réactif
  - ➔ Echantillonnages nombreux et fréquents



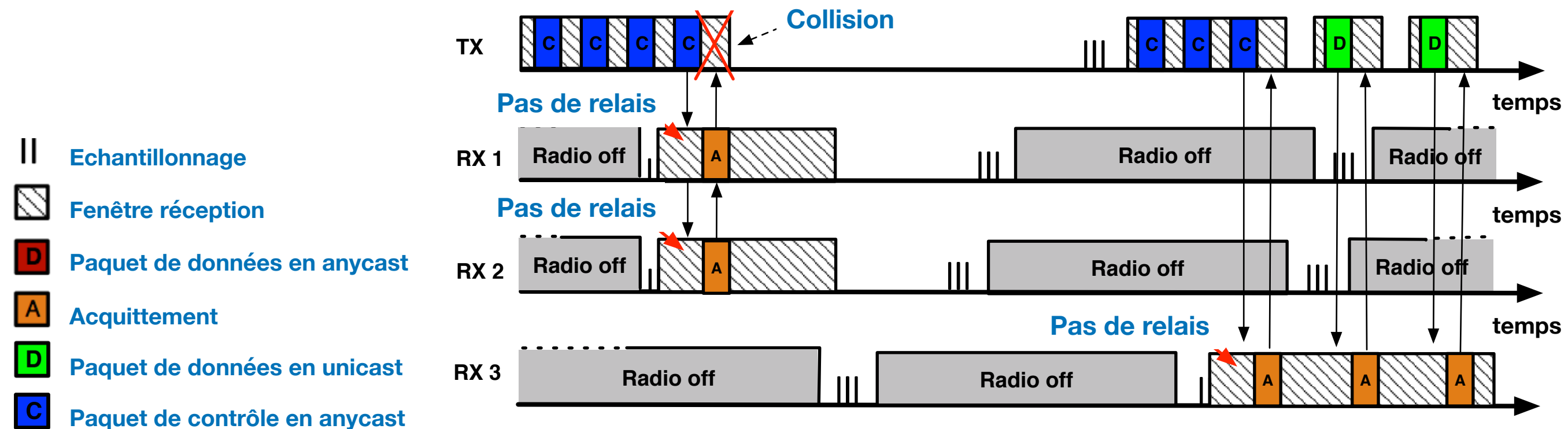
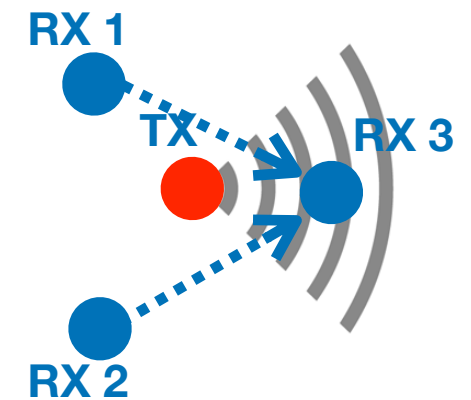
# Données dupliquées ?

- Plus probables lorsque
  - Réseau dense et réactif
- ➔ Echantillonnages nombreux et fréquents



# Données dupliquées ?

- **Plus probables lorsque**
  - Réseau dense et réactif
  - ➔ Echantillonnages nombreux et fréquents
- **ME-ContikiMAC**
  - Paquets de contrôle en préambule (non relayés)



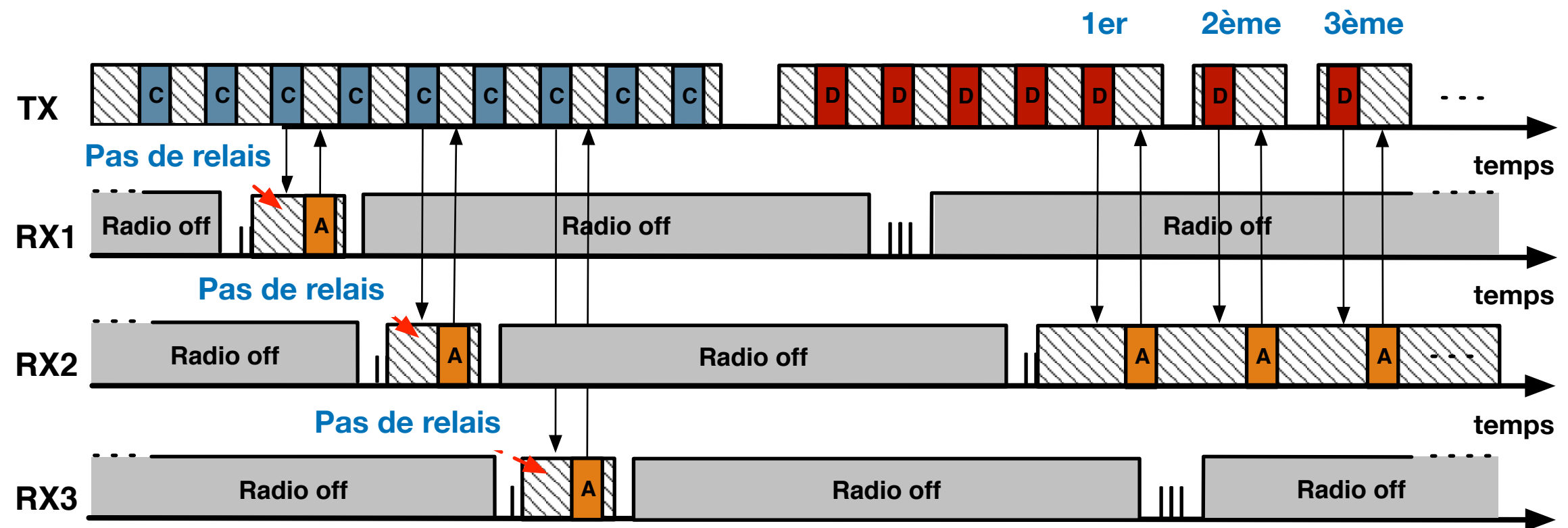
# Découverte du voisinage

---

- **Mobilité : trouver un voisin (de qualité) rapidement ?**
- **MobiDisc**
  - Limiter les changements de prochain saut (i.e., choix du “meilleur”)

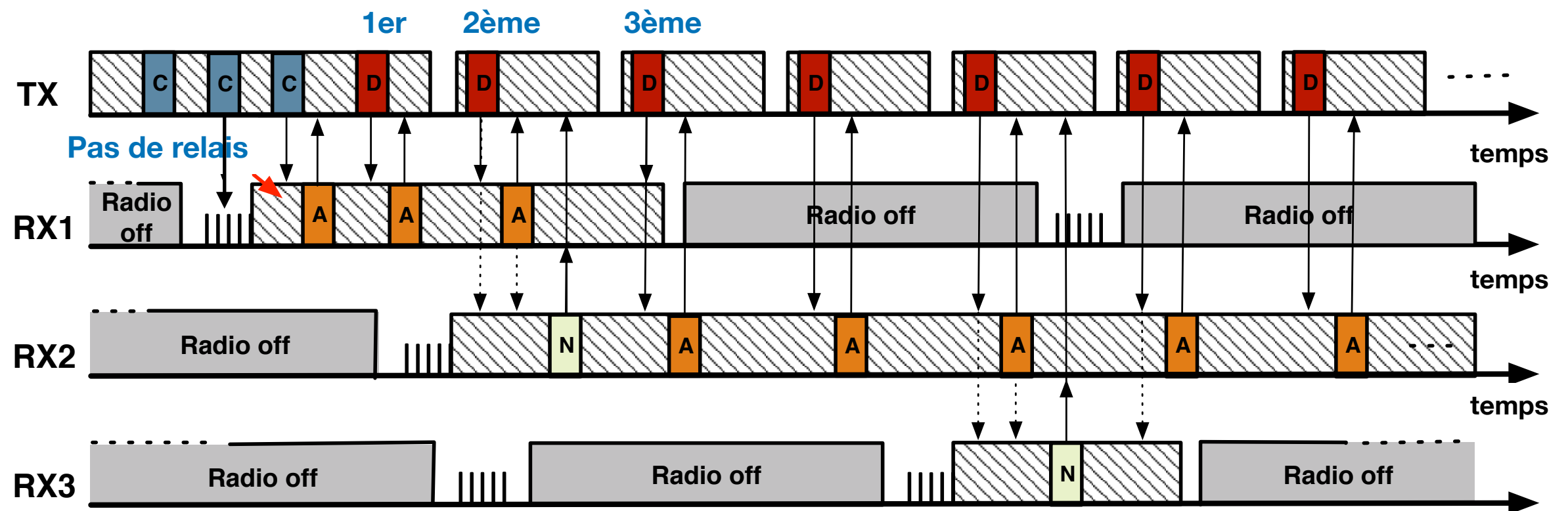
# Découverte du voisinage

- **Mobilité** : trouver un voisin (de qualité) rapidement ?
- **MobiDisc**
  - Limiter les changements de prochain saut (i.e., choix du “meilleur”)

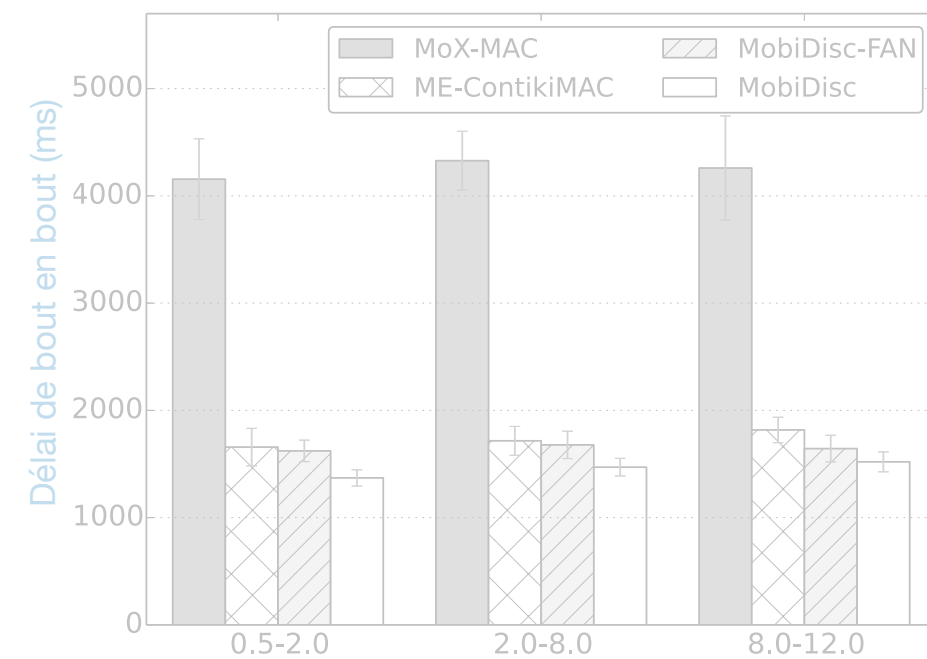
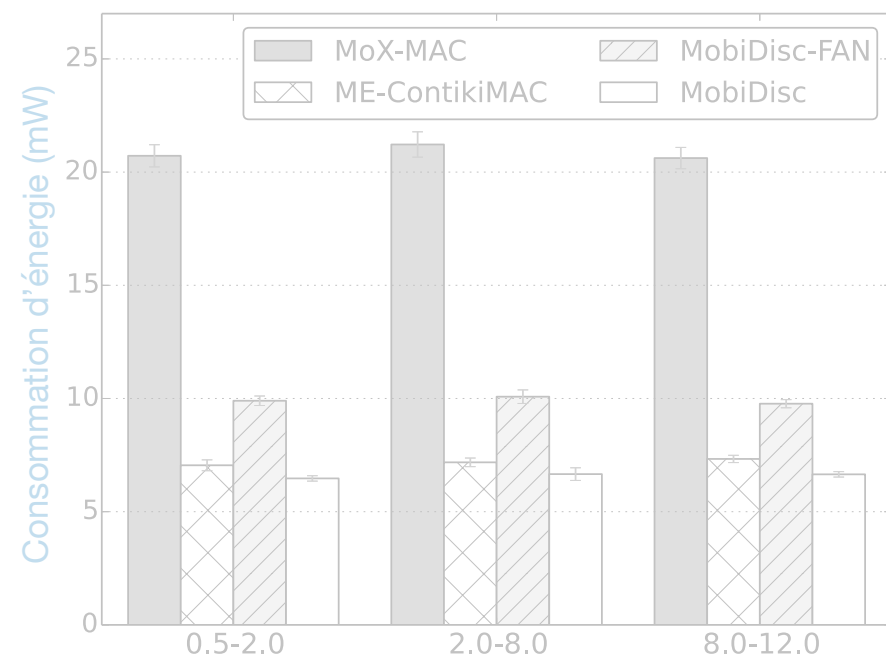
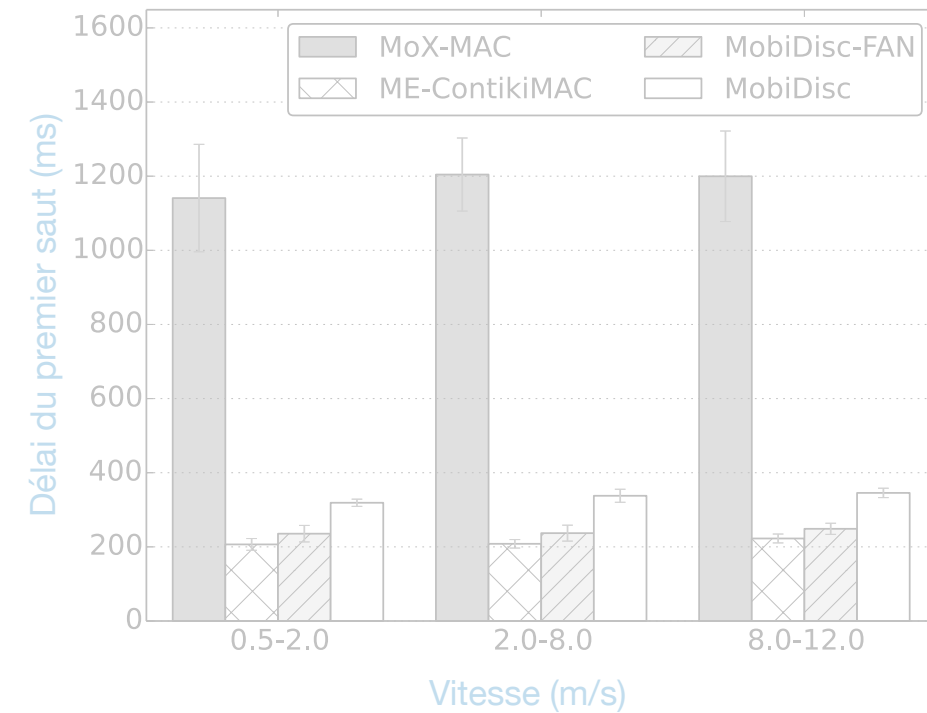
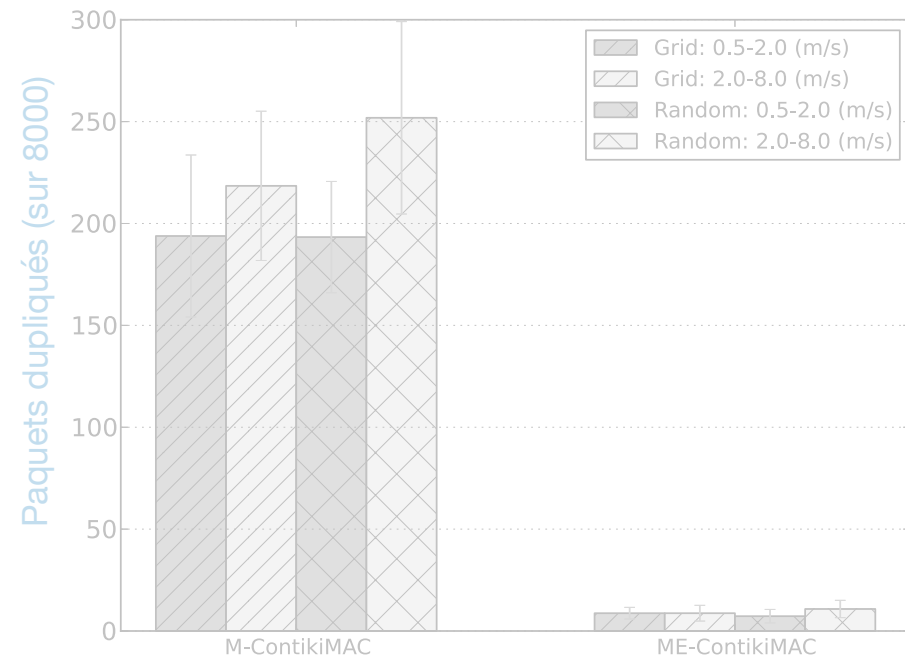


# Découverte du voisinage

- Mobilité : trouver un voisin (de qualité) rapidement ?
- **MobiDisc**
  - Limiter les changements de prochain saut (i.e., choix du “meilleur”)
  - Accélérer l’association à un nouveau prochain saut (*First Ack Neighbor*, FAN)

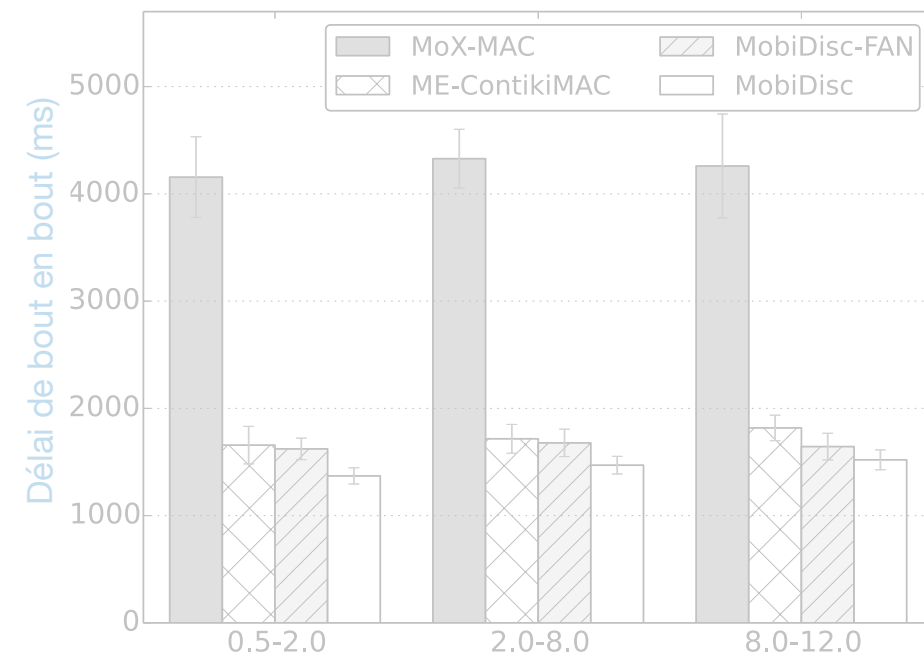
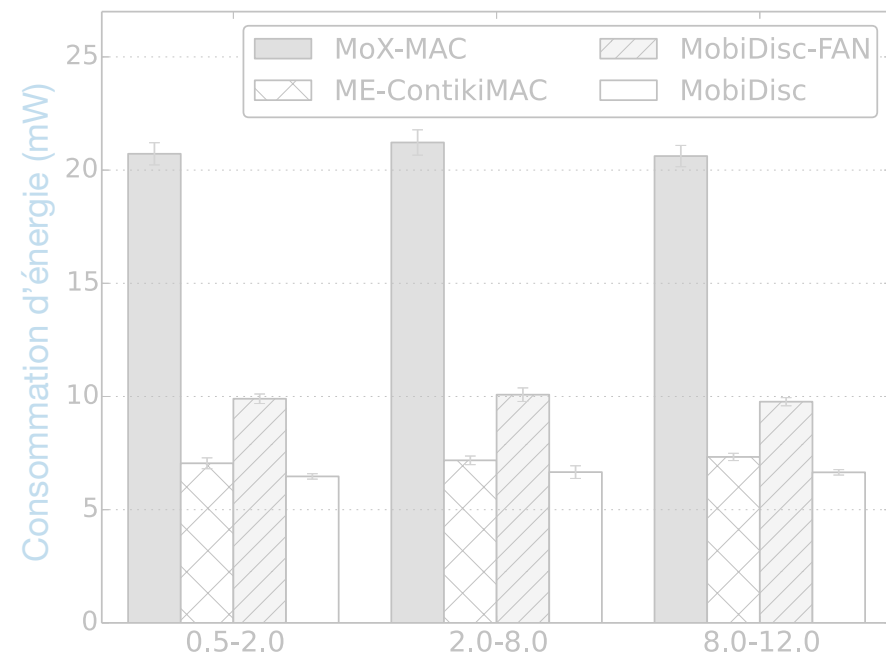
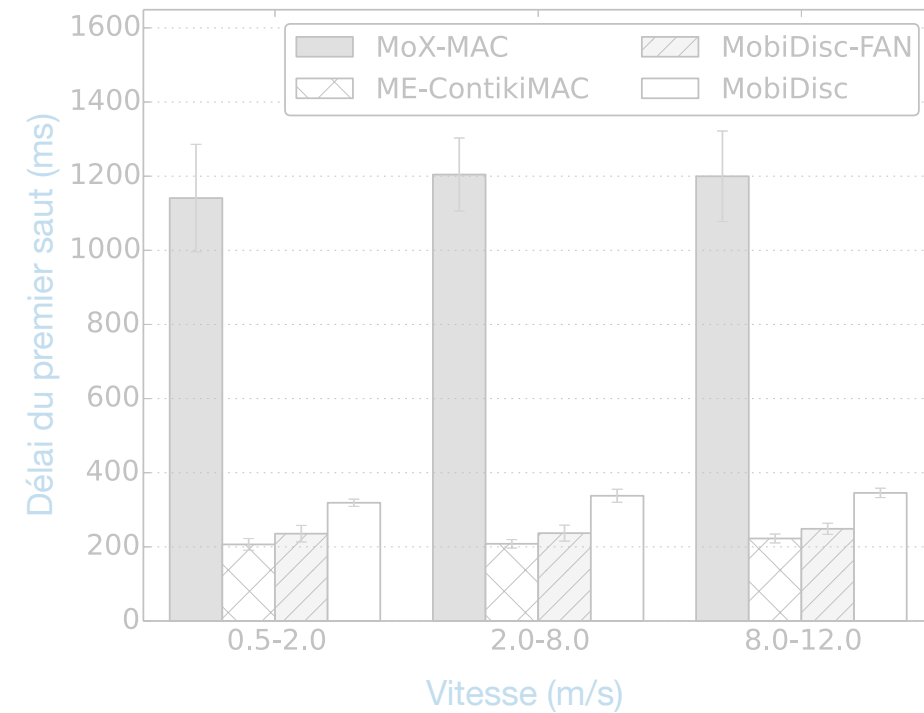
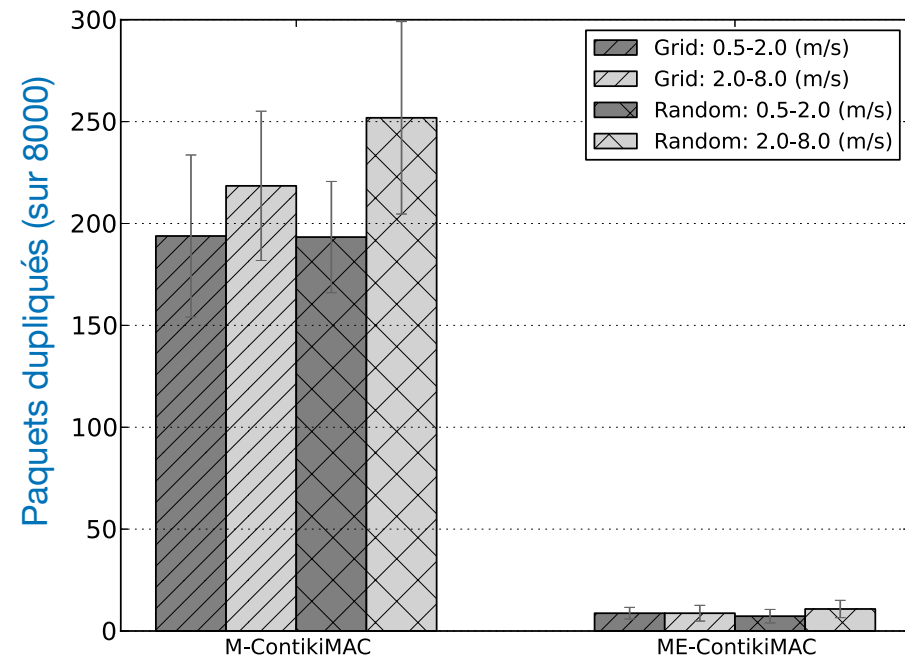


