

## 2. Infrastructures réseaux pour les systèmes urbains

- Les réseaux dans la ville
- L'accès au médium
- Le routage
- Les réseaux cellulaires
- **Le déploiement des réseaux sans fil dans la ville**

Hervé Rivano

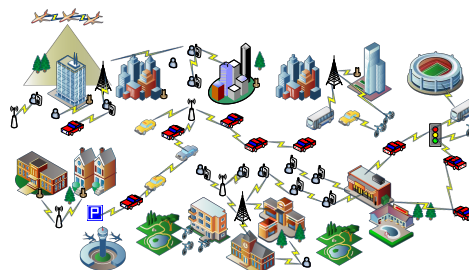
VILLES INTELLIGENTES : DÉFIS TECHNOLOGIQUES ET SOCIÉTAUX

Dans cette dernière séquence de la semaine, nous allons revoir les différents réseaux sans fil déployés en ville, et regarder les problématiques de déploiement.

## Les réseaux sans fil urbains

### Réseaux capillaires

- Architectures hétérogènes
  - ✓ cellulaire et multi-sauts
- Diversité : fonctionnement, déploiement



### Réseaux opérés

- Topologie et paramétrage maîtrisés
- Réseaux cellulaires, réseaux maillés, hot-spots

### Réseaux non-opérés

- Auto-organisation, adaptation à l'environnement
- Réseaux de capteurs, de véhicules, maillés *spontanés*

2

Donc, nous avons vu les **infrastructures capillaires**, qui sont des **architectures hétérogènes** avec à la fois des **réseaux cellulaires et multi-saut**, et une **diversité** à la fois **de fonctionnement, d'usage et de déploiement**.

On peut les répartir aussi en 2 autres catégories :

- les **réseaux opérés** d'une part, où un acteur central maîtrise à la fois la topologie et le paramétrage. C'est les réseaux cellulaires, les réseaux (maillés), les hot spot Wi-Fi d'une certaine manière.
- D'autre part, il y a les **réseaux non opérés**, ou plutôt des réseaux spontanés, qui vont avoir des mécanismes d'auto-organisation, qui vont s'adapter à l'environnement. C'est les réseaux de capteurs, les réseaux de véhicules et une certaine forme de réseau maillé dit spontanée.

## Déploiement des réseaux cellulaires

### Stations de bases « imposantes »

- Déploiement administré
- Objectif de couverture
- Points hauts, avec électricité et réseau filaire



### Small cells en renfort

- de couverture pour zones difficiles (vieilles villes)
- de capacité dans les zones de forte densité
- Electricité nécessaire
- Connexion radio fréquente

3

Pour les **réseaux cellulaires**, on a vu que les **stations de base** pouvaient être **imposantes**, avec des systèmes de climatisation :

- **déploiements administrés** pour aller sur les toits des bâtiments (points hauts), où il y a de l'électricité, du réseau filaire,
- **objectif de couverture du territoire.**

On déploie aussi des **small cell**, des petites cellules en renfort soit :

- de couvertures dans les zones difficiles, pour par exemple les vieilles villes où des vieux bâtiments bloquent les ondes,
- de capacités dans les zones où il y a une forte densité d'utilisateurs

Là encore, il faut de l'électricité. Mais par contre, on peut avoir une connectivité radio pour rattacher ces small cell aux macro-cellules et donc s'éviter d'avoir du réseau filaire.

## Déploiement de réseaux Wifi

### Déploiement institutionnel

- Forte couverture de lieux publics (gares, centres commerciaux)
- De plus en plus de villes couvrent les parcs, zones piétonnes, etc.
- Besoin d'électricité et réseau (radio ou filaire)



4

Pour les réseaux Wifi, il y a des **déploiements institutionnels** qui couvrent notamment en France beaucoup les gares, les centres commerciaux. Il y a de plus en plus de villes qui s'équipent pour couvrir les parcs, les zones piétonnes ou les zones de loisirs.

Pour déployer chaque borne WiFi, il faut à la fois de l'électricité et du réseau radio ou filaire.

## Déploiement de réseaux Wifi

### Déploiement institutionnel

- Couverture des lieux publics

### Déploiement résidentiel

- Réseaux publics partageant une « box » résidentielle
- Forte disponibilité dans les zones d'habitat dense
- Performances très variables



5

Enfin, il y a les **déploiements résidentiels**, c'est-à-dire les réseaux publics qui s'appuient sur les box que chacun a chez soi, et ouvrent un réseau public en utilisant la connectivité du résident.

Ça permet d'avoir une forte disponibilité de ces réseaux publics dans les zones d'habitat dense, mais avec des performances très variables selon les conditions de propagation, ou même la densité, qui fait parfois avoir trop d'interférences avec des réseaux.