# Performances





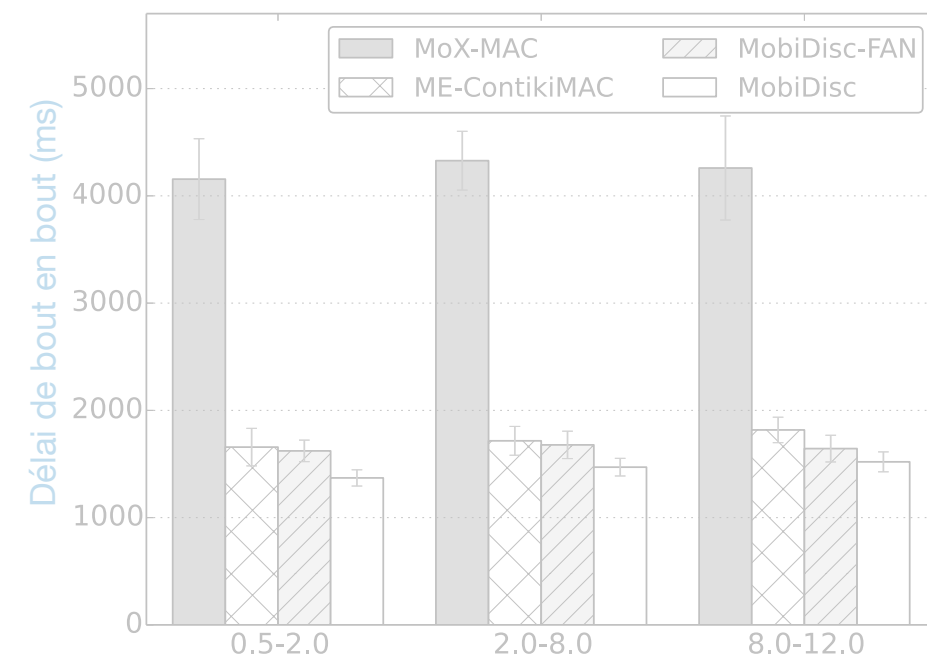
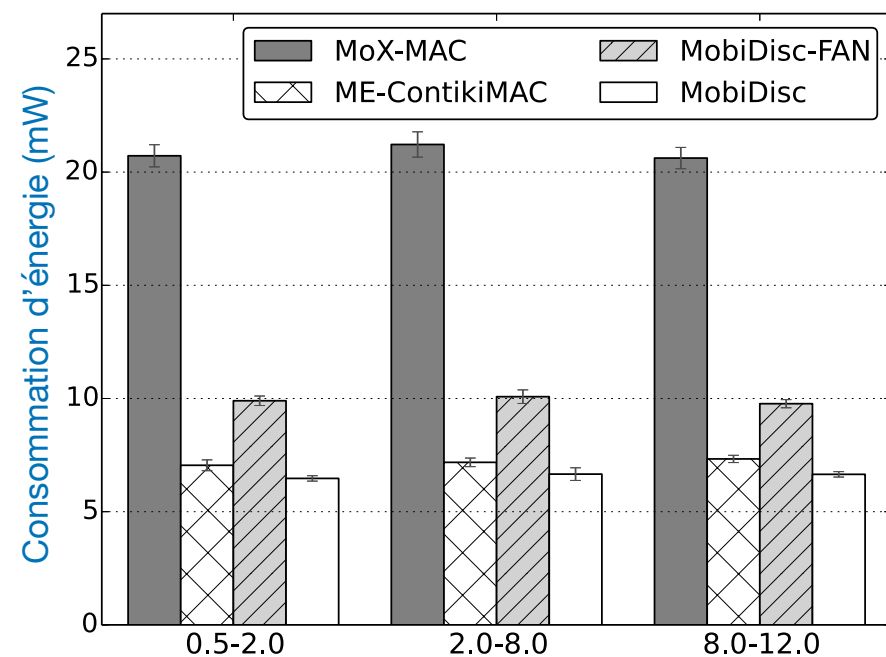
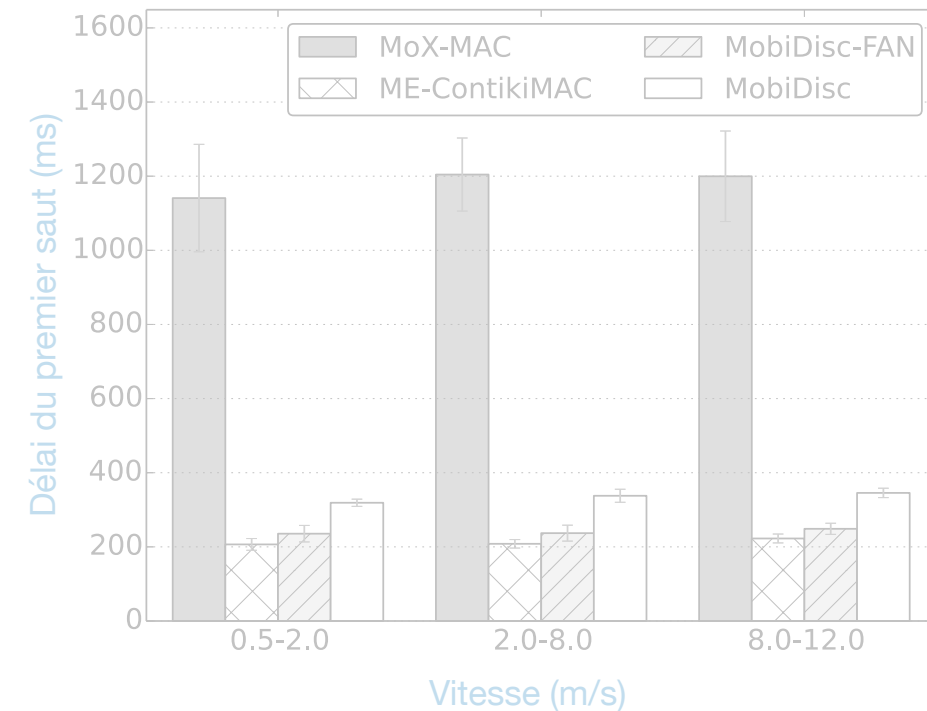
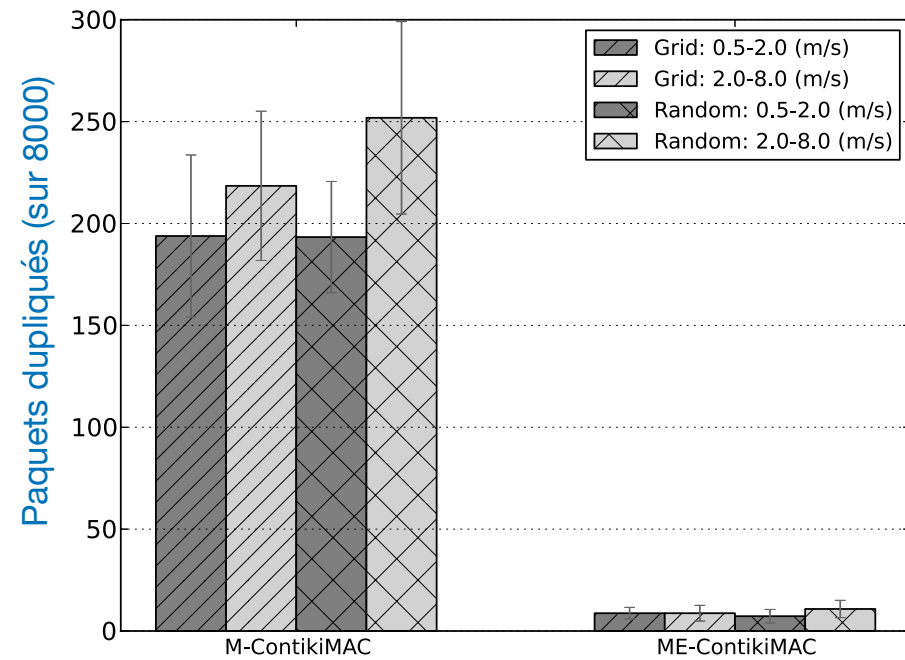
# Performances





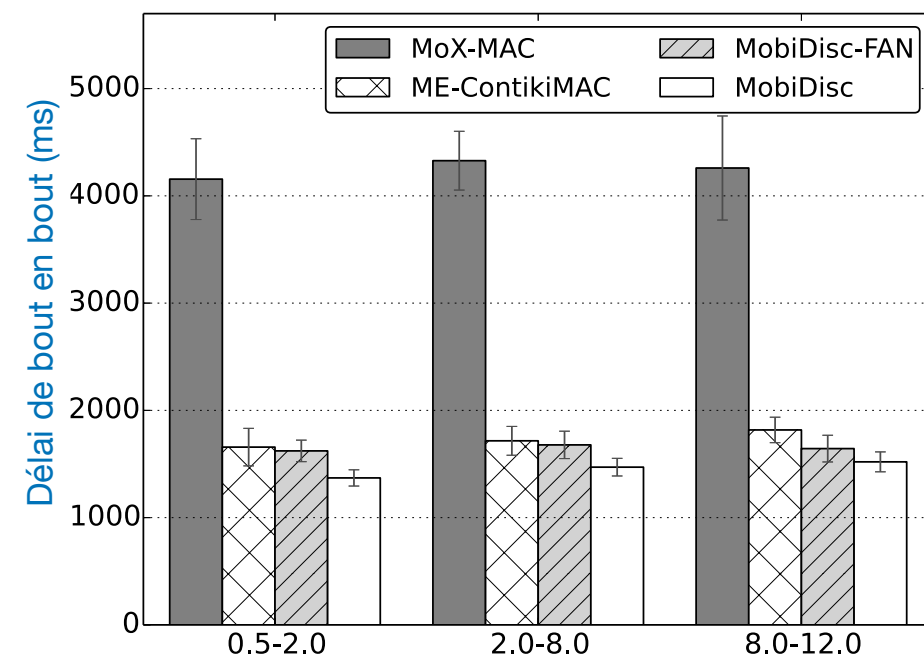
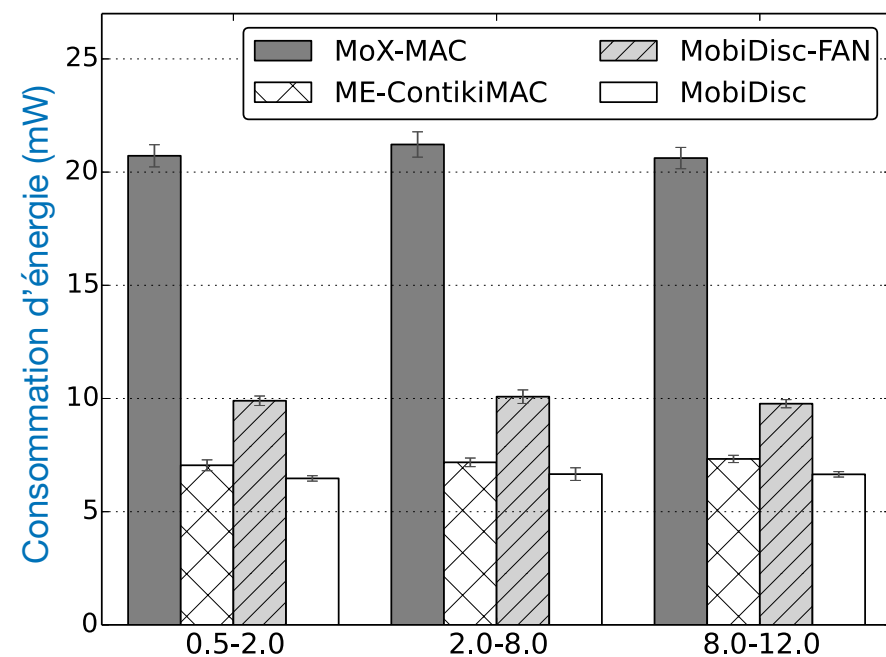
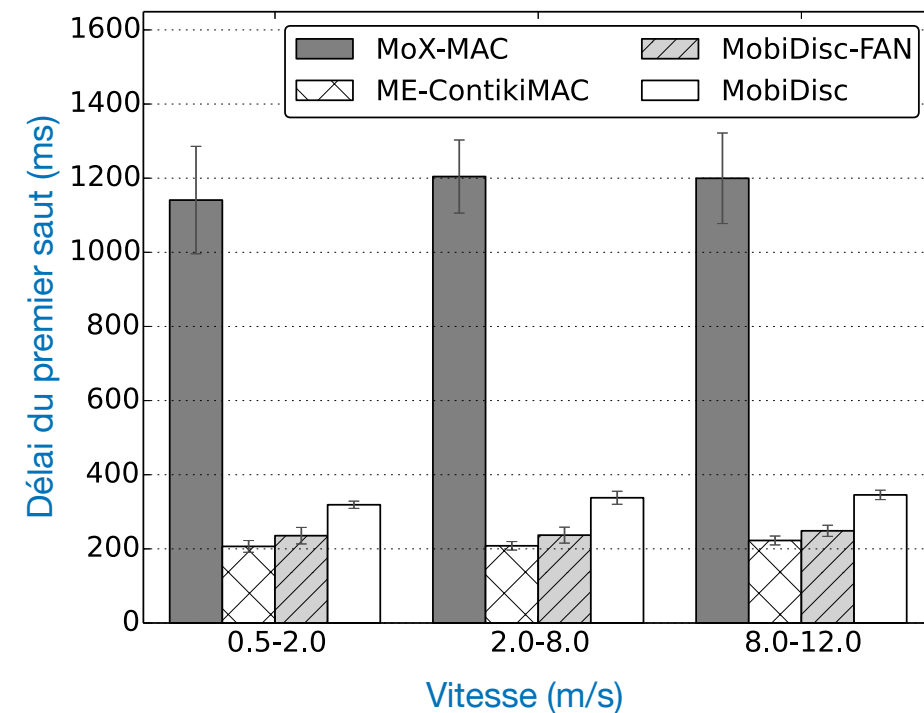
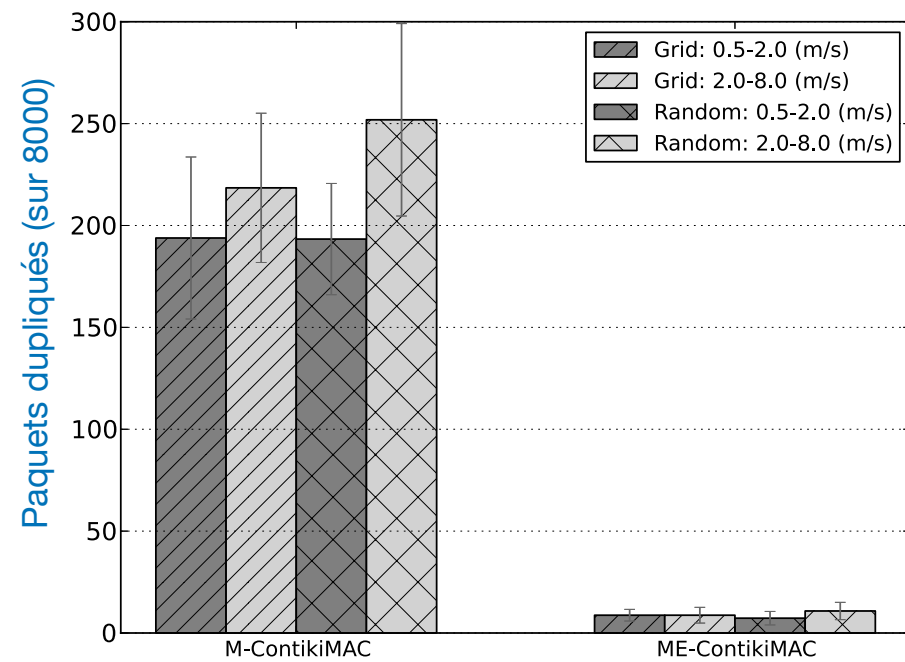
# Performances

[MoX-MAC] P. D. Ba, I. Niang, and B. Gueye, "An Optimized and Power Savings Protocol for Mobility Energy-aware in Wireless Sensor Networks," In Telecommunications Systems, vol. 55, no. 2, pp. 271-280, 2014.



# Performances

[MoX-MAC] P. D. Ba, I. Niang, and B. Gueye, "An Optimized and Power Savings Protocol for Mobility Energy-aware in Wireless Sensor Networks," In Telecommunications Systems, vol. 55, no. 2, pp. 271-280, 2014.





# Prise en compte de la mobilité

---

- **Mobilité peu considérée dans les solutions existantes**
- **Amélioration de ContikiMAC**
  - Ajout de l'*anycast* et réduction des duplications de paquets
  - Connexions rapides des mobiles aux prochains sauts
    - Réduction des délais (premier saut et bout-en-bout)
  - Compromis énergie/délai ajustable avec divers mécanismes

- Efficacité énergétique et contrôle de l'accès au medium (MAC) ?
  - Configurations hétérogènes des paramètres LPL ?
  - Adaptation des paramètres LPL face à la dynamique ?
    - Trafic variable ?
    - Mobilité des objets ?
  - **Conclusions**
  - **Travaux connexes**
  - **Perspectives**
- 

## Conclusions et perspectives



# Conclusions

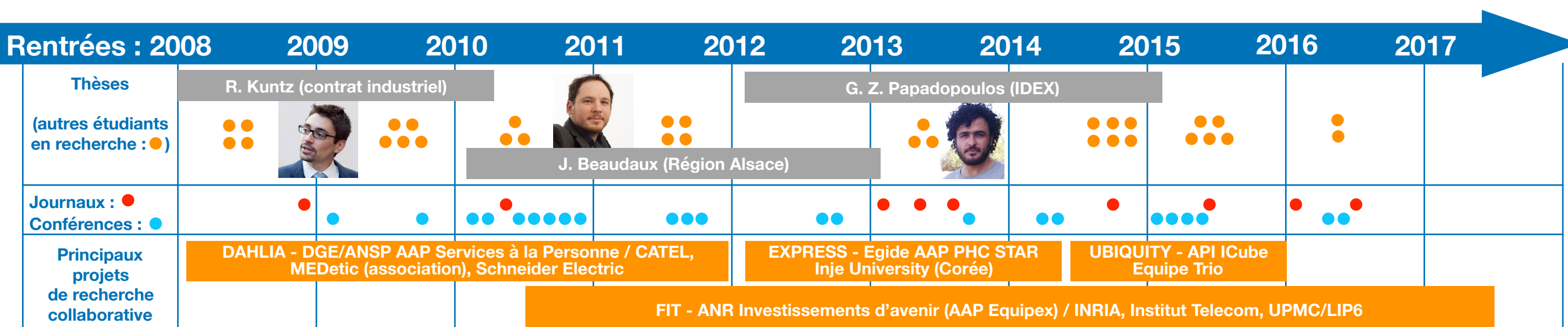
---

- **Hétérogénéité**
  - Connectivité maintenue malgré des paramètres LPL différents
  - Décisions locales pour une cohérence globale
- **Auto-configuration et auto-adaptation**
  - Dynamique du déploiement (trafic variable, mobilité)
  - Principes applicables à toute couche MAC asynchrone



# Conclusions

- **Hétérogénéité**
  - Connectivité maintenue malgré des paramètres LPL différents
  - Décisions locales pour une cohérence globale
- **Auto-configuration et auto-adaptation**
  - Dynamique du déploiement (trafic variable, mobilité)
  - Principes applicables à toute couche MAC asynchrone



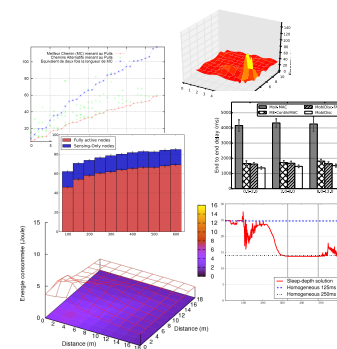
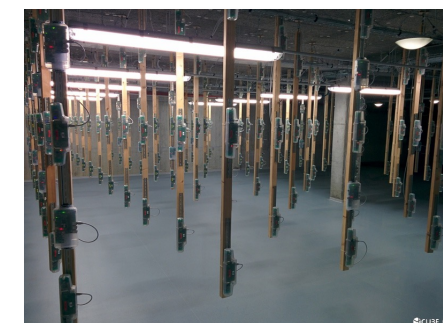
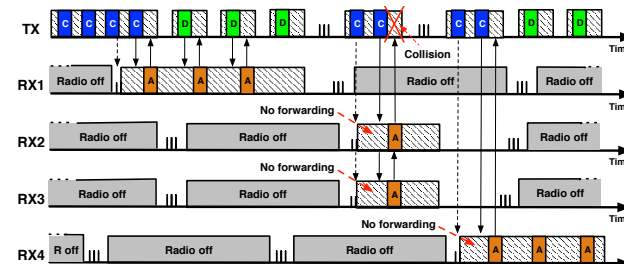
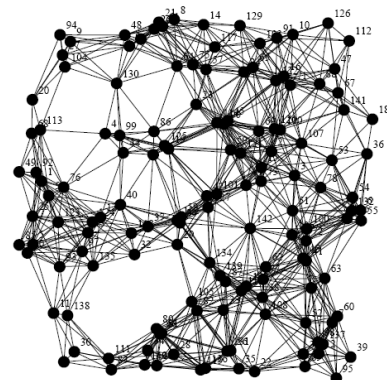
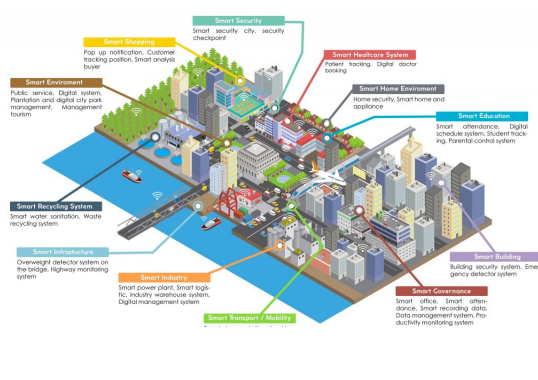
# Conclusions

- **Hétérogénéité**

- Connectivité maintenue malgré des paramètres LPL différents
- Décisions locales pour une cohérence globale

- **Auto-configuration et auto-adaptation**

- Dynamique du déploiement (trafic variable, mobilité)
- Principes applicables à toute couche MAC asynchrone





# Travaux connexes

---

- **Evaluation de performances**

- ➡ Répétabilité des scénarios ? Reproductibilité des résultats ?
- ➡ Confiance dans les nouvelles idées et solutions



# Travaux connexes

---

- **Evaluation de performances**

- ➡ Répétabilité des scénarios ? Reproductibilité des résultats ?
- ➡ Confiance dans les nouvelles idées et solutions

- 2011** C. Burin des Rosiers, G. Chelius, E. Fleury, A. Fraboulet, A. Gallais, N. Mitton and T. Noel. SensLAB: Very Large Scale Open Wireless Sensor Network Testbed. **ICST TRIDENTCOM** - Shanghai, China.
- 2011** C. Burin des Rosiers, G. Chelius, T. Ducrocq, E. Fleury, A. Fraboulet, A. Gallais, N. Mitton, T. Noel and J. Vandaele. Using SensLAB as a First Class Scientific Tool for Large Scale Wireless Sensor Network Experiments. **IFIP Networking** - Valencia, Spain.
- 2013** J. Beaudaux, A. Gallais, J. Montavont, T. Noel, D. Roth and E. Valentin. Thorough Empirical Analysis of X-MAC over a Large Scale Internet of Things Testbed. **IEEE Sensors Journal**, Vol. 14:2, pp. 383-392.
- 2013** G. Z. Papadopoulos, J. Beaudaux, A. Gallais, T. Noel and G. Schreiner. Adding value to WSN simulation using the IoT-LAB experimental platform. **IEEE WiMob** - Lyon, France.
- 2014** J. Beaudaux, A. Gallais and T. Noel. Reality-Proof Activity Scheduling for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks. **Inderscience International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing**, Vol. 15, No. 1/2/3, pp. 185 - 199.
- 2016** G. Z. Papadopoulos, K. Kritsis, A. Gallais, P. Chatzimisios and T. Noel. Performance Evaluation Methods in Ad-Hoc and Wireless Sensor Networks: A Literature Study. **IEEE Communications Magazine, Ad Hoc and Sensor Networks Series**, pp. 122-128.
- 2016** G. Z. Papadopoulos, A. Gallais, G. Schreiner and T. Noel. Importance of Repeatable Setups for Reproducible Experimental Results in IoT. **ACM PE-WASUN** - Valletta, Malta.
- 2017** G. Z. Papadopoulos, A. Gallais, G. Schreiner, E. Jou and T. Noel. Thorough IoT testbed characterization: From proof-of-concept to repeatable experimentations. **Elsevier Computer Networks**. vol. 119, pp. 86-101.

# Travaux connexes

- **Evaluation de performances**

- ➡ Répétabilité des scénarios ? Reproductibilité des résultats ?
- ➡ Confiance dans les nouvelles idées et solutions

- 2011 C. Burin des Rosiers, G. Chelius, E. Fleury, A. Fraboulet, A. Gallais, N. Mitton and T. Noel. SensLAB: Very Large Scale Open Wireless Sensor Network Testbed. **ICST TRIDENTCOM** - Shanghai, China.
- 2011 C. Burin des Rosiers, G. Chelius, T. Ducrocq, E. Fleury, A. Fraboulet, A. Gallais, N. Mitton, T. Noel and J. Vandaele. Using SensLAB as a First Class Scientific Tool for Large Scale Wireless Sensor Network Experiments. **IFIP Networking** - Valencia, Spain.
- 2013 J. Beaudaux, A. Gallais, J. Montavont, T. Noel, D. Roth and E. Valentin. Thorough Empirical Analysis of X-MAC over a Large Scale Internet of Things Testbed. **IEEE Sensors Journal**, Vol. 14:2, pp. 383-392.
- 2013 G. Z. Papadopoulos, J. Beaudaux, A. Gallais, T. Noel and G. Schreiner. Adding value to WSN simulation using the IoT-LAB experimental platform. **IEEE WiMob** - Lyon, France.
- 2014 J. Beaudaux, A. Gallais and T. Noel. Reality-Proof Activity Scheduling for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks. **Inderscience International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing**, Vol. 15, No. 1/2/3, pp. 185 - 199.
- 2016 G. Z. Papadopoulos, K. Kritsis, A. Gallais, P. Chatzimisios and T. Noel. Performance Evaluation Methods in Ad-Hoc and Wireless Sensor Networks: A Literature Study. **IEEE Communications Magazine, Ad Hoc and Sensor Networks Series**, pp. 122-128.
- 2016 G. Z. Papadopoulos, A. Gallais, G. Schreiner and T. Noel. Importance of Repeatable Setups for Reproducible Experimental Results in IoT. **ACM PE-WASUN** - Valletta, Malta.
- 2017 G. Z. Papadopoulos, A. Gallais, G. Schreiner, E. Jou and T. Noel. Thorough IoT testbed characterization: From proof-of-concept to repeatable experimentations. **Elsevier Computer Networks**. vol. 119, pp. 86-101.

- **Tolérance aux pannes, routage**

- Stockage distribué en cas de pannes ? Duplications avec routage opportuniste ?
- ➡ Fiabilité de la collecte des données

# Travaux connexes

- **Evaluation de performances**

- ➔ Répétabilité des scénarios ? Reproductibilité des résultats ?
- ➔ Confiance dans les nouvelles idées et solutions

**2011** C. Burin des Rosiers, G. Chelius, E. Fleury, A. Fraboulet, A. Gallais, N. Mitton and T. Noel. SensLAB: Very Large Scale Open Wireless Sensor Network Testbed. *ICST TRIDENTCOM* - Shanghai, China.

**2011** C. Burin des Rosiers, G. Chelius, T. Ducrocq, E. Fleury, A. Fraboulet, A. Gallais, N. Mitton, T. Noel and J. Vandaele. Using SensLAB as a First Class Scientific Tool for Large Scale Wireless Sensor Network Experiments. *IFIP Networking* - Valencia, Spain.

**2013** J. Beaudaux, A. Gallais, J. Montavont, T. Noel, D. Roth and E. Valentin. Thorough Empirical Analysis of X-MAC over a Large Scale Internet of Things Testbed. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 14:2, pp. 383-392.

**2013** G. Z. Papadopoulos, J. Beaudaux, A. Gallais, T. Noel and G. Schreiner. Adding value to WSN simulation using the IoT-LAB experimental platform. *IEEE WiMob* - Lyon, France.

**2014** J. Beaudaux, A. Gallais and T. Noel. Reality-Proof Activity Scheduling for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks. *Inderscience International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, Vol. 15, No. 1/2/3, pp. 185 - 199.

**2016** G. Z. Papadopoulos, K. Kritsis, A. Gallais, P. Chatzimisios and T. Noel. Performance Evaluation Methods in Ad-Hoc and Wireless Sensor Networks: A Literature Study. *IEEE Communications Magazine, Ad Hoc and Sensor Networks Series*, pp. 122-128.

**2016** G. Z. Papadopoulos, A. Gallais, G. Schreiner and T. Noel. Importance of Repeatable Setups for Reproducible Experimental Results in IoT. *ACM PE-WASUN* - Valletta, Malta.

**2017** G. Z. Papadopoulos, A. Gallais, G. Schreiner, E. Jou and T. Noel. Thorough IoT testbed characterization: From proof-of-concept to repeatable experimentations. *Elsevier Computer Networks*. vol. 119, pp. 86-101.

- **Tolérance aux pannes, routage**

- Stockage distribué en cas de pannes ? Duplications avec routage opportuniste ?
- ➔ Fiabilité de la collecte des données

P. Mérindol and A. Gallais. Path Diversity in Energy-Efficient Wireless Sensor Networks. **2009**  
*IEEE PIMRC* - Tokyo, Japan.

J. Beaudaux, A. Gallais, J. Montavont, T. Noel. LIFT: Layer Independent Fault Tolerance Mechanism for Wireless Sensor Networks. **2011**  
*IEEE VTC spring* - Budapest, Hungary.

F. Clad, A. Gallais, P. Mérindol. Energy-Efficient Data Collection in WSN: A Sink-Oriented Dynamic Backbone. **2012**  
*IEEE ICC* - Ottawa, Canada.

G. Z. Papadopoulos, J. Beaudaux, A. Gallais, P. Chatzimisios and T. Noel. Toward a Packet Duplication Control for Opportunistic Routing in WSNs. **2014**  
*IEEE Globecom* - Austin, US.

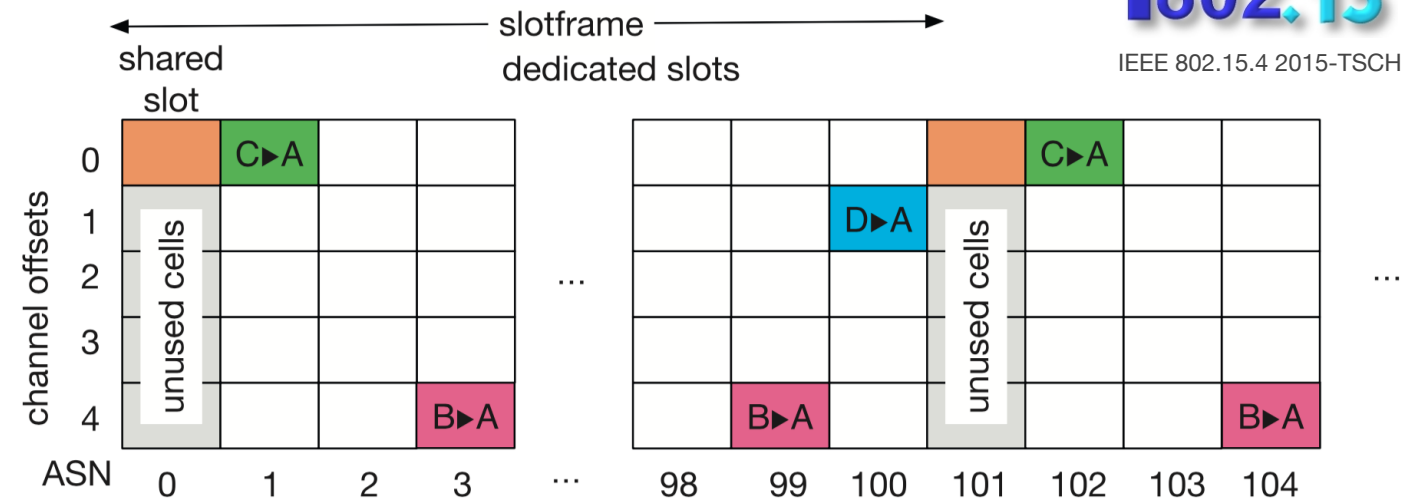
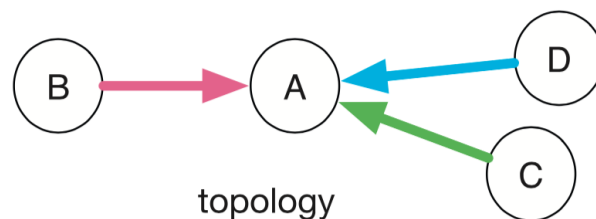
G. Z. Papadopoulos, N. Pappas, A. Gallais, T. Noel and V. Angelakis. Distributed Adaptive Scheme for Reliable Data Collection in Fault Tolerant WSNs. **2015**  
*IEEE WF-IoT* - Milan, Italy.



# Perspective : Industrial Internet of Things (IIoT)

## • Approches synchrones et sauts de fréquence

- ➡ Garanties (pertes, délais)
- ➡ Robustesse, passage à l'échelle



## • IIoT dynamique ?

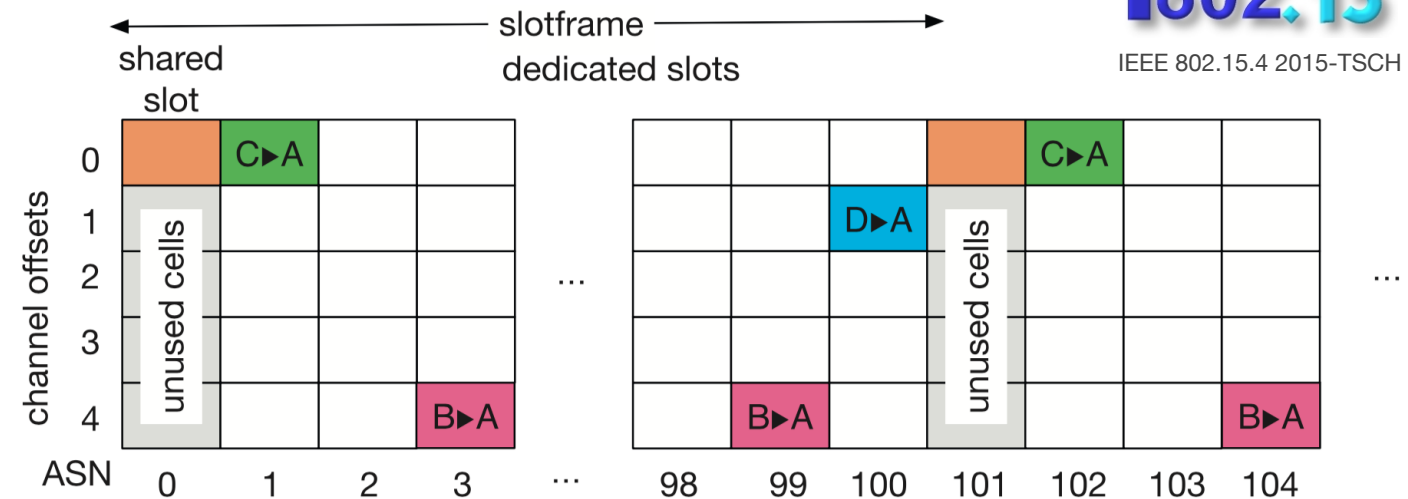
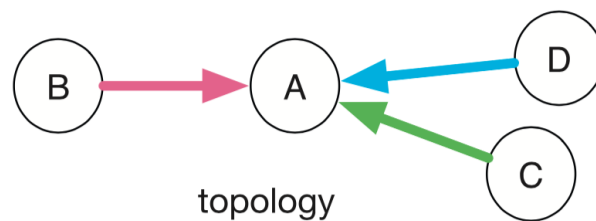
- Prédire les poussées de trafic : allocation de blocs pour tout lien sollicité
- Mobilité d'un noeud : allocation de blocs pour les voisins rencontrés en chemin
- ➡ Prévoir la qualité des liens ? Découvrir le voisinage et s'associer ?



# Perspective : Industrial Internet of Things (IIoT)

- Approches synchrones et sauts de fréquence

- ➡ Garanties (pertes, délais)
- ➡ Robustesse, passage à l'échelle



- IIoT dynamique ?

- Prédire les poussées de trafic : allocation de blocs pour tout lien sollicité
- Mobilité d'un noeud : allocation de blocs pour les voisins rencontrés en chemin
- ➡ Prévoir la qualité des liens ? Découvrir le voisinage et s'associer ?

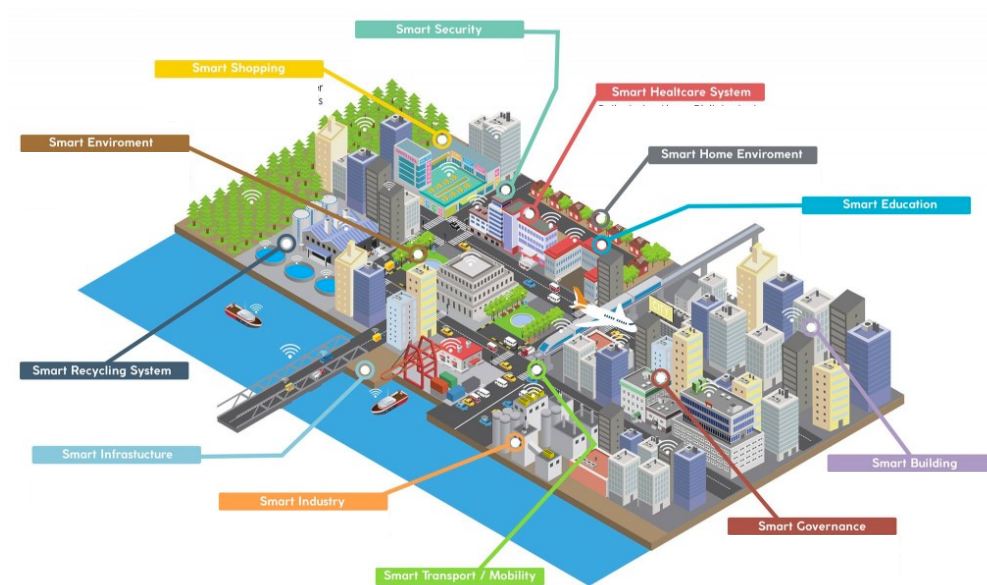


# Perspective : Interactions Cloud / IoT

- **Utilisation de données IoT : planification et adaptation d'itinéraires multimodaux**

- Données utilisées/produites en temps-réel

➡ Comment les utiliser ?



- **Où trouver les données ?**

- Cloud → Fog
- Sources de données nombreuses et hétérogènes

➡ Mobilité des données ? Lieux de décision ? Sécurité ? Qualité de service ?