## Déploiement de réseaux Wifi

### Déploiement institutionnel

- Couverture des lieux publics

### Déploiement résidentiel

- Réseaux publics partageant une « box » résidentielle

### Réseaux maillés communautaires

- Peine à émerger dans les pays développés
- Peut être un outil de dissidence/résistance



6

Enfin, on peut voir de manière plus marginale des **réseaux maillés communautaires**, qui ont peu émergé dans les réseaux, dans les pays développés, mais qui parfois dans les pays en émergence, ou en situation de guerre, peut être un outil de dissidence ou de résistance à un contrôle trop fort des systèmes de télécommunications.

## Les réseaux de capteurs sans fil

### Au cœur de la ville intelligente

- Mesure de l'environnement et de l'activité
- Continuum entre monde physique et monde numérique



### Un mythe : le déploiement aléatoire

- Hypothèse classique des travaux académiques
- Coût d'installation d'un capteur dans la chaussée : 1k€
  - ✓ Capteur + configuration + **travaux de voirie**
- Déploiement optimisé

7

Et enfin, les réseaux de capteurs sans fil qui sont au cœur de la ville intelligente, ce sont eux qui permettent ce **continuum entre le monde physique et le monde numérique**, en **mesurant l'environnement et de l'activité humaine**.

On a longtemps supposé que le déploiement de ces capteurs était aléatoire, notamment dans les travaux académiques. Et c'est tout de même un mythe.

Le coût d'installation d'un capteur, notamment d'installation d'un capteur dans la chaussée, c'est autour d'un millier d'euros, alors que le capteur lui-même coûte quelques dizaines d'euros, que sa configuration ne coûte pas grand-chose non plus. Et par contre, l'essentiel du coût, c'est les travaux de voirie qui permettent d'installer le capteur. Donc à ces coûts-là, en fait, le déploiement des capteurs est relativement optimisé. C'est ce qu'on va voir dans la suite.

## Déploiement contraint

La mesure a une pertinence spatiale

- Télémétrie : installation au compteur
- Smartparking : places de stationnement
- Phénomène physique :
  - ✓ Modèle prédictif ou historique de mesures
  - ✓ Identification et sélection de points pertinents



Intégration dans l'espace urbain

- Support d'installation
- Acceptation sociale / intrusion technologique
- Robustesse et protection

8

Il est contraint, parce qu'un capteur sert à mesurer quelque chose, et que cette mesure a une **pertinence spatiale**.

- Si on fait de la **télémétrie**, on va installer le capteur sur le compteur qu'on veut mesurer.
- Si on fait du parking intelligent, on va mettre le capteur sur la place de parking que l'on veut surveiller.
- Et si on veut mesurer un phénomène physique, comme la pollution, eh bien on a des modèles prédictifs ou des historiques de mesures qui permettent d'identifier et sélectionner les points pertinents où il faudrait installer ces capteurs-là.

On ne les installe pas n'importe où. Par ailleurs, ils doivent être **intégrés dans l'espace urbain**.

Ça veut dire qu'il faut y ait des supports d'installation. On ne met pas un capteur en train de flotter dans l'espace n'importe où.

Et puis il y a des problématiques d'acceptation sociale, de résistance à l'intrusion technologique, de la même manière qu'il y en a pour les antennes et réseaux cellulaires.

Enfin, puisqu'ils sont à l'extérieur et dans l'espace public, il faut que ces capteurs puissent être à la fois robustes aux intempéries, aux accidents et au vandalisme, et relativement protégés.



## Fonctionnement autonome

### Autonomie énergétique

- Déploiement plus libre
- Mécanismes d'endormissement



9

Pour cela, il faut qu'on mette en place des mécanismes de fonctionnement autonomes. Alors la première autonomie, c'est l'**autonomie énergétique**. On fait en sorte que ces capteurs n'aient pas besoin d'une connectivité électrique. Ça permet un **déploiement plus libre**. Et par contre, cela nécessite des **mécanismes d'endormissement**, des nœuds, pour économiser l'énergie.

## Fonctionnement autonome

Autonomie énergétique

Collecte cellulaire ou multi-sauts

- Cellulaire basse consommation (Sigfox, Lora)
  - ✓ Applications spécifiques
- Multi-sauts théoriquement meilleur, complexe en pratique
- Architectures hybrides



10

On va avoir des méthodes de **collectes en réseau radio**, donc **cellulaires** ou **multi-saut**, soit les cellulaires basse consommation type Sigfox et Lora, qui ont été évoqués dans la séquence précédente, pour des **applications très spécifiques**, ou alors des réseaux multi-saut qui sont en théorie meilleurs et plus efficaces, mais complexes à mettre en œuvre et en pratique. On regarde donc des **architectures hybrides**, avec quelques sauts et un collecteur connecté en cellulaire.