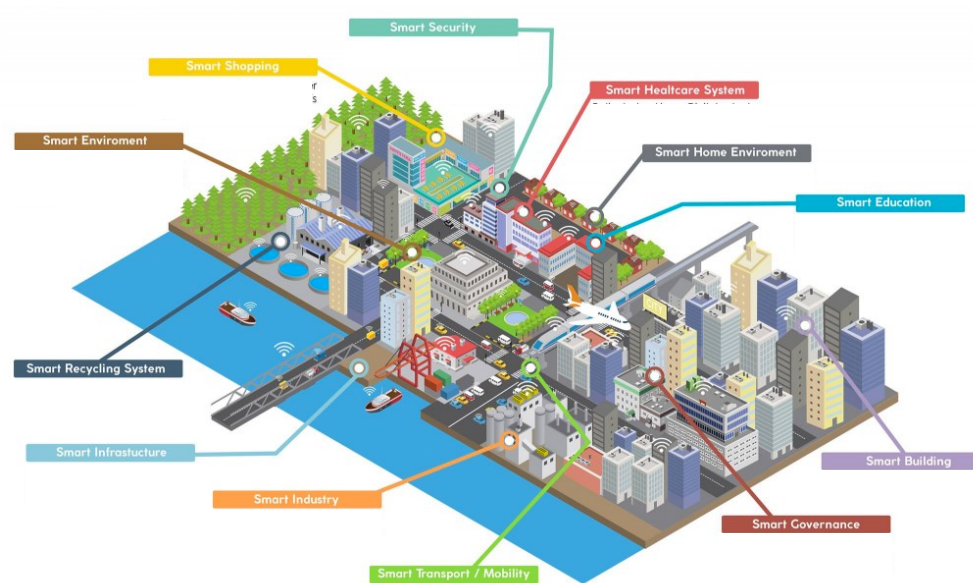


# Perspective : Interactions Cloud / IoT

- **Utilisation de données IoT : planification et adaptation d'itinéraires multimodaux**

- Données utilisées/produites en temps-réel

➡ Comment les utiliser ?



- **Où trouver les données ?**

- Cloud → Fog
- Sources de données nombreuses et hétérogènes

➡ Mobilité des données ? Lieux de décision ? Sécurité ? Qualité de service ?



<https://www.openfogconsortium.org/>

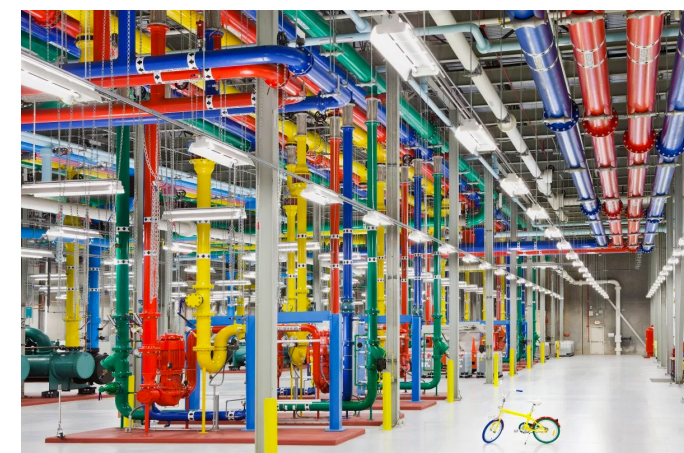
# Perspective : Efficacité énergétique de l'Internet ?

---

- **Toujours plus de demande de disponibilité et connectivité**
  - ➔ Adaptation de l'infrastructure réseau (commutateurs, routeurs)
  - ➔ Efficacité énergétique des réseaux filaires ?

C. Gunaratne, K. Christensen, B. Nordman, and S. Suen, "Reducing the energy consumption of ethernet with adaptive link rate (alr)," IEEE Transactions on Computers, vol. 57, no. 4, pp. 448–461, 2008.

T. Haudebourg and A.-C. Orgerie, "On the energy efficiency of sleeping and rate adaptation for network devices," Proceedings of the 17th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP), 2017, pp. 132–146.



- **Éléments actifs ? (i.e., ■ ou ■ ?)**
  - Adaptation à la charge (50% d'économies) et support des poussées de trafic

B. Heller, S. Seetharaman, P. Mahadevan, Y. Yiakoumis, P. Sharma, S. Banerjee, and N. McKeown, "**Elastictree**: Saving energy in data center networks," 7th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation (NSDI), pp. 17–17, 2010.



# Contributions à l'accès au medium asynchrone dans un Internet des objets dynamique

Soutenance en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches

Présentée par **Antoine Gallais** le 17 novembre 2017, devant le jury suivant :

## Rapporteurs :

André-Luc Beylot (PU)  
Silvia Giordano (Professor)  
Fabrice Valois (PU)

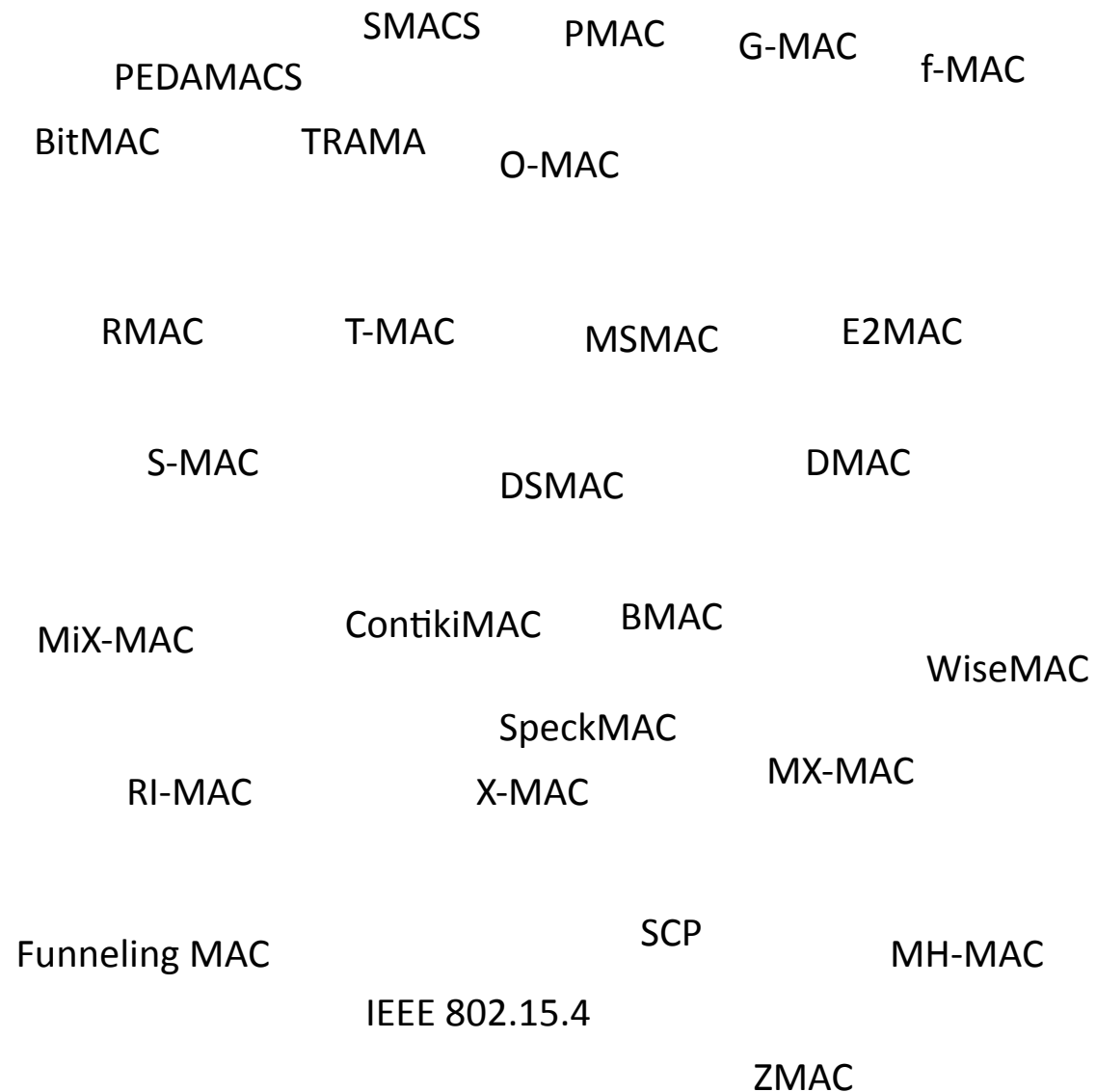
IRIT - ENSEEIHT, Toulouse  
SUPSI - University of Applied Science, Suisse  
CITI - INSA Lyon

## Examineurs :

Marcelo Dias de Amorim (DR CNRS)  
Nathalie Mitton (DR Inria)  
Thomas Noël (PU, garant)

LIP6 - UPMC, Paris  
Inria Lille - Nord Europe  
ICube - Université de Strasbourg

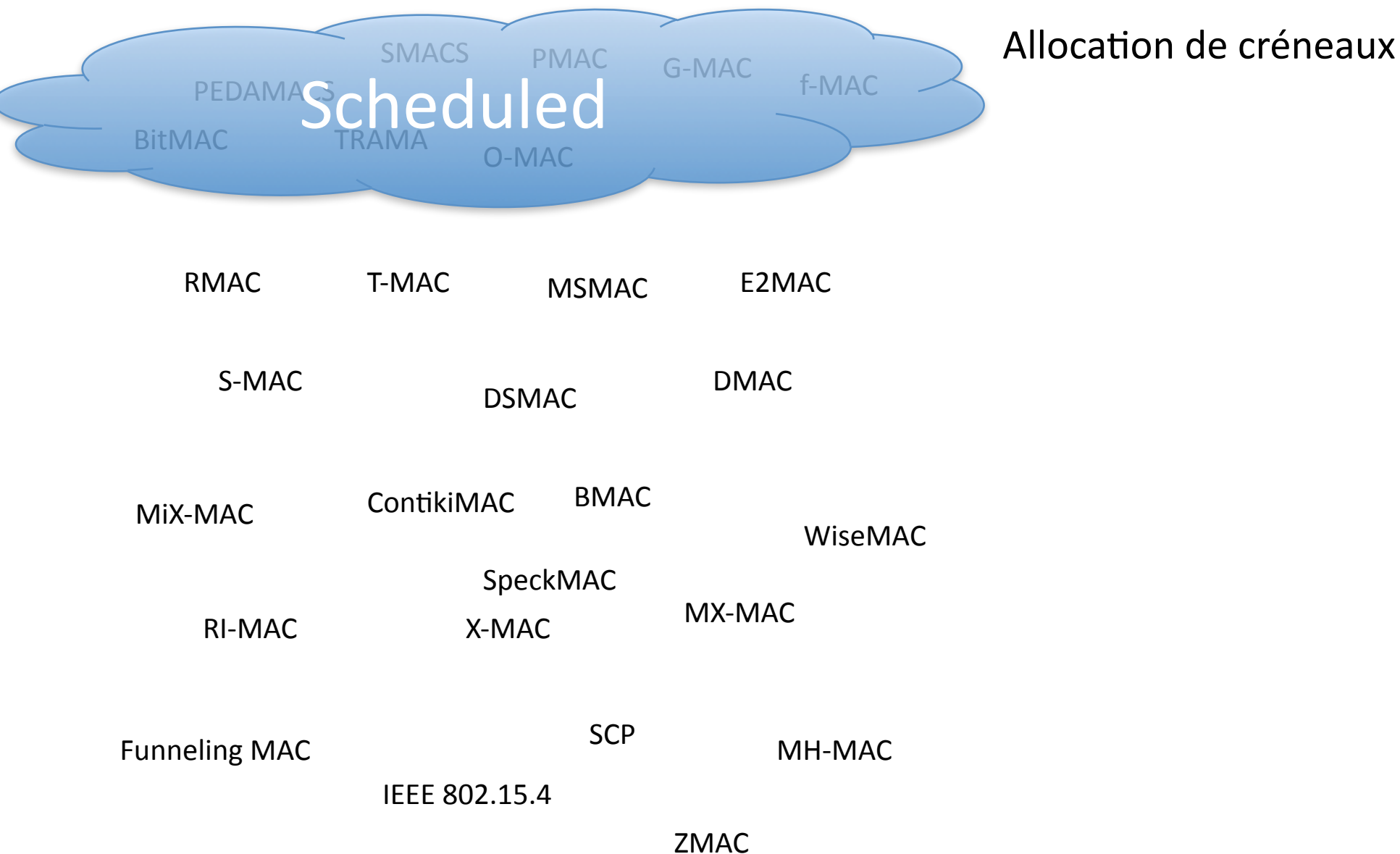
# Couche MAC dans les réseaux de capteurs



> 70 protocoles MAC publiés en 2010

A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, and K. Leung, "MAC Essentials for Wireless Sensor Networks", IEEE Communications Surveys Tutorials, 2010

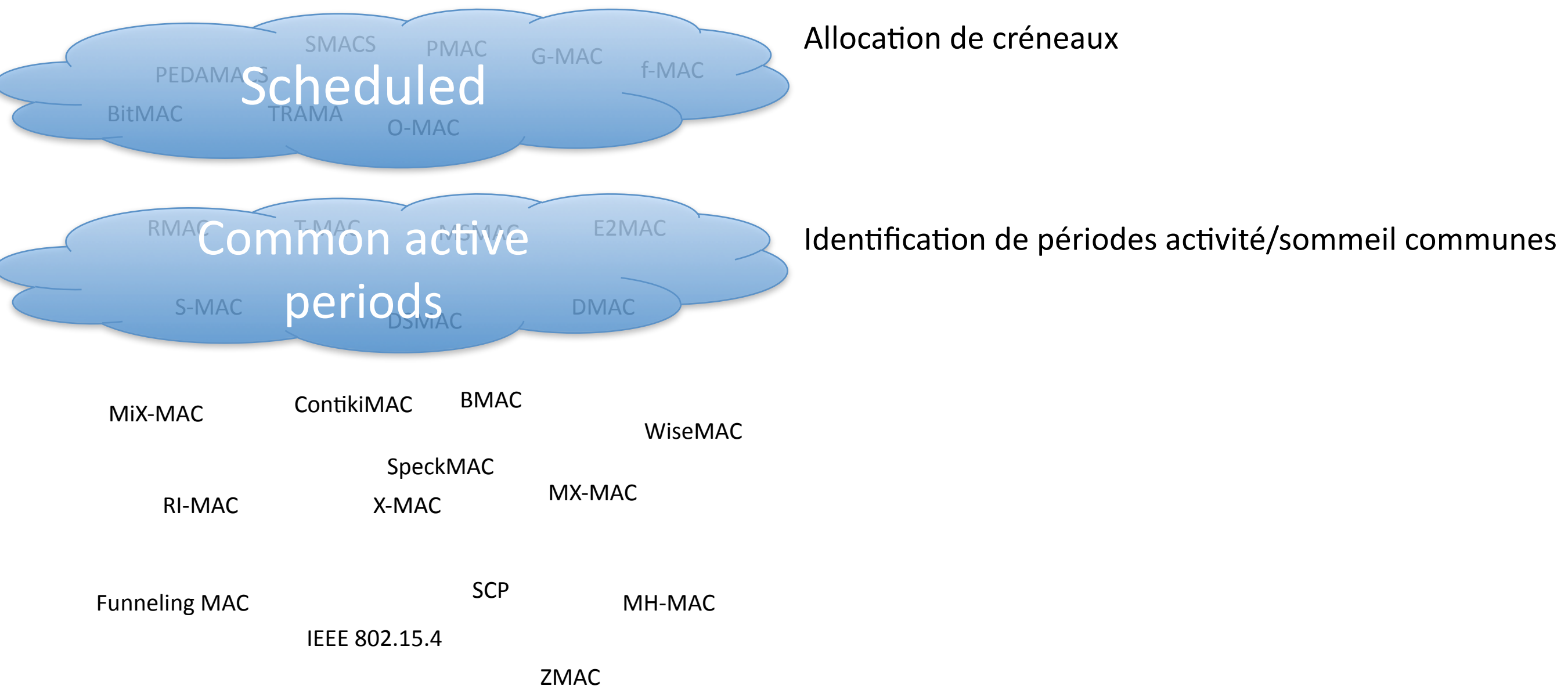
# Couche MAC dans les réseaux de capteurs



> 70 protocoles MAC publiés en 2010

A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, and K. Leung, "MAC Essentials for Wireless Sensor Networks", IEEE Communications Surveys Tutorials, 2010

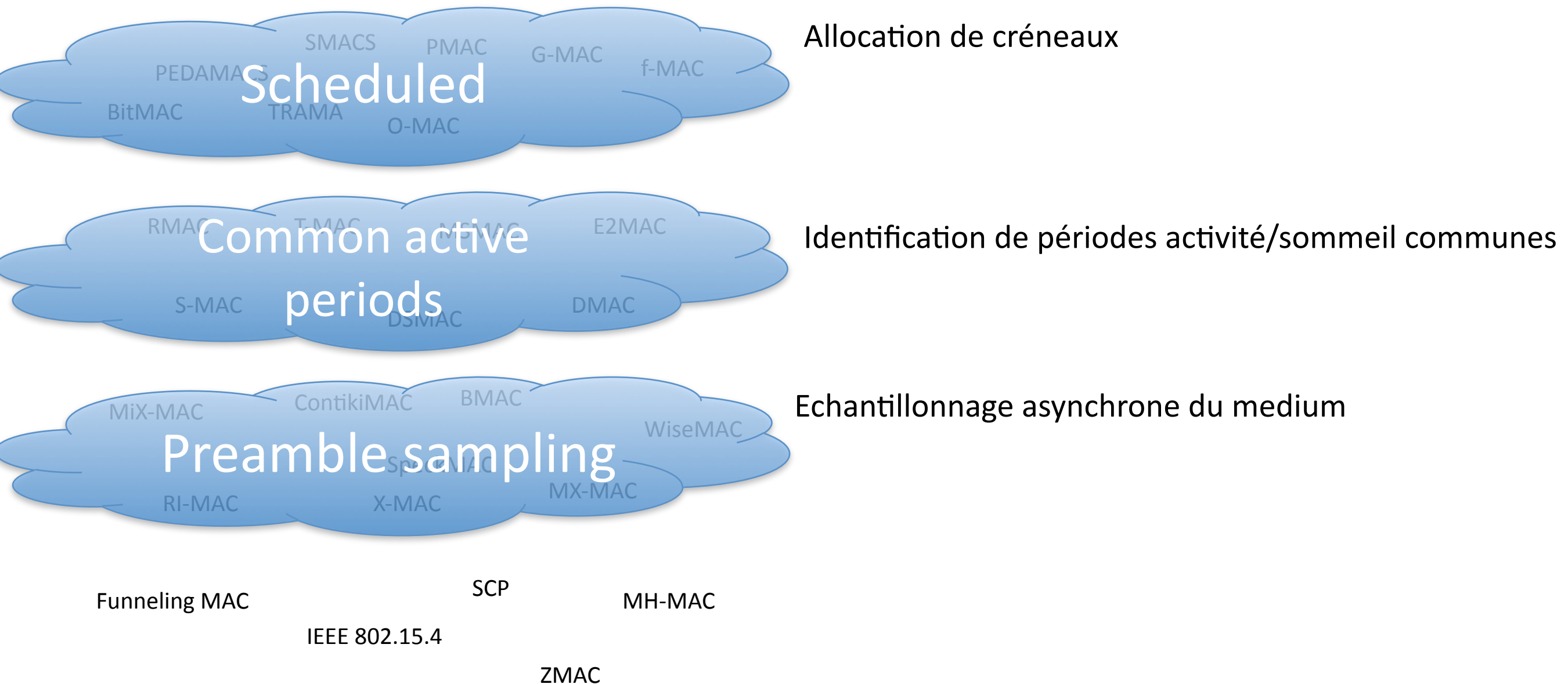
# Couche MAC dans les réseaux de capteurs



> 70 protocoles MAC publiés en 2010

A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, and K. Leung, "MAC Essentials for Wireless Sensor Networks", IEEE Communications Surveys Tutorials, 2010

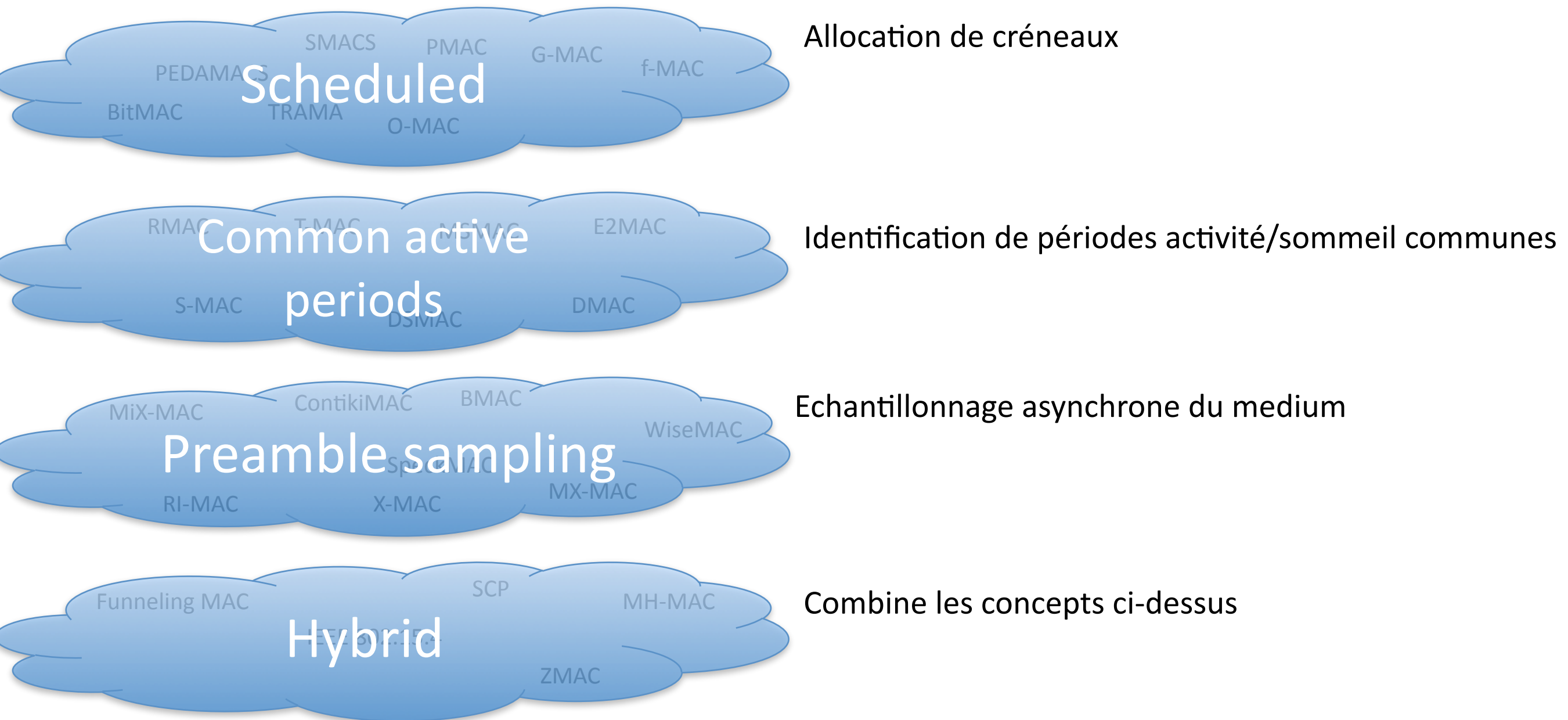
# Couche MAC dans les réseaux de capteurs



> 70 protocoles MAC publiés en 2010

A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, and K. Leung, "MAC Essentials for Wireless Sensor Networks", IEEE Communications Surveys Tutorials, 2010

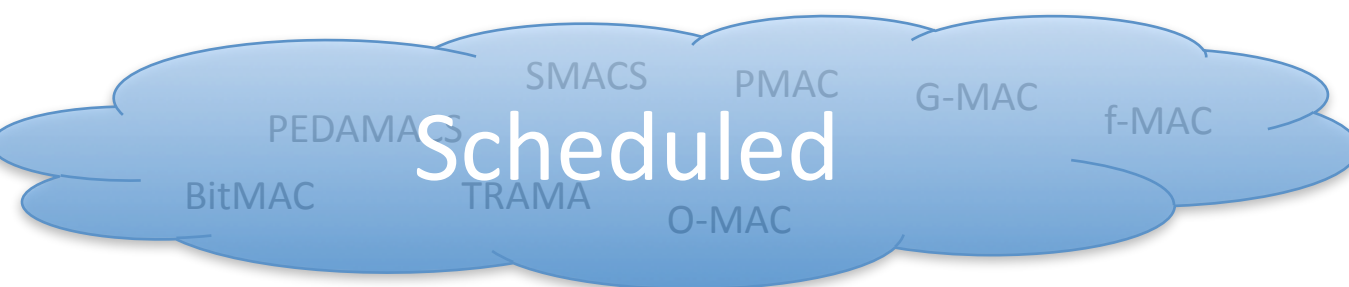
# Couche MAC dans les réseaux de capteurs



> 70 protocoles MAC publiés en 2010

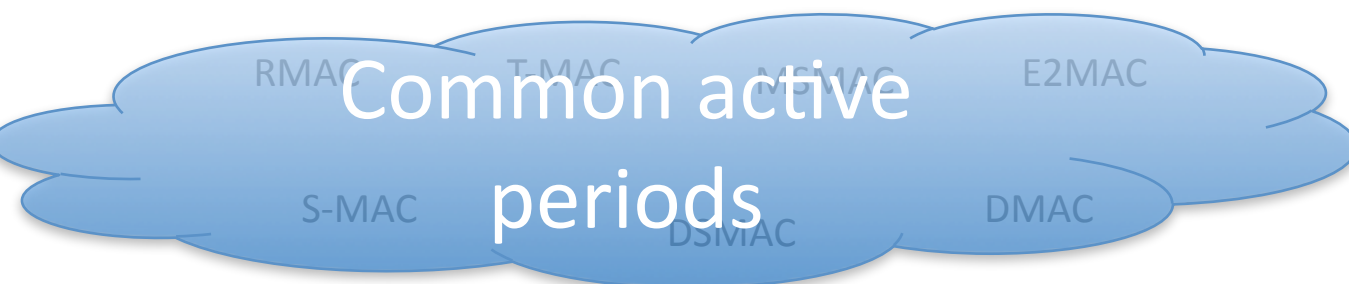
A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, and K. Leung, "MAC Essentials for Wireless Sensor Networks", IEEE Communications Surveys Tutorials, 2010

# Couche MAC dans les réseaux de capteurs



Allocation de créneaux

Impose des MAJ lors de changements (e.g. topologie, trafic)



Identification de périodes activité/sommeil communes

Impose des MAJ lors de changements (e.g. topologie, trafic)



Echantillonnage asynchrone du medium

Passage à l'échelle, adaptable, simple, décentralisé



Combine les concepts ci-dessus

Hérite des caractéristiques des autres familles

> 70 protocoles MAC publiés en 2010

A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, and K. Leung, "MAC Essentials for Wireless Sensor Networks", IEEE Communications Surveys Tutorials, 2010



# Rappel : motivations pour le choix de LPL

- **Passage à l'échelle et pas de synchronisation nécessaire**
  - Flexible dans des scénarios dynamiques (ex : télémédecine, observation vie sauvage)
- **Pourtant**
  - Peu de déploiements grande échelle utilisant LPL
  - Peu de scénarios dynamiques (le plus souvent : relevés périodiques)

|                      | Décentralisé ? | Hétérogénéité ? | Adaptation au trafic ? |
|----------------------|----------------|-----------------|------------------------|
| <b>pTunes</b>        |                |                 | ✓                      |
| <b>M(i)X-MAC</b>     | ✓              |                 |                        |
| <b>BEAM-MAC</b>      | ✓              | ✓               |                        |
| <b>LA-MAC</b>        |                | ✓               | ✓                      |
| <b>MaxMAC, AADCC</b> | ✓              | ✓               | ✓                      |

M. Zimmerling, F. Ferrari, L. Mottola, T. Voigt, and L. Thiele, "**pTunes**: Runtime parameter adaptation for low-power MAC protocols," ACM IPSN 2012.

[**MX-MAC**] C. Merlin and W. Heinzelman, "Duty cycle control for low-power-listening MAC protocols," IEEE MASS 2008.

[**MiX-MAC**] C. J. Merlin and W. B. Heinzelman, "Schedule Adaptation of Low-Power-Listening Protocols for Wireless Sensor Networks," IEEE TMC 2010.

M. Anwender, G. Wagenknecht, T. Braun, and K. Dolfus, "**BEAM**: A Burst-aware Energy-efficient Adaptive MAC protocol for Wireless Sensor Networks," INSS 2010.

G. Corbellini, E. Strinati, and A. Duda, "**LA-MAC**: Low-latency asynchronous MAC for wireless sensor networks," IEEE PIMRC 2012.

[**AADCC**] C. Merlin and W. Heinzelman, "Duty Cycle Control for Low-Power-Listening MAC Protocols," IEEE TMC 2010.

P. Hurni and T. Braun, "**MaxMAC**: a maximally traffic-adaptive MAC protocol for wireless sensor networks," EWSN 2010.

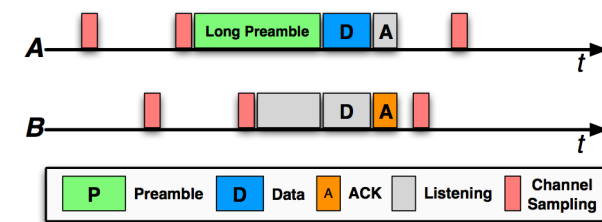


# Suite ?

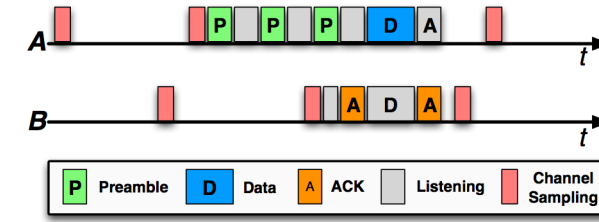
**Table 2**  
List of preamble sampling MAC protocols.

| Category                        | List of MAC protocols                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Basic                           | Preamble sampling [14], LPL [15], B-MAC [12]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Short preamble burst            | ENBMAC [17], B-MAC+ [18], SpeckMAC-B [19], DPS-MAC [20], SyncWUF [21], SESP-MAC [22], TIGER [23], CSMA-MPS [24], X-MAC [25], AS-MAC [26], Patterned Preamble MAC [27], AREA-MAC [28], 1-hopMAC [30], DPS-MAC' [31], CMAC [32], MX-MAC [33], Preamble sampling with state information [29], SpeckMAC-D [19], MH-MAC [34], MIX-MAC [35], TrawMAC [36], MFP-MAC [37], RA-MAC [38], SEESAW [39] |
| Taking advantage of sync. info. | WiseMAC [13], CSMA-MPS [24], SyncWUF [21], TrawMAC [36], AS-MAC' [40], SCP-MAC [41], MIX-MAC [35]                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Adaptative duty cycle           | WiseMAC more bit [13], Stay Awake Promise [43], BEAM [44], AS-MAC [26], AREA-MAC [28], AS-MAC'' [45], extension to B-MAC+ [46], BoostMAC [47], MaxMAC [48], LWT-MAC [49], SCP-MAC [41], AADCC and DDCC [50], ZeroCal [51], X-MAC [25], EA-ALPL [53], Preamble Sampling with State Information [29]                                                                                          |

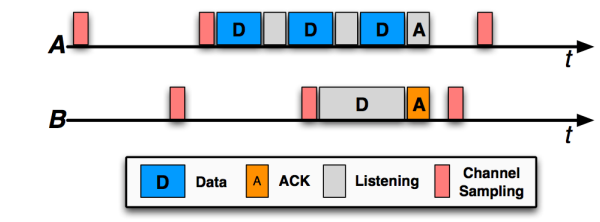
C. Cano, B. Bellalta, A. Sfairopoulou, and M. Oliver, "Low Energy Operation in WSNs: A Survey of Preamble Sampling MAC Protocols", Elsevier Computer Networks Journal, 2011.



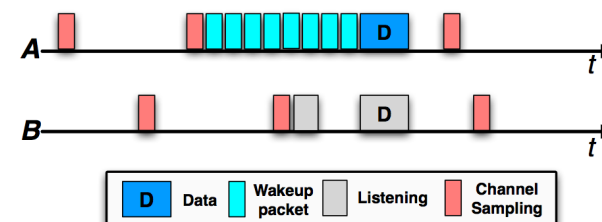
**B-MAC**



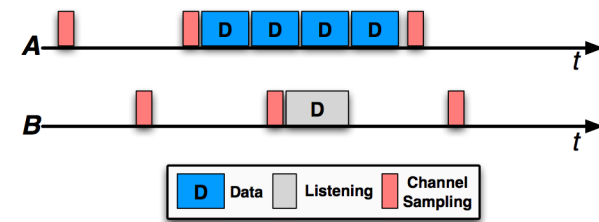
**X-MAC**



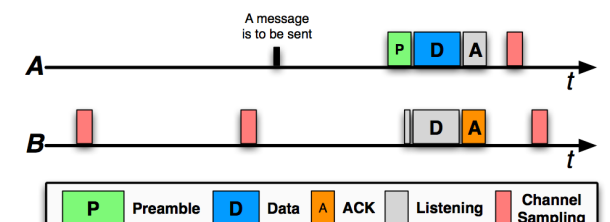
**MX-MAC**



**SPECKMAC-B**



**SPECKMAC-D**



**WISEMAC**

- Toujours des problèmes ouverts
  - Multi-canal efficace ? Routage sur des objets LPL ?

Y. Liu, H. Liu, Q. Yang, and S. Wu, "RM-MAC: A routing-enhanced multi-channel MAC protocol in duty-cycle sensor networks," IEEE ICC 2015  
M. Bezunartea, M. Gamallo, J. Tiberghien, and K. Steenhaut, "How Interactions between RPL and Radio Duty Cycling Protocols Affect QoS in Wireless Sensor Networks," ACM MSWiM (Q2SWinet), 2016.

- Réveil de la radio à la demande avec les puces Wake-up radio (WuR)
  - Fonctionnement de WuR dans les environnements bruités ?
  - Performances de WuR dans les environnements dynamiques ?

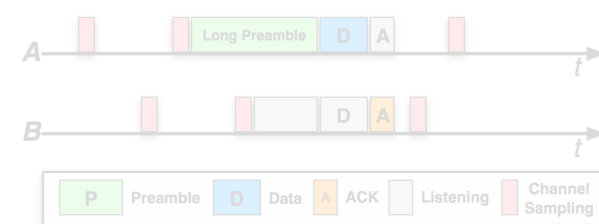
J. Oller, I. Demirkol, J. Casademont, J. Paradells, G. U. Gamm, and L. Reindl, "Has Time Come to Switch from Duty-cycled Mac Protocols to Wake-up Radio for Wireless Sensor Networks?" IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 24, no. 2, pp. 674–687, April 2016.

# Suite ?

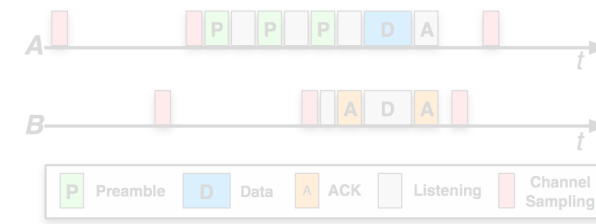
**Table 2**  
List of preamble sampling MAC protocols.

| Category                        | List of MAC protocols                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Basic                           | Preamble sampling [14], LPL [15], B-MAC [12]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Short preamble burst            | ENBMAC [17], BMAC+ [18], SpeckMAC-B [19], DPS-MAC [20], SyncWUF [21], SESP-MAC [22], TIGER [23], CSMA-MPS [24], X-MAC [25], AS-MAC [26], Patterned Preamble MAC [27], AREA-MAC [28], 1-hopMAC [30], DPS-MAC' [31], CMAC [32], MX-MAC [33], Preamble sampling with state information [29], SpeckMAC-D [19], MH-MAC [34], MIX-MAC [35], TrawMAC [36], MFP-MAC [37], RA-MAC [38], SEESAW [39] |
| Taking advantage of sync. info. | WiseMAC [13], CSMA-MPS [24], SyncWUF [21], TrawMAC [36], AS-MAC' [40], SCP-MAC [41], MIX-MAC [35]                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Adaptive duty cycle             | WiseMAC more bit [13], Stay Awake Promise [43], BEAM [44], AS-MAC [26], AREA-MAC [28], AS-MAC'' [45], extension to B-MAC+ [46], BoostMAC [47], MaxMAC [48], LWT-MAC [49], SCP-MAC [41], AADCC and DDCC [50], ZeroCal [51], X-MAC [25], EA-ALPL [53], Preamble Sampling with State Information [29]                                                                                         |

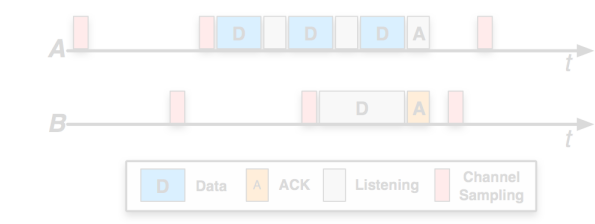
C. Cano, B. Bellalta, A. Sfairopoulou, and M. Oliver, "Low Energy Operation in WSNs: A Survey of Preamble Sampling MAC Protocols", Elsevier Computer Networks Journal, 2011.



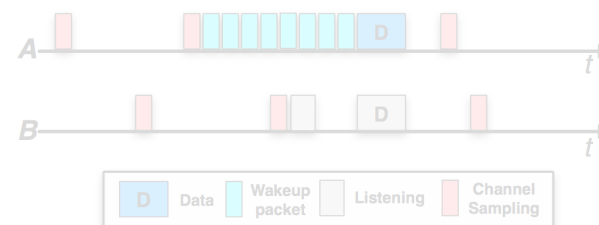
B-MAC



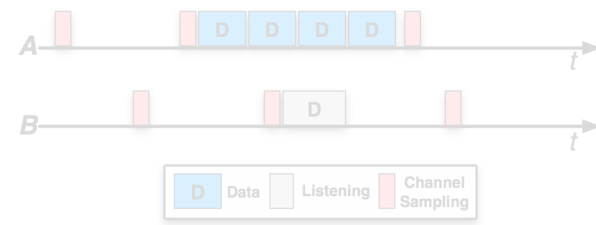
X-MAC



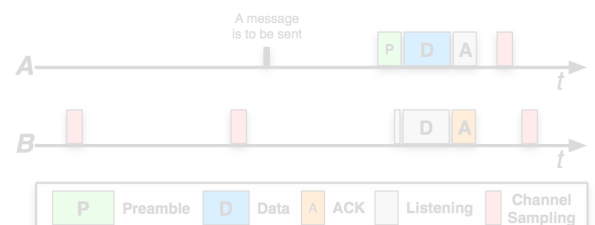
MX-MAC



SPECKMAC-B



SPECKMAC-D



WISEMAC

- **Toujours des problèmes ouverts**
  - Multi-canal efficace ? Routage sur des objets LPL ?

Y. Liu, H. Liu, Q. Yang, and S. Wu, "RM-MAC: A routing-enhanced multi-channel MAC protocol in duty-cycle sensor networks," IEEE ICC 2015.  
M. Bezunartea, M. Gamallo, J. Tiberghien, and K. Steenhaut, "How Interactions between RPL and Radio Duty Cycling Protocols Affect QoS in Wireless Sensor Networks," ACM MSWiM (Q2SWinet), 2016.

- Réveil de la radio à la demande avec les puces Wake-up radio (WuR)
  - Fonctionnement de WuR dans les environnements bruités ?
  - Performances de WuR dans les environnements dynamiques ?

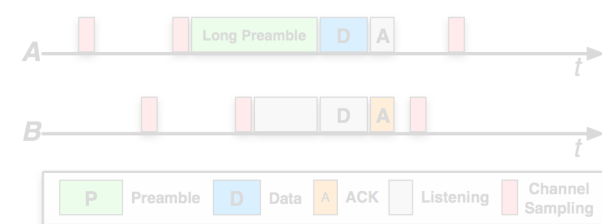
J. Oller, I. Demirkol, J. Casademont, J. Paradells, G. U. Gamm, and L. Reindl, "Has Time Come to Switch from Duty-cycled Mac Protocols to Wake-up Radio for Wireless Sensor Networks?" IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 24, no. 2, pp. 674–687, April 2016.

# Suite ?

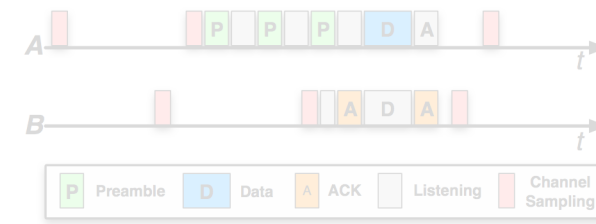
**Table 2**  
List of preamble sampling MAC protocols.

| Category                        | List of MAC protocols                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Basic                           | Preamble sampling [14], LPL [15], B-MAC [12]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Short preamble burst            | ENBMAC [17], B-MAC+ [18], SpeckMAC-B [19], DPS-MAC [20], SyncWUF [21], SESP-MAC [22], TIGER [23], CSMA-MPS [24], X-MAC [25], AS-MAC [26], Patterned Preamble MAC [27], AREA-MAC [28], 1-hopMAC [30], DPS-MAC' [31], CMAC [32], MX-MAC [33], Preamble sampling with state information [29], SpeckMAC-D [19], MH-MAC [34], MIX-MAC [35], TrawMAC [36], MFP-MAC [37], RA-MAC [38], SEESAW [39] |
| Taking advantage of sync. info. | WiseMAC [13], CSMA-MPS [24], SyncWUF [21], TrawMAC [36], AS-MAC' [40], SCP-MAC [41], MIX-MAC [35]                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Adaptative duty cycle           | WiseMAC more bit [13], Stay Awake Promise [43], BEAM [44], AS-MAC [26], AREA-MAC [28], AS-MAC'' [45], extension to B-MAC+ [46], BoostMAC [47], MaxMAC [48], LWT-MAC [49], SCP-MAC [41], AADCC and DDCC [50], ZeroCal [51], X-MAC [25], EA-ALPL [53], Preamble Sampling with State Information [29]                                                                                          |

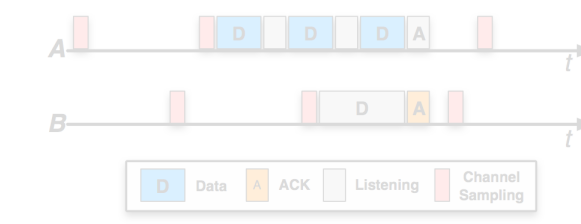
C. Cano, B. Bellalta, A. Sfairopoulou, and M. Oliver, "Low Energy Operation in WSNs: A Survey of Preamble Sampling MAC Protocols", Elsevier Computer Networks Journal, 2011.