## Fonctionnement autonome

Autonomie énergétique

Collecte cellulaire ou multi-sauts

Auto-configuration – auto-organisation

- Configuration : coût financier, limite capacité de déploiement
- Endormissement, instabilité de l'environnement radio
- Résilience mais topologie non maîtrisée
- Routage important



11

Enfin, le fonctionnement autonome, c'est surtout de l'**auto-configuration**, de l'**auto-organisation**.

L'auto-configuration, pour maîtriser les coûts financiers et le temps de configuration, qui limitent la capacité de déploiement. Plus la configuration est compliquée, plus il faut un opérateur diplômé ou formé pour faire cette configuration, plus cela coûte cher. Mais surtout, moins il y a de main-d'œuvre disponible, et donc moins le déploiement peut se faire rapidement.

Les mécanismes d'endormissement, pour gagner en énergie, dont on parlait juste avant, et l'instabilité de l'environnement radio, donnent une connectivité intermittente. Et il faut que le réseau puisse s'adapter à cette intermittence.

Par ailleurs, l'auto-configuration, l'auto-organisation permettent d'avoir une certaine forme de résilience, donc notamment de réparation du réseau en cas de panne d'un nœud ou de la disparition d'un nœud. Par contre, la topologie qui en résulte est mal maîtrisée. Du moins, on ne la connaît pas à l'avance. Certains opérateurs n'aiment pas cela.

Mais surtout, ça pose des problématiques de routage qui ont été vues dans la séquence 3.

## Fonctionnement autonome

Autonomie énergétique

Collecte cellulaire ou multi-sauts

Auto-configuration – auto-organisation

Emergence d'opérateurs urbains ?

- 1 mesure – 1 réseau => réseau multi-applications
- « Service Level Agreement »
- Propriété et sécurité des données



12

Et donc, une des problématiques, un des enjeux, c'est d'arriver à **faire émerger un opérateur urbain**, et notamment un changement de paradigme.

Actuellement, quand on déploie un réseau de capteurs, c'est pour une application. Par exemple, la mesure des compteurs d'eau dans un quartier. Si on voulait faire la mesure des compteurs de gaz dans le même quartier, on déploierait un autre réseau. Cette situation n'est pas tenable et ne passe pas à l'échelle, parce que les réseaux sont en concurrence les uns avec les autres. Et donc, on voudrait des mécanismes qui permettent d'avoir des **réseaux multi applications**, potentiellement opérés par un acteur, qui permettent de garantir la qualité de service, de permettre de faire des contrats appelés **Service Level Agreement** entre un client et l'opérateur. Le client déploierait ces capteurs et l'opérateur lui garantirait la propriété, la sécurité des données, la collecte de ses données.

## Quel futur nous attend ?

Remplacer la précision par le nombre

- Aujourd'hui : quelques capteurs chers
  - ✓ Forte résolution numérique, faible résolution spatiale et temporelle
- Nano/micro électronique => capteurs low cost
  - ✓ Plus fortes erreurs de mesure, forte résolution spatio-temporelle
- Peut-on gagner en précision ?
  - ✓ Exploiter corrélations et redondance, re-calibration



13

### Quel futur nous attend ?

Aujourd'hui, quand on fait des mesures d'environnement notamment, on a souvent des **capteurs qui coûtent cher**, parce qu'ils sont calibrés, parce qu'ils sont très précis, parfois imposant, et qui permettent d'avoir une très bonne résolution numérique à l'endroit où ils sont déployés.

Mais par contre, une faible résolution spatiale et temporelle, parce qu'ils sont trop chers et trop gros.

Avec les progrès de la nano et la micro-électronique, on voit l'**émergence de capteurs à bas coûts**, plus petits, qui ont des **erreurs de mesures plus fortes**. Mais par contre, avec lesquels il est possible d'envisager une bien meilleure résolution spatio-temporelle.

Donc la question qui se pose à ce moment-là: est-ce qu'une meilleure résolution spatio-temporelle permet de gagner en précision par rapport à une mesure plus précise, mais moins dense?

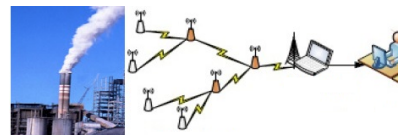
Pour cela, on pense devoir exploiter les corrélations entre les mesures de nœuds proches, les redondances, faire de la recalibration entre ces capteurs.