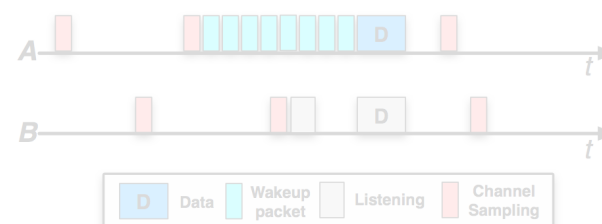
B-MAC



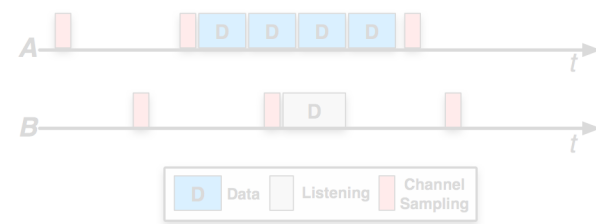
X-MAC



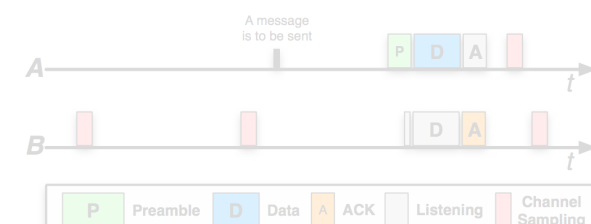
MX-MAC



SPECKMAC-B



SPECKMAC-D



WISEMAC

- **Toujours des problèmes ouverts**
  - Multi-canal efficace ? Routage sur des objets LPL ?

Y. Liu, H. Liu, Q. Yang, and S. Wu, "RM-MAC: A routing-enhanced multi-channel MAC protocol in duty-cycle sensor networks," IEEE ICC 2015.  
M. Bezunartea, M. Gamallo, J. Tiberghien, and K. Steenhaut, "How Interactions between RPL and Radio Duty Cycling Protocols Affect QoS in Wireless Sensor Networks," ACM MSWiM (Q2SWinet), 2016.

- **Réveil de la radio à la demande avec les puces Wake-up radio (WuR)**
  - Fonctionnement de WuR dans les environnements bruités ?
  - Performances de WuR dans les environnements dynamiques ?

J. Oller, I. Demirkol, J. Casademont, J. Paradells, G. U. Gamm, and L. Reindl, "Has Time Come to Switch from Duty-cycled Mac Protocols to Wake-up Radio for Wireless Sensor Networks?" IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 24, no. 2, pp. 674–687, April 2016.

# Déploiements

---

# Déploiements

---

## **An Analysis of a Large Scale Habitat Monitoring Application**

Robert Szewczyk<sup>†</sup>, Alan Mainwaring<sup>\*</sup>, Joseph Polastre<sup>‡</sup>, John Anderson<sup>†</sup> and David Culler<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>EECS Department      <sup>\*</sup>Intel Research Berkeley      <sup>‡</sup>College of the Atlantic  
University of California, Berkeley      2150 Shattuck Avenue      105 Eden St.  
Berkeley, California 94720      Berkeley, California 94704      Bar Harbor, ME 04609

# Déploiements

---

## **Fidelity and Yield in a Volcano Monitoring Sensor Network**

Geoff Werner-Allen\*, Konrad Lorincz\*, Jeff Johnson†, Jonathan Lees‡, and Matt Welsh\*

\* Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University

† Dept. of Earth Sciences, University of New Hampshire

‡ Dept. of Geological Sciences, University of North Carolina

## **An Analysis of a Large Scale Habitat Monitoring Application**

Robert Szewczyk†, Alan Mainwaring\*, Joseph Polastre†, John Anderson‡ and David Culler†  
†EECS Department      \*Intel Research Berkeley      ‡College of the Atlantic  
University of California, Berkeley      2150 Shattuck Avenue      105 Eden St.  
Berkeley, California 94720      Berkeley, California 94704      Bar Harbor, ME 04609

# Déploiements

---

## Hardware Design Experiences in ZebraNet

Pei Zhang, Christopher M. Sadler, Stephen A. Lyon, and Margaret Martonosi

Department of Electrical Engineering  
Princeton University  
{peizhang, csadler, lyon, mrm}@princeton.edu

## An Analysis of a Large Scale Habitat Monitoring Application

Robert Szewczyk<sup>†</sup>, Alan Mainwaring<sup>\*</sup>, Joseph Polastre<sup>†</sup>, John Anderson<sup>‡</sup> and David Culler<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>EECS Department      <sup>\*</sup>Intel Research Berkeley      <sup>‡</sup>College of the Atlantic  
University of California, Berkeley      2150 Shattuck Avenue      105 Eden St.  
Berkeley, California 94720      Berkeley, California 94704      Bar Harbor, ME 04609

## Fidelity and Yield in a Volcano Monitoring Sensor Network

Geoff Werner-Allen<sup>\*</sup>, Konrad Lorincz<sup>\*</sup>, Jeff Johnson<sup>†</sup>, Jonathan Lees<sup>‡</sup>, and Matt Welsh<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University

<sup>†</sup> Dept. of Earth Sciences, University of New Hampshire

<sup>‡</sup> Dept. of Geological Sciences, University of North Carolina



# Déploiements

---

## Hardware Design Experiences in ZebraNet

Pei Zhang, Christopher M. Sadler, Stephen A. Lyon, and Margaret Martonosi

Department of Electrical Engineering  
Princeton University  
{peizhang, csadler, lyon, mrm}@princeton.edu

## An Analysis of a Large Scale Habitat Monitoring Application

Robert Szewczyk<sup>†</sup>, Alan Mainwaring<sup>\*</sup>, Joseph Polastre<sup>†</sup>, John Anderson<sup>†</sup> and David Culler<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>EECS Department      <sup>\*</sup>Intel Research Berkeley      <sup>†</sup>College of the Atlantic  
University of California, Berkeley      2150 Shattuck Avenue      105 Eden St.  
Berkeley, California 94720      Berkeley, California 94704      Bar Harbor, ME 04609

## Evolution and Sustainability of a Wildlife Monitoring Sensor Network

Vladimir Dyo<sup>°</sup>, Stephen A. Ellwood<sup>†</sup>, David W. Macdonald<sup>†</sup>, Andrew Markham<sup>‡</sup>  
Cecilia Mascolo<sup>§</sup>, Bence Pásztor<sup>§</sup>, Salvatore Scellato<sup>§</sup>, Niki Trigoni<sup>‡</sup>, Ricklef Wohlers<sup>‡</sup>, Kharsim Yousef<sup>§</sup>  
<sup>°</sup>Dept. of Computer Science and Technology, University of Bedfordshire, UK    <sup>§</sup>Computer Lab, University of Cambridge, UK  
<sup>†</sup>Wildlife Conservation Research Unit, Dept. of Zoology and    <sup>‡</sup>Computing Laboratory, University of Oxford, UK

## Fidelity and Yield in a Volcano Monitoring Sensor Network

Geoff Werner-Allen<sup>\*</sup>, Konrad Lorincz<sup>\*</sup>, Jeff Johnson<sup>†</sup>, Jonathan Lees<sup>‡</sup>, and Matt Welsh<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University

<sup>†</sup> Dept. of Earth Sciences, University of New Hampshire

<sup>‡</sup> Dept. of Geological Sciences, University of North Carolina



# Déploiements

---

## Hardware Design Experiences in ZebraNet

Pei Zhang, Christopher M. Sadler, Stephen A. Lyon, and Margaret Martonosi

Department of Electrical Engineering  
Princeton University  
{peizhang, csadler, lyon, mrm}@princeton.edu

## An Analysis of a Large Scale Habitat Monitoring Application

Robert Szewczyk<sup>†</sup>, Alan Mainwaring<sup>\*</sup>, Joseph Polastre<sup>†</sup>, John Anderson<sup>†</sup> and David Culler<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>EECS Department      <sup>\*</sup>Intel Research Berkeley      <sup>†</sup>College of the Atlantic  
University of California, Berkeley      2150 Shattuck Avenue      105 Eden St.  
Berkeley, California 94720      Berkeley, California 94704      Bar Harbor, ME 04609

## Evolution and Sustainability of a Wildlife Monitoring Sensor Network

Vladimir Dyo<sup>°</sup>, Stephen A. Ellwood<sup>†</sup>, David W. Macdonald<sup>†</sup>, Andrew Markham<sup>‡</sup>  
Cecilia Mascolo<sup>§</sup>, Bence Pásztor<sup>§</sup>, Salvatore Scellato<sup>§</sup>, Niki Trigoni<sup>‡</sup>, Ricklef Wohlers<sup>‡</sup>, Kharsim Yousef<sup>§</sup>  
<sup>°</sup>Dept. of Computer Science and Technology, University of Bedfordshire, UK    <sup>§</sup>Computer Lab, University of Cambridge, UK  
<sup>†</sup>Wildlife Conservation Research Unit, Dept. of Zoology and    <sup>‡</sup>Computing Laboratory, University of Oxford, UK

## u-Healthcare SensorGrid Gateway for connecting Wireless Sensor Network and Grid Network

Se-Jin Oh and Chae-Woo Lee  
School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University  
San 5 Wonchon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, KOREA  
E-mail: {limit007, cwlee}@ajou.ac.kr

## Fidelity and Yield in a Volcano Monitoring Sensor Network

Geoff Werner-Allen<sup>\*</sup>, Konrad Lorincz<sup>\*</sup>, Jeff Johnson<sup>†</sup>, Jonathan Lees<sup>‡</sup>, and Matt Welsh<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University

<sup>†</sup> Dept. of Earth Sciences, University of New Hampshire

<sup>‡</sup> Dept. of Geological Sciences, University of North Carolina

# Déploiements

## Hardware Design Experiences in ZebraNet

Pei Zhang, Christopher M. Sadler, Stephen A. Lyon, and Margaret Martonosi

Department of Electrical Engineering  
Princeton University  
{peizhang, csadler, lyon, mrm}@princeton.edu

## An Analysis of a Large Scale Habitat Monitoring Application

Robert Szewczyk<sup>†</sup>, Alan Mainwaring<sup>\*</sup>, Joseph Polastre<sup>†</sup>, John Anderson<sup>†</sup> and David Culler<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>EECS Department      <sup>\*</sup>Intel Research Berkeley      <sup>†</sup>College of the Atlantic  
University of California, Berkeley      2150 Shattuck Avenue      105 Eden St.  
Berkeley, California 94720      Berkeley, California 94704      Bar Harbor, ME 04609

## Evolution and Sustainability of a Wildlife Monitoring Sensor Network

Vladimir Dyo<sup>°</sup>, Stephen A. Ellwood<sup>†</sup>, David W. Macdonald<sup>†</sup>, Andrew Markham<sup>‡</sup>  
Cecilia Mascolo<sup>§</sup>, Bence Pásztor<sup>§</sup>, Salvatore Scellato<sup>§</sup>, Niki Trigoni<sup>‡</sup>, Ricklef Wohlers<sup>‡</sup>, Kharsim Yousef<sup>§</sup>  
<sup>°</sup>Dept. of Computer Science and Technology, University of Bedfordshire, UK    <sup>§</sup>Computer Lab, University of Cambridge, UK  
<sup>†</sup>Wildlife Conservation Research Unit, Dept. of Zoology and    <sup>‡</sup>Computing Laboratory, University of Oxford, UK

## SensorScope: Out-of-the-Box Environmental Monitoring

Guillermo Barrenetxea, François Ingelrest, Gunnar Schaefer and Martin Vetterli  
LCAV, I&C School, EPFL, Switzerland  
{Guillermo.Barrenetxea, Francois.Ingelrest, Gunnar.Schaefer, Martin.Vetterli}@epfl.ch  
Olivier Couach and Marc Parlange  
EFLUM, ENAC School, EPFL, Switzerland  
{Olivier.Couach, Marc.Parlange}@epfl.ch

## u-Healthcare SensorGrid Gateway for connecting Wireless Sensor Network and Grid Network

Se-Jin Oh and Chae-Woo Lee  
School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University  
San 5 Wonchon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, KOREA  
E-mail: {limit007, cwlee}@ajou.ac.kr

# Déploiements

## Hardware Design Experiences in ZebraNet

Pei Zhang, Christopher M. Sadler, Stephen A. Lyon, and Margaret Martonosi

Department of Electrical Engineering  
Princeton University  
{peizhang, csadler, lyon, mrm}@princeton.edu

## An Analysis of a Large Scale Habitat Monitoring Application

Robert Szewczyk<sup>†</sup>, Alan Mainwaring<sup>\*</sup>, Joseph Polastre<sup>†</sup>, John Anderson<sup>†</sup> and David Culler<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>EECS Department      <sup>\*</sup>Intel Research Berkeley      <sup>†</sup>College of the Atlantic  
University of California, Berkeley      2150 Shattuck Avenue      105 Eden St.  
Berkeley, California 94720      Berkeley, California 94704      Bar Harbor, ME 04609

## Evolution and Sustainability of a Wildlife Monitoring Sensor Network

Vladimir Dyo<sup>°</sup>, Stephen A. Ellwood<sup>†</sup>, David W. Macdonald<sup>†</sup>, Andrew Markham<sup>‡</sup>  
Cecilia Mascolo<sup>§</sup>, Bence Pásztor<sup>§</sup>, Salvatore Scellato<sup>§</sup>, Niki Trigoni<sup>‡</sup>, Ricklef Wohlers<sup>‡</sup>, Kharsim Yousef<sup>§</sup>  
<sup>°</sup>Dept. of Computer Science and Technology, University of Bedfordshire, UK    <sup>§</sup>Computer Lab, University of Cambridge, UK  
<sup>†</sup>Wildlife Conservation Research Unit, Dept. of Zoology and    <sup>‡</sup>Computing Laboratory, University of Oxford, UK

## Integration of Wireless Sensor Networks into Cyberinfrastructure for Monitoring Hawaiian “Mountain-to-Sea” Environments

Michael H. Kido · Carsten W. Mundt · Kevin N. Montgomery ·  
Adam Asquith · David W. Goodale · Kenneth Y. Kaneshiro

## SensorScope: Out-of-the-Box Environmental Monitoring

Guillermo Barrenetxea, François Ingelrest, Gunnar Schaefer and Martin Vetterli  
LCAV, I&C School, EPFL, Switzerland  
{Guillermo.Barrenetxea, Francois.Ingelrest, Gunnar.Schaefer, Martin.Vetterli}@epfl.ch  
Olivier Couach and Marc Parlange  
EFLUM, ENAC School, EPFL, Switzerland  
{Olivier.Couach, Marc.Parlange}@epfl.ch

## u-Healthcare SensorGrid Gateway for connecting Wireless Sensor Network and Grid Network

Se-Jin Oh and Chae-Woo Lee  
School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University  
San 5 Wonchon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, KOREA  
E-mail: {limit007, cwlee}@ajou.ac.kr



# Déploiements

## Hardware Design Experiences in ZebraNet

Pei Zhang, Christopher M. Sadler, Stephen A. Lyon, and Margaret Martonosi

Department of Electrical Engineering  
Princeton University  
{peizhang, csadler, lyon, mrm}@princeton.edu

## An Analysis of a Large Scale Habitat Monitoring Application

Robert Szwedczyk<sup>†</sup>, Alan Mainwaring<sup>\*</sup>, Joseph Polastre<sup>†</sup>, John Anderson<sup>†</sup> and David Culler<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>EECS Department    <sup>\*</sup>Intel Research Berkeley    <sup>†</sup>College of the Atlantic  
University of California, Berkeley    2150 Shattuck Avenue    105 Eden St.  
Berkeley, California 94720    Berkeley, California 94704    Bar Harbor, ME 04609

## Fidelity and Yield in a Volcano Monitoring Sensor Network

Geoff Werner-Allen<sup>\*</sup>, Konrad Lorincz<sup>\*</sup>, Jeff Johnson<sup>†</sup>, Jonathan Lees<sup>‡</sup>, and Matt Welsh<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University

<sup>†</sup> Dept. of Earth Sciences, University of New Hampshire

<sup>‡</sup> Dept. of Geological Sciences, University of North Carolina

## Murphy Loves Potatoes

Experiences from a Pilot Sensor Network Deployment in Precision Agriculture

Koen Langendoen    Aline Baggio    Otto Visser

Delft University of Technology, The Netherlands  
Faculty of Electrical Engineering, Mathematics, and Computer Science

## Evolution and Sustainability of a Wildlife Monitoring Sensor Network

Vladimir Dyo<sup>°</sup>, Stephen A. Ellwood<sup>†</sup>, David W. Macdonald<sup>†</sup>, Andrew Markham<sup>‡</sup>  
Cecilia Mascolo<sup>§</sup>, Bence Pásztor<sup>§</sup>, Salvatore Scellato<sup>§</sup>, Niki Trigoni<sup>‡</sup>, Ricklef Wohlers<sup>‡</sup>, Kharsim Yousef<sup>§</sup>  
<sup>°</sup>Dept. of Computer Science and Technology, University of Bedfordshire, UK    <sup>§</sup>Computer Lab, University of Cambridge, UK  
<sup>†</sup>Wildlife Conservation Research Unit, Dept. of Zoology and    <sup>‡</sup>Computing Laboratory, University of Oxford, UK

## Integration of Wireless Sensor Networks into Cyberinfrastructure for Monitoring Hawaiian “Mountain-to-Sea” Environments

Michael H. Kido · Carsten W. Mundt · Kevin N. Montgomery ·  
Adam Asquith · David W. Goodale · Kenneth Y. Kaneshiro

## SensorScope: Out-of-the-Box Environmental Monitoring

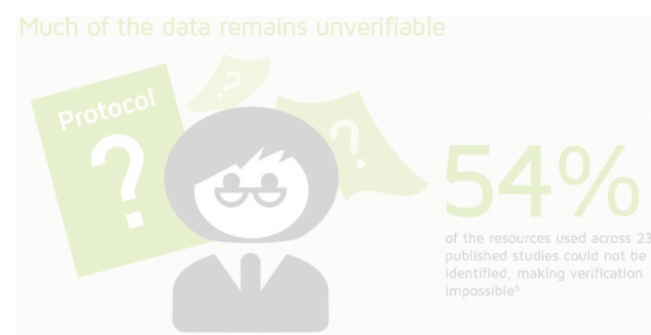
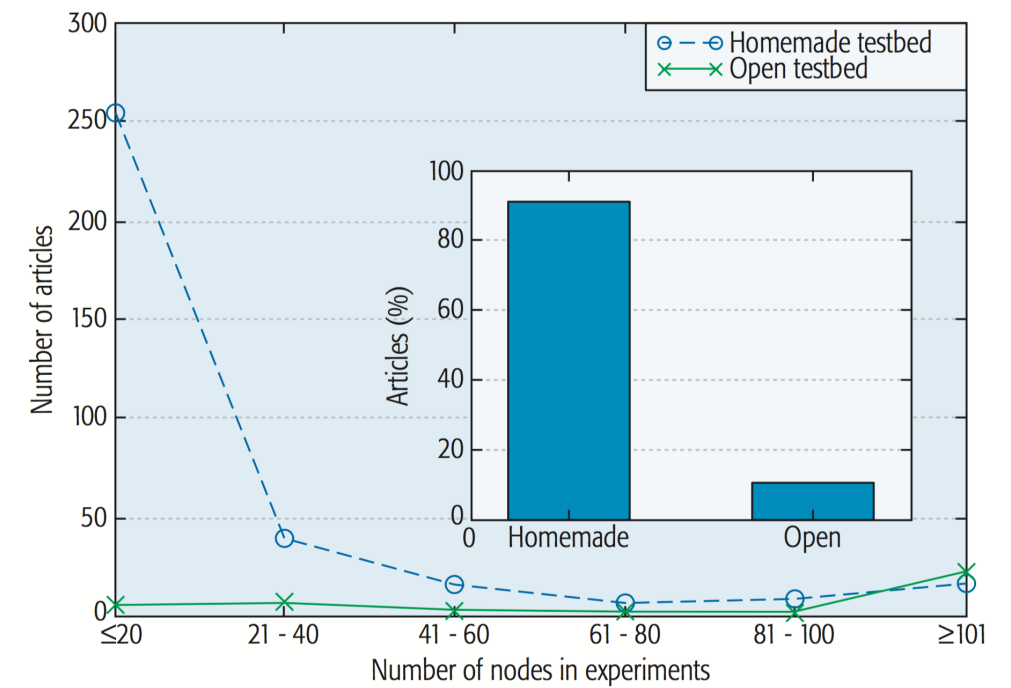
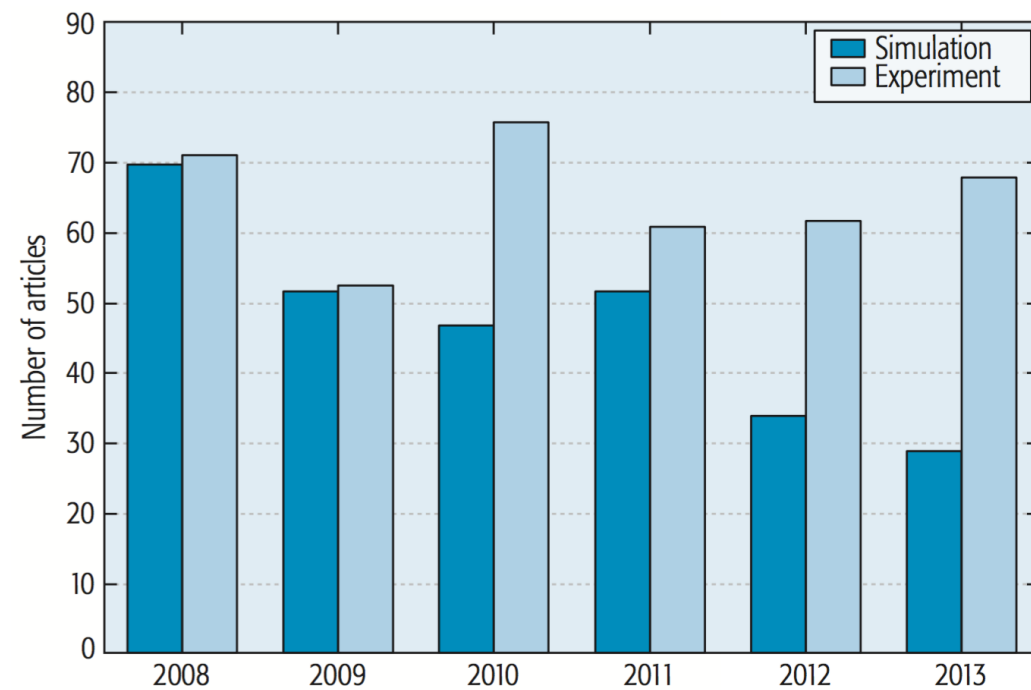
Guillermo Barrenetxea, François Ingelrest, Gunnar Schaefer and Martin Vetterli  
LCAV, I&C School, EPFL, Switzerland  
{Guillermo.Barrenetxea, Francois.Ingelrest, Gunnar.Schaefer, Martin.Vetterli}@epfl.ch

Olivier Couach and Marc Parlange  
EFLUM, ENAC School, EPFL, Switzerland  
{Olivier.Couach, Marc.Parlange}@epfl.ch

## u-Healthcare SensorGrid Gateway for connecting Wireless Sensor Network and Grid Network

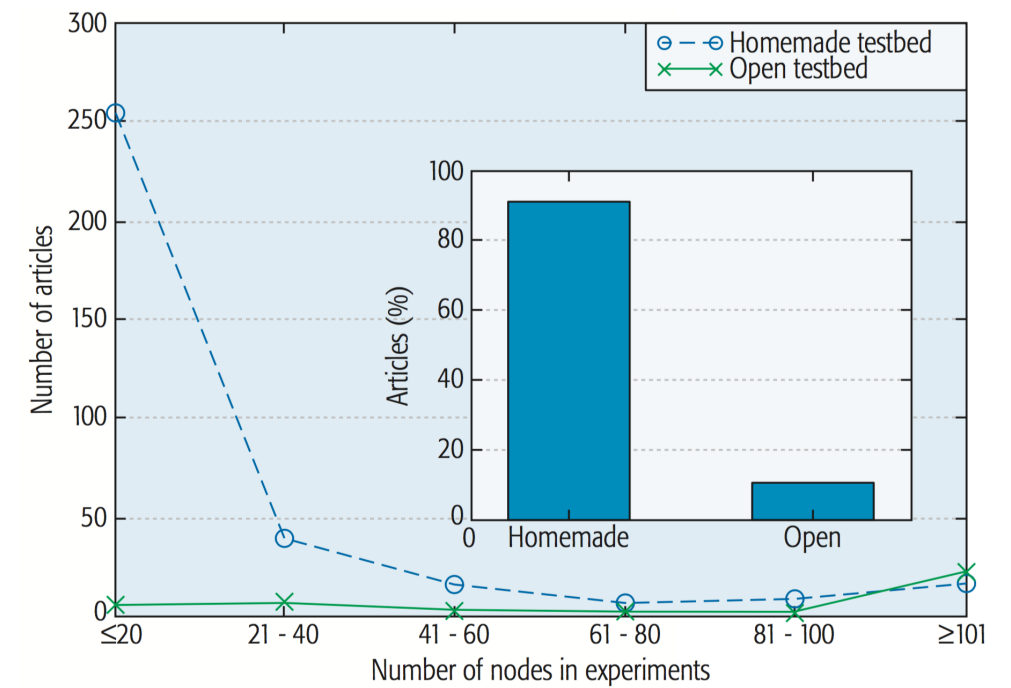
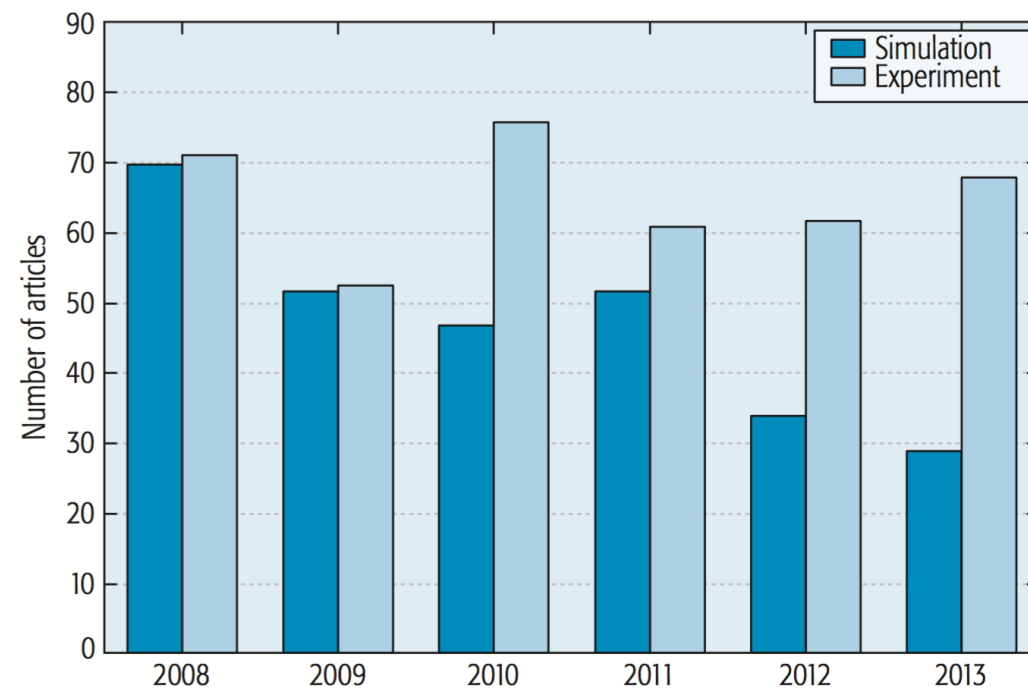
Se-Jin Oh and Chae-Woo Lee  
School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University  
San 5 Wonchon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, KOREA  
E-mail: {limit007, cwlee}@ajou.ac.kr

# Evaluation de performances



© <https://projects.ac/>

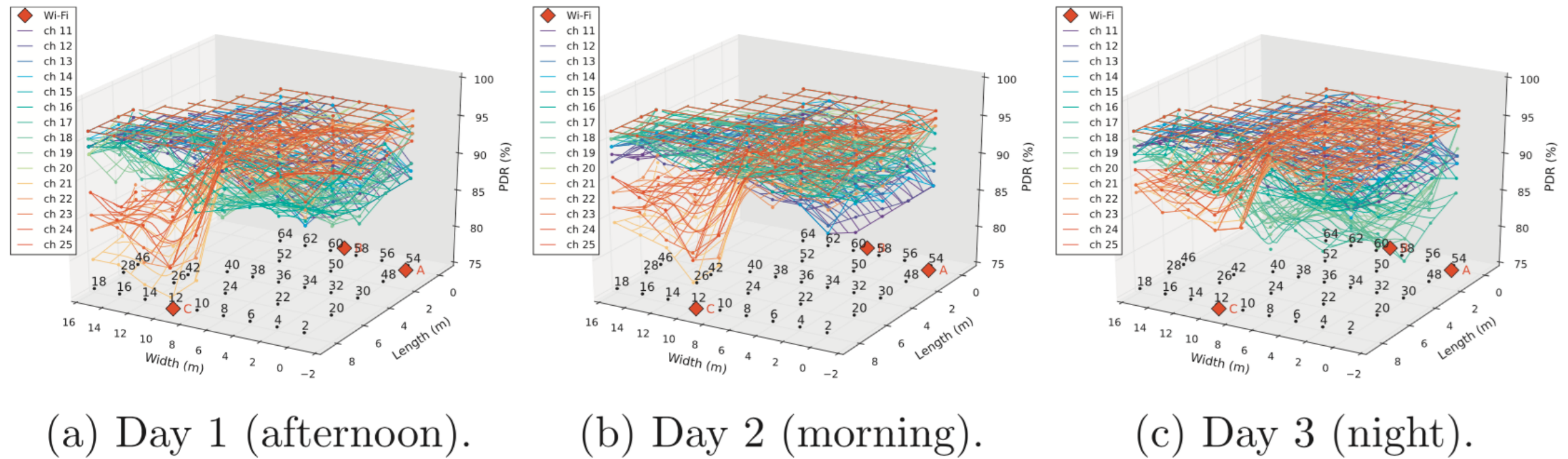
# Evaluation de performances



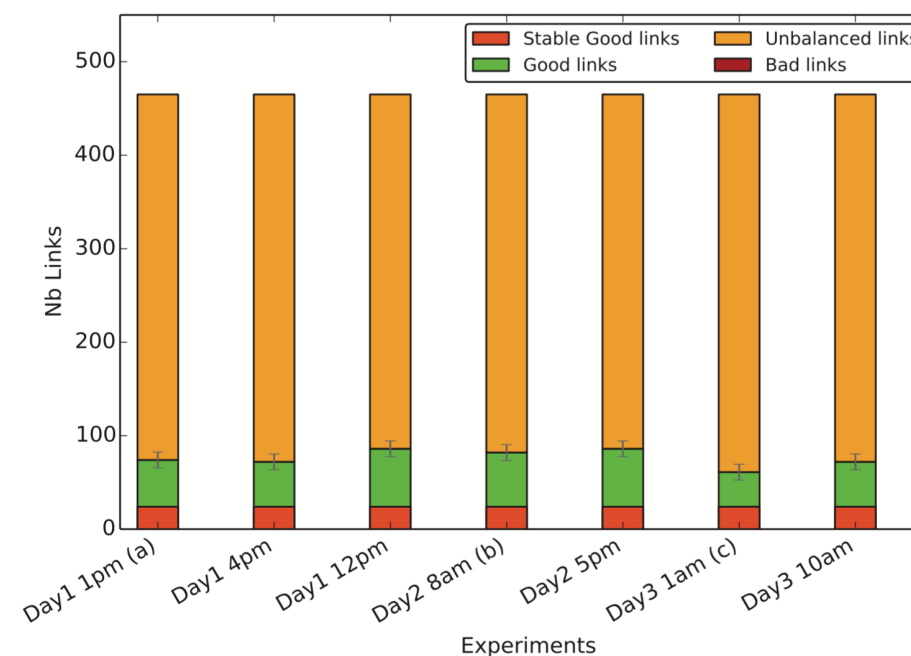
© <https://projects.ac/>



# Evaluation de performances



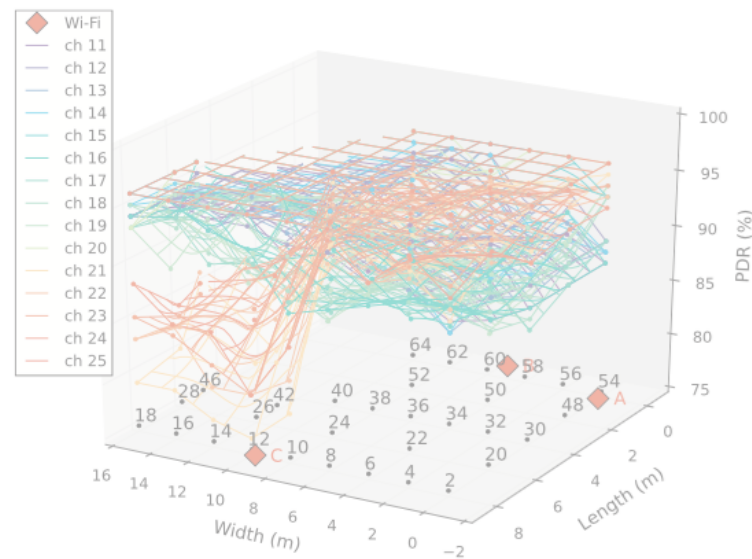
**Fig. 10.** PRR reproducibility over three different experiments: interference “free” scenario (Wi-Fi beacons are transmitted).



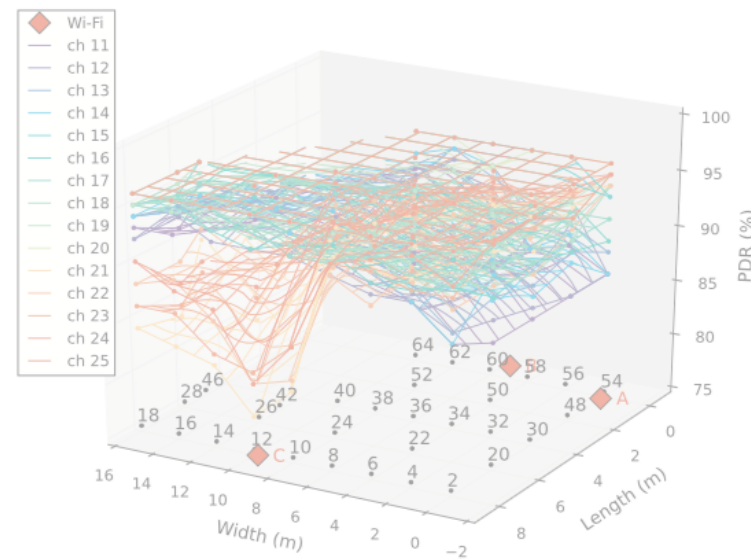
**Fig. 12.** Stable Good, Good and Unbalanced links over 7 different experiments in three different days.



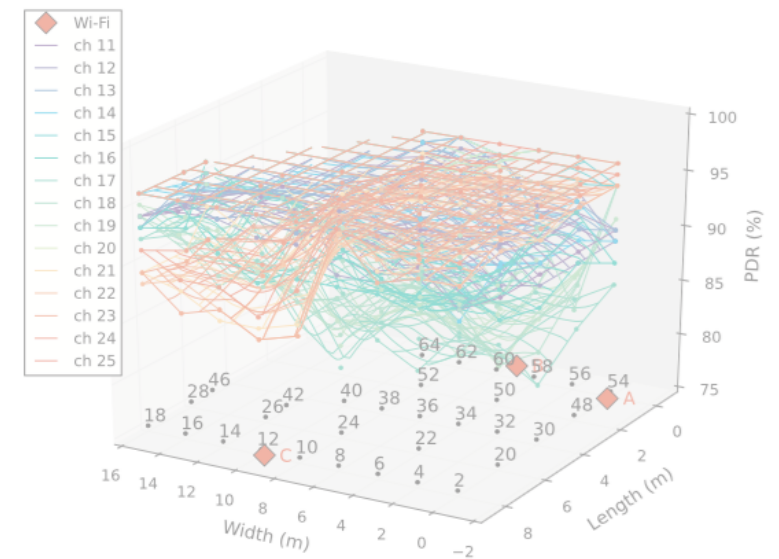
# Evaluation de performances



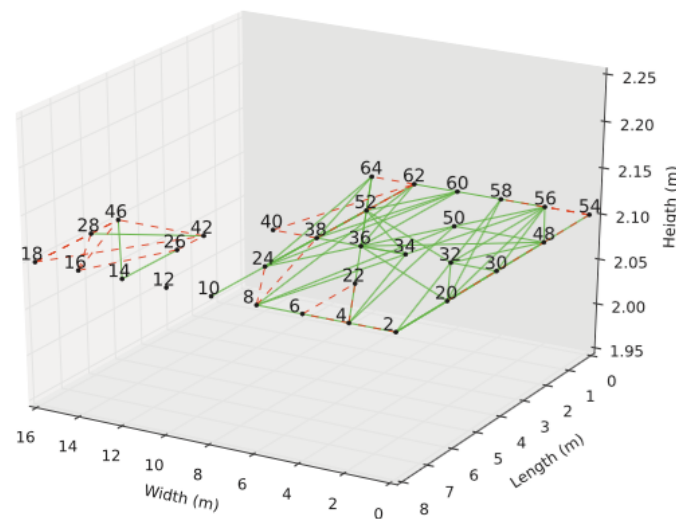
(a) Day 1 (afternoon).



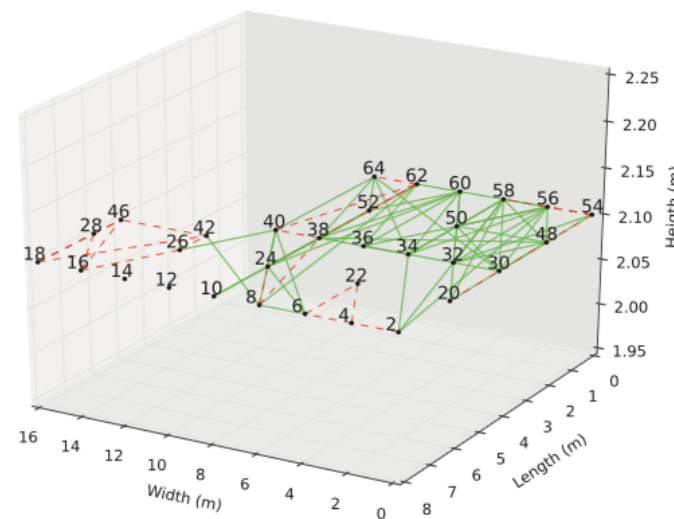
(b) Day 2 (morning).



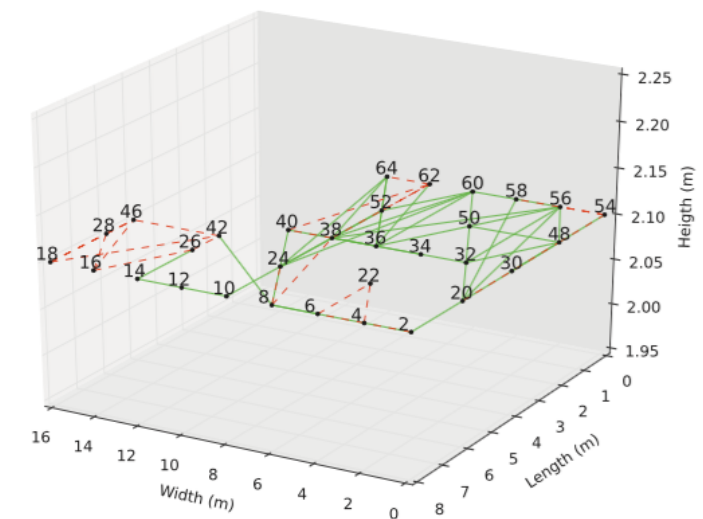
(c) Day 3 (night).



(a) Day 1 (afternoon).



(b) Day 2 (morning).



(c) Day 3 (night).

**Fig. 11.** Analysis of Good Links (in green), bidirectional PRR is over 90% for all 802.15.4 channels, and Stable Good Links (in red), bidirectional PRR is over 90% for all 802.15.4 channels in all experiments of three days. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

# Exemple d'évaluation : T-AAD

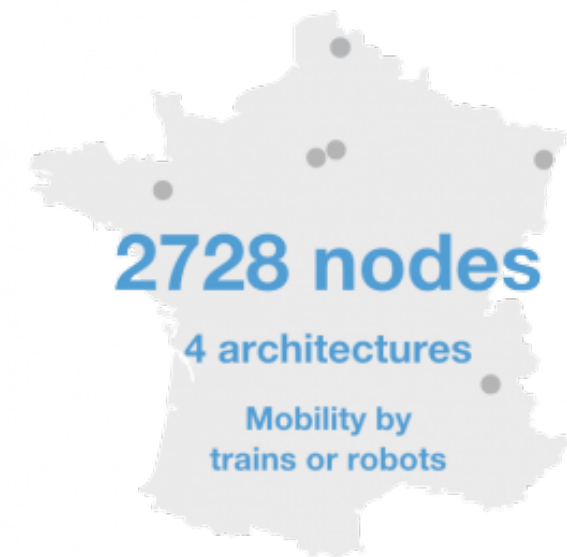
---

- **Simulations avec Cooja (ContikiOS)**
  - Sans contention (2 noeuds)
  - Avec contention (50 noeuds)
    - Disposition en grille et aléatoire
- **Expérimentations avec FIT IoT-LAB, banc d'essai à grande échelle**

# Exemple d'évaluation : T-AAD

- **Simulations avec Cooja (ContikiOS)**

- Sans contention (2 noeuds)
- Avec contention (50 noeuds)
  - Disposition en grille et aléatoire



- **Expérimentations avec FIT IoT-LAB, banc d'essai à grande échelle**

| Parameters                             |                                                           |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Application model                      | 10 pkts / 500 <i>ms</i>                                   |
| Routing model                          | Gradient                                                  |
| MAC model                              | X-MAC (i.e. 32, 125, 250 and 500 <i>ms</i> ) AADCC, T-AAD |
| Sampling Frequency: Initial            | 500ms                                                     |
| Sampling Frequency: $T_{\text{adapt}}$ | 32ms                                                      |

# Découverte des prochains sauts et association

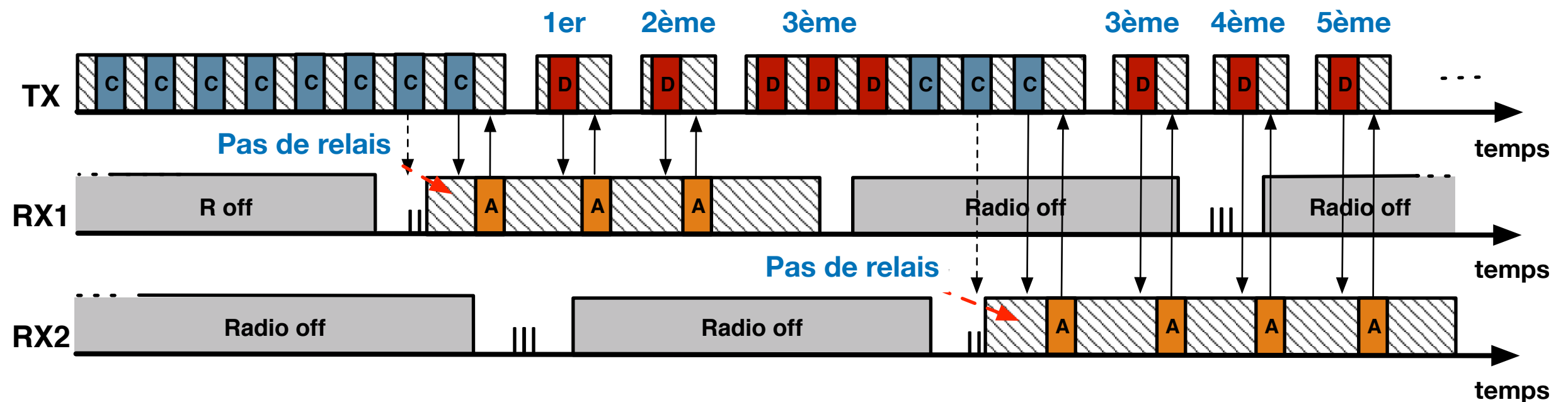
---

- **MobiDisc**
  - Récupérer rapidement sur perte de prochain saut (*Fast Recovery Mode*, FRM)

# Découverte des prochains sauts et association

- **MobiDisc**

- Récupérer rapidement sur perte de prochain saut (*Fast Recovery Mode, FRM*)



# LPL et les standards IEEE



IEEE 802.15.4e 2012

The coordinated sampled listening (CSL) mode is turned on when the PIB\* attribute *macCSLPeriod* is nonzero and turned off when *macCSLPeriod* is zero. In CSL mode, transmission, reception, and acknowledgment work as follows. Figure 34o illustrates the basic CSL operations.