## Quel futur nous attend ?

Remplacer la précision par le nombre

Un exemple : mesure de pollution

- Dizaine de capteurs AirParif ou AirRhôneAlpes
  - ✓ Quelques mesures par heure
  - ✓ Centaine de milliers d'euros
- Capteurs ~ 1k€, qq mesures par minutes
  - ✓ Possibilité d'en installer 100 fois plus
  - ✓ Nécessité d'une infrastructure de collecte



14

Un exemple. Sur la mesure de pollution, dans l'illustration ici à droite, vous avez un capteur classique utilisé par des associations AirParif ou AirRhôneAlpes, qui mesurent la qualité de l'air et de l'environnement. Ces stations-là font quelques mesures par heure, et coûtent de l'ordre de la centaine de milliers d'euros. Aujourd'hui, on voit émerger des capteurs qui coûtent plutôt de l'ordre d'un millier d'euros, qui sont capables de faire et de remonter quelques mesures par minute. Moins bonnes, moins précises et peut-être moi larges. Mais on peut installer 100 fois plus de capteurs. Il faut à ce moment-là une infrastructure de collecte plus importante. Mais la question est donc: est-ce que 100 fois plus de capteurs qui mesurent moins bien sont meilleurs qu'un seul capteur?

## Encore plus dense ?

### Surveillance d'infrastructure

- Planification de maintenance
- Enjeu économique pour grands ouvrages (ponts, tours)
- Aujourd'hui : mesures rares, coûteuses et intrusives



### Nano-électronique et technologie RFID

- Capteurs peu chers, alimenté/connecté comme RFID
- Noyés dans le béton, déploiement quasi-aléatoire

### Campagnes de mesure plus fréquentes

- Plus d'intervention massive, voire d'interruption de fonctionnement
- Résolution spatiale et temporelle compense qualité de mesure ?

15

L'idée de remplacer la qualité des nœuds par la densité peut s'illustrer aussi sur un autre type d'application, qui est la **surveillance d'infrastructures**. C'est-à-dire un pont, une tour ou un barrage, on va vouloir faire de la planification de maintenance pour essayer d'éviter les cassures, plutôt que de les réparer. C'est un enjeu économique majeur pour les grands ouvrages, notamment urbains.

Aujourd'hui, la méthode consiste à faire des mesures assez rares, plutôt de l'ordre d'une fois par an, qui sont très coûteuses parce qu'il faut déployer les capteurs pour cette mesure :

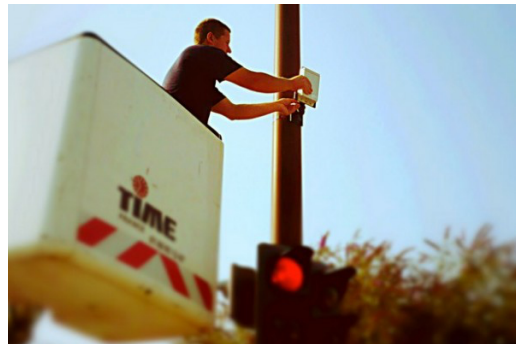
- Elles sont intrusives, parce que ce sont des gros capteurs, très précis,
- Elles coûtent cher aussi, parce qu'il faut des experts pour placer et calibrer les capteurs.

Pour certains types de mesures, avec des **nano-électroniciens**, avec l'utilisation de **technologies ressemblant au tag (RFID)**, on peut imaginer des **capteurs très peu chers**, alimentés et connectés comme un tag (RFID), donc par radio, qui puissent être **noyés dans le béton**. Donc avoir un **déploiement quasi aléatoire** qui revient aux fondements de la littérature académique.

À partir de ce moment-là, on peut avoir des **campagnes de mesures très fréquentes, sans interventions massives ou même d'interruptions de fonctionnement**, comme ça peut avoir lieu. On a une **résolution spatiale et temporelle** qui est **largement plus grande** que ce qu'on a avec les méthodes actuelles.

## Les défis du déploiement

- Concernent principalement les capteurs
  - Et les points de collecte
- Faire émerger des opérateurs urbains
- Remplacer la précision par le nombre



Comprendre les phénomènes et activités urbaines  
Obtenir un maillage dense de mesures

16

Donc pour conclure, les **défis du déploiement** des réseaux sans fil en milieu urbain concernent principalement les **capteurs et les points de collecte de leurs données**. Il faut **faire émerger des opérateurs urbains**, sans lesquelles il sera difficile de passer à l'échelle de déploiement réellement dense dans la ville. Enfin, il faut se donner les moyens d'arriver à **remplacer la précision de quelques capteurs par le nombre**, la densité de déploiement de capteurs moins précis et moins chers.

C'est comme ça qu'on arrivera à :

- **comprendre les phénomènes et les activités urbaines et à les mesurer,**
- **obtenir un maillage dense des mesures.**



## Illustrations & photos : crédits

p. 2, p. 3 : droits réservés

p. 4-6 : clipart Microsoft

p. 7-8 : droits réservés IOT-Lab : <https://www.iot-lab.info/new-m3-testbed-in-lille/>

p. 9-12 : droits réservés

p. 13-14 : droits réservés

p. 15 : droits réservés

p. 16 : crédit photo Hikob ©