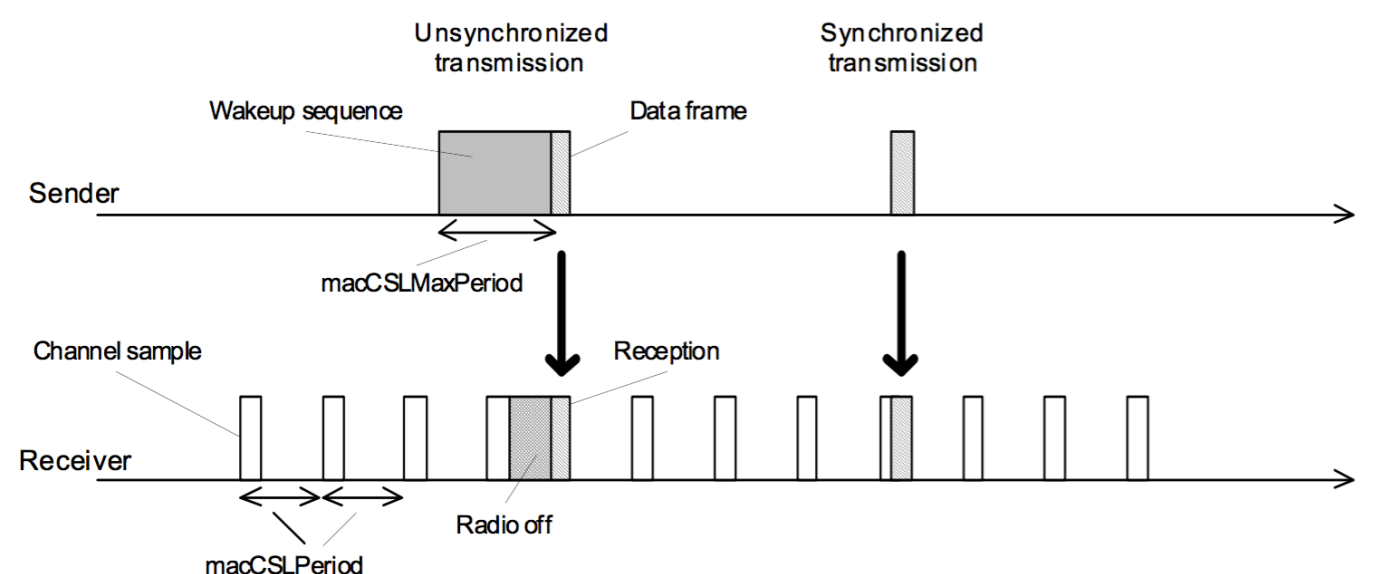


Figure 34o—Basic CSL operations



# LPL et les standards IEEE



IEEE 802.15.4e 2012

J. Zhou, A. E. Xhafa, R. Vedantham, R. Nuzzaci, A. Kandhalu and X. Lu, "Comparison of IEEE 802.15.4e MAC features," IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Seoul, 2014.

The coordinated sampled listening (CSL) mode is turned on when the PIB\* attribute *macCSLPeriod* is nonzero and turned off when *macCSLPeriod* is zero. In CSL mode, transmission, reception, and acknowledgment work as follows. Figure 34o illustrates the basic CSL operations.

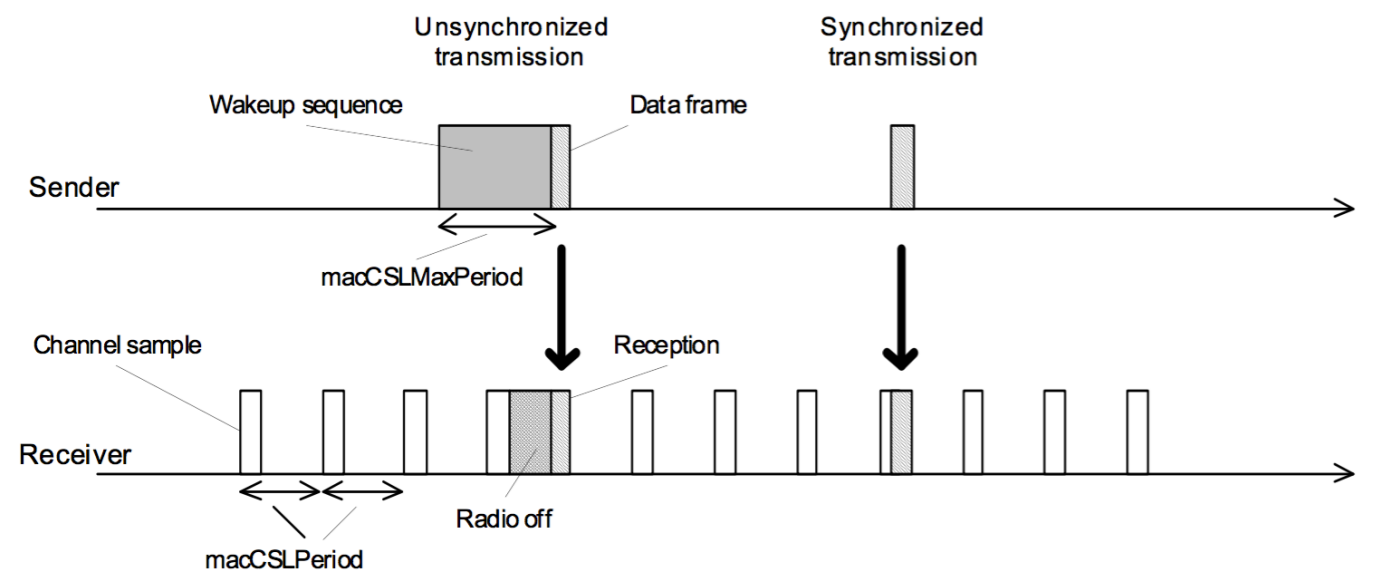


Figure 34o—Basic CSL operations

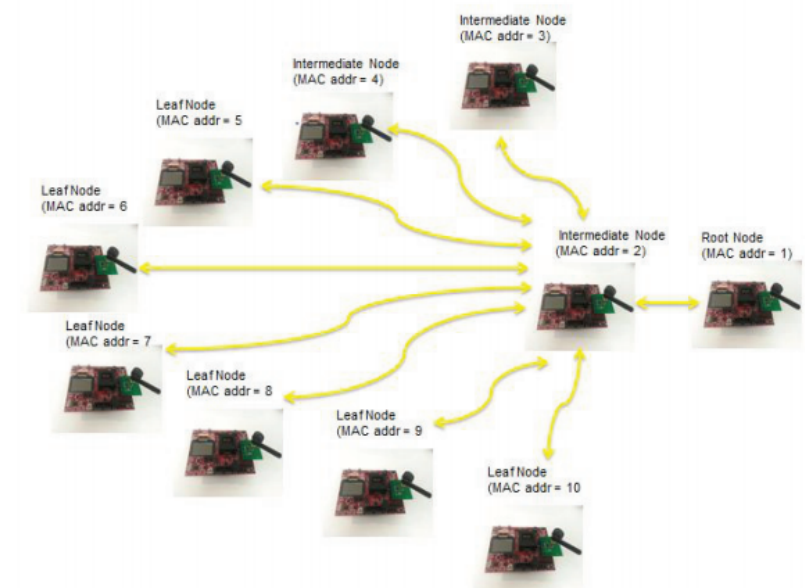
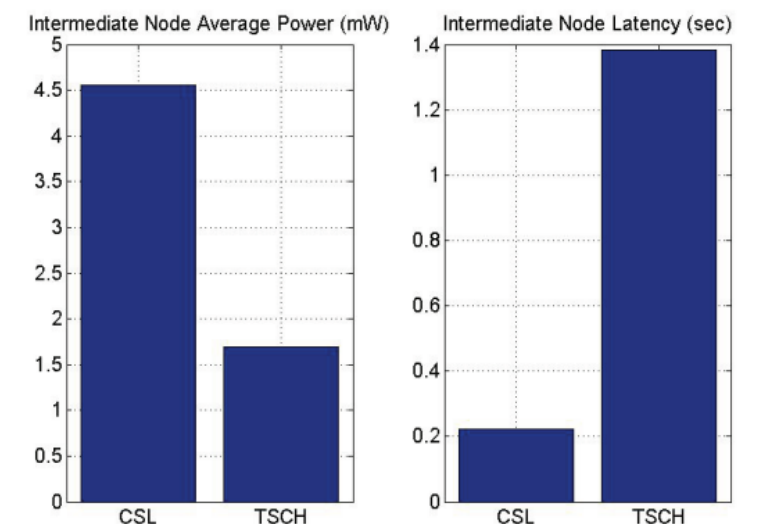


Fig. 11. Linear topology with several leaf nodes.







# Industrial Internet of Things (IIoT)



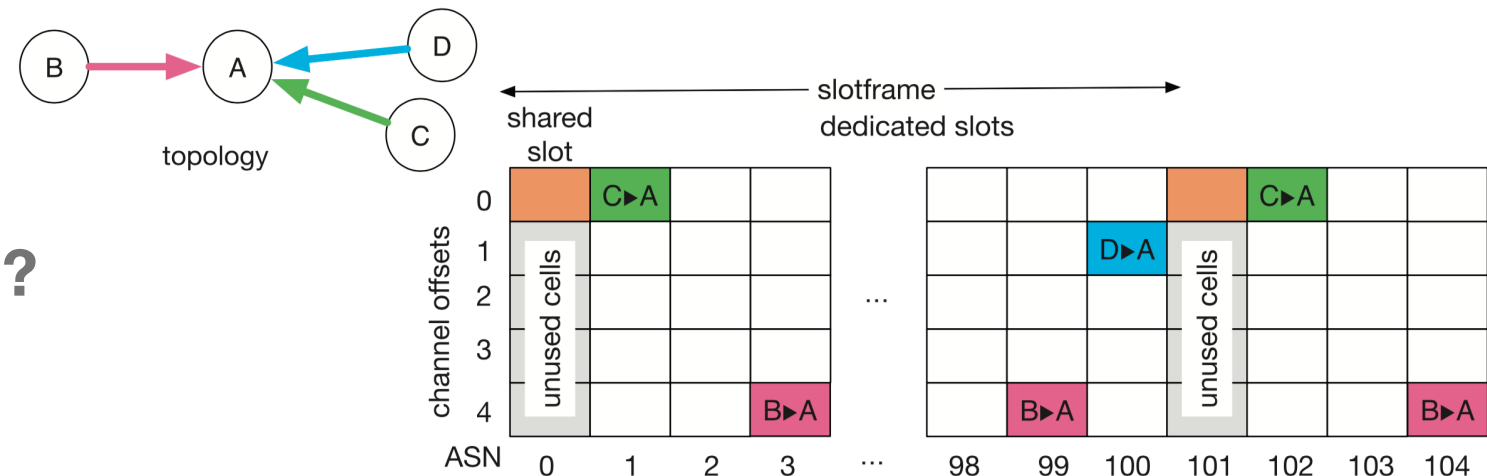
IEEE 802.15.4 2015-TSCH

- **Garanties (pertes, délais) ?**

- ➔ Approches synchrones

- **Robustesse, passage à l'échelle ?**

- ➔ Sauts de fréquence



- **Mise en oeuvre : Software-Defined Network (SDN)**

- Décisions centralisées

- Passage à l'échelle : hiérarchie de noeuds décisionnaires ?

- Connaissance à jour du réseau : modèle d'interférences ? détection de pannes ?

S. Sezer, S. Scott-Hayward, P.K. Chouhan, B. Fraser, D. Lake, J. Finnegan, N. Viljoen, M. Miller, N. Rao, **Are we ready for SDN? implementation challenges for software-defined networks**,  
IEEE Communications Magazine 51 (7), 36–43, 2013.

- **IIoT dynamique ?**

- Poussées de trafic : allocation de blocs pour tout lien sollicité

- Mobilité d'un noeud : allocation de blocs pour les voisins rencontrés en chemin

- ➔ Prévoir la qualité des liens ? Découvrir le voisinage et s'associer ?

R. Teles Hermeto, A. Gallais and F. Theoleyre. Passive Link Quality Estimation for Accurate and Stable Parent Selection in Dense 6TiSCH Networks. **Under submission**.



# Industrial Internet of Things (IIoT)



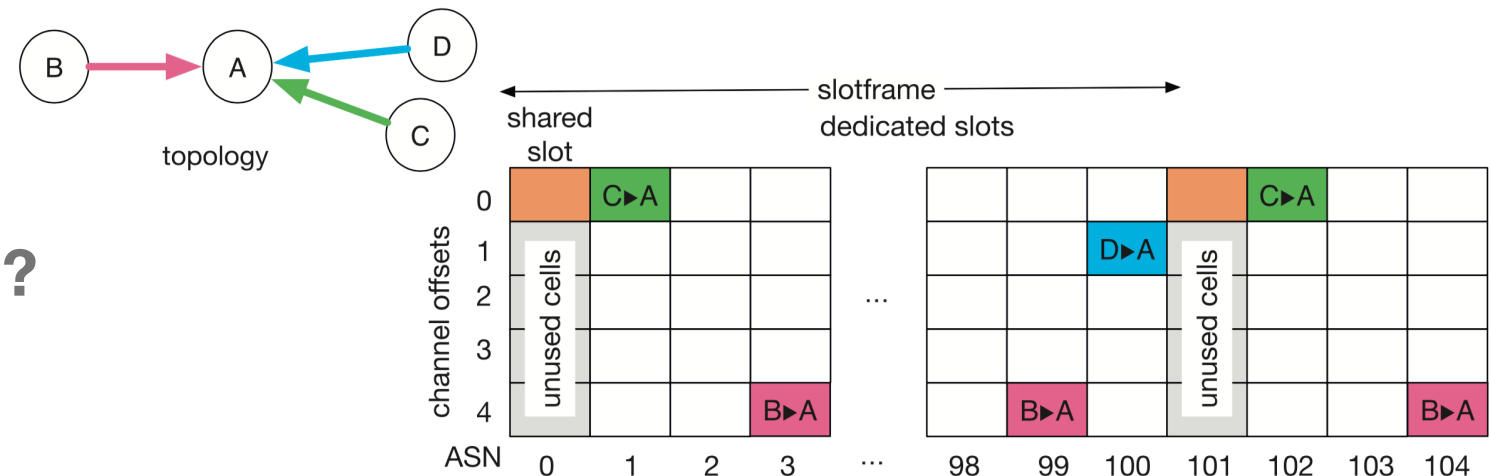
IEEE 802.15.4 2015-TSCH

- **Garanties (pertes, délais) ?**

- ➔ Approches synchrones

- **Robustesse, passage à l'échelle ?**

- ➔ Sauts de fréquence



- **Mise en oeuvre : Software-Defined Network (SDN)**

- Décisions centralisées

- Passage à l'échelle : hiérarchie de noeuds décisionnaires ?

- Connaissance à jour du réseau : modèle d'interférences ? détection de pannes ?

S. Sezer, S. Scott-Hayward, P.K. Chouhan, B. Fraser, D. Lake, J. Finnegan, N. Viljoen, M. Miller, N. Rao, **Are we ready for SDN? implementation challenges for software-defined networks**,  
IEEE Communications Magazine 51 (7), 36–43, 2013.

- **IIoT dynamique ?**

- Poussées de trafic : allocation de blocs pour tout lien sollicité

- Mobilité d'un noeud : allocation de blocs pour les voisins rencontrés en chemin

- ➔ Prévoir la qualité des liens ? Découvrir le voisinage et s'associer ?

R. Teles Hermeto, A. Gallais and F. Theoleyre. Passive Link Quality Estimation for Accurate and Stable Parent Selection in Dense 6TiSCH Networks. **Under submission**.



# Industrial Internet of Things (IIoT)



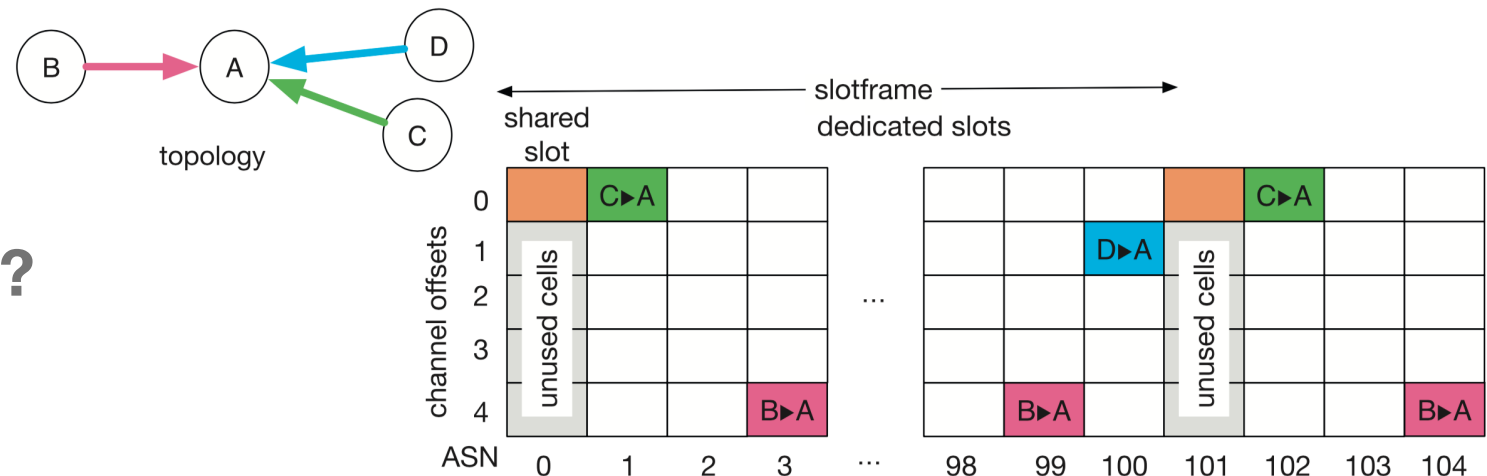
IEEE 802.15.4 2015-TSCH

- **Garanties (pertes, délais) ?**

- ➔ Approches synchrones

- **Robustesse, passage à l'échelle ?**

- ➔ Sauts de fréquence



- **Mise en oeuvre : Software-Defined Network (SDN)**

- Décisions centralisées

- Passage à l'échelle : hiérarchie de noeuds décisionnaires ?

- Connaissance à jour du réseau : modèle d'interférences ? détection de pannes ?

S. Sezer, S. Scott-Hayward, P.K. Chouhan, B. Fraser, D. Lake, J. Finnegan, N. Viljoen, M. Miller, N. Rao, **Are we ready for SDN? implementation challenges for software-defined networks**,  
IEEE Communications Magazine 51 (7), 36–43, 2013.

- **IIoT dynamique ?**

- Poussées de trafic : allocation de blocs pour tout lien sollicité

- Mobilité d'un noeud : allocation de blocs pour les voisins rencontrés en chemin

- ➔ Prévoir la qualité des liens ? Découvrir le voisinage et s'associer ?

R. Teles Hermeto, A. Gallais and F. Theoleyre. Passive Link Quality Estimation for Accurate and Stable Parent Selection in Dense 6TiSCH Networks. **Under submission**.

# Interactions Cloud / IoT

- **Producteurs/consommateurs de données**

- Cloud → Fog
  - Scenario : Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) et *Road Side Units (RSU)*
    - Nombreuses sources de données (*wearable devices*, véhicule, RSU, etc.)
    - Plusieurs classes de trafic (ex : applications de sécurité et de divertissement)
- ➡ Mobilité des données ? Qualité de service ? Lieux de décision ?



<https://www.openfogconsortium.org/>

- **Planification d'itinéraires multimodaux**

- Données utilisées/produites en temps-réel
- ➡ Accès à l'infrastructure de transport ?
- ➡ Routage dynamique ?



# Interactions Cloud / IoT

## • Producteurs/consommateurs de données

- Cloud → Fog
- Scenario : Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) et *Road Side Units (RSU)*
  - Nombreuses sources de données (*wearable devices*, véhicule, RSU, etc.)
  - Plusieurs classes de trafic (ex : applications de sécurité et de divertissement)

➡ Mobilité des données ? Qualité de service ? Lieux de décision ?

## • Planification d'itinéraires multimodaux

- Données utilisées/produites en temps-réel
- ➡ Accès à l'infrastructure de transport ?
- ➡ Routage dynamique ?



<https://www.openfogconsortium.org/>

