



# Prototypage et Validation de Micro et Nanocapteurs pour la Ville Durable

Bérengère Lebental

**sense** CITY



[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

# Un projet UPE

UNIVERSITÉ  
— PARIS-EST

IFSTTAR

ESIEE  
PARIS

CSTB  
le futur en construction

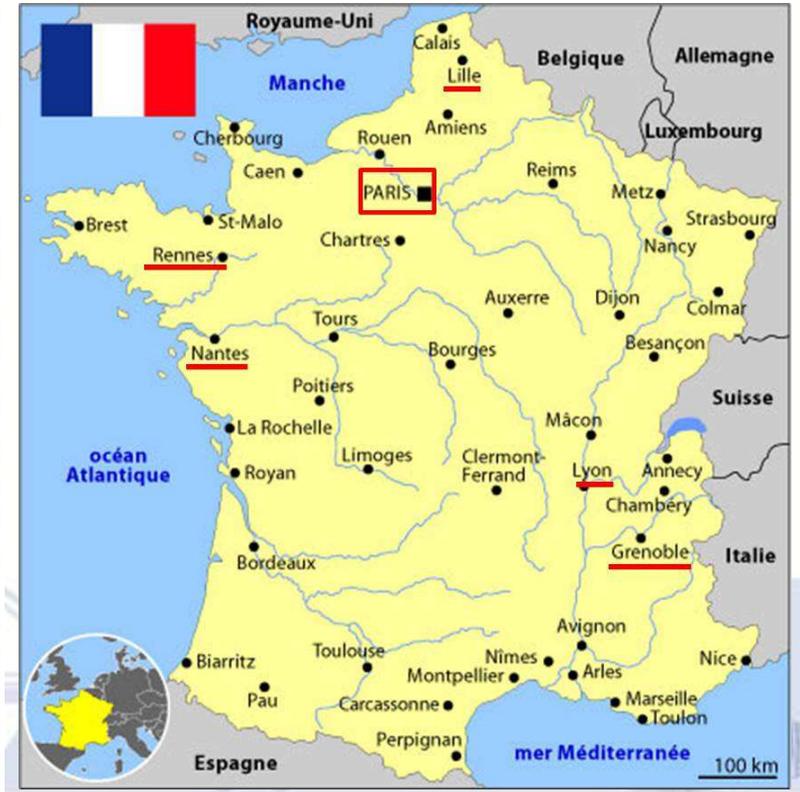
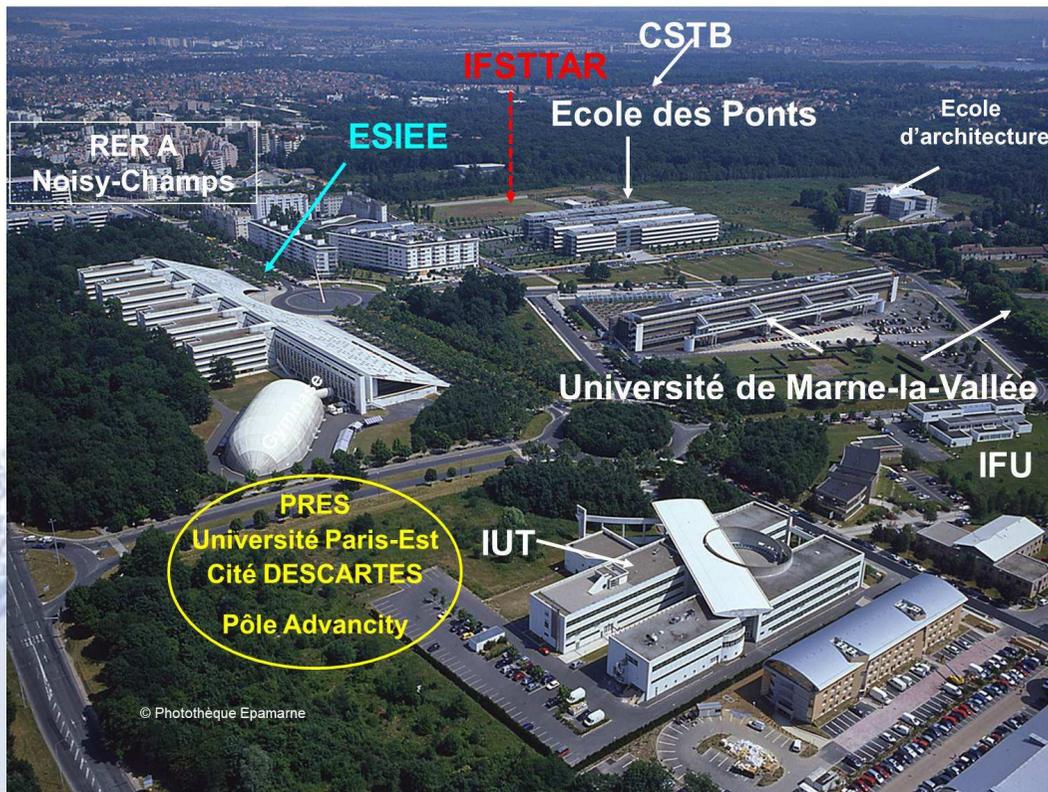
LAICM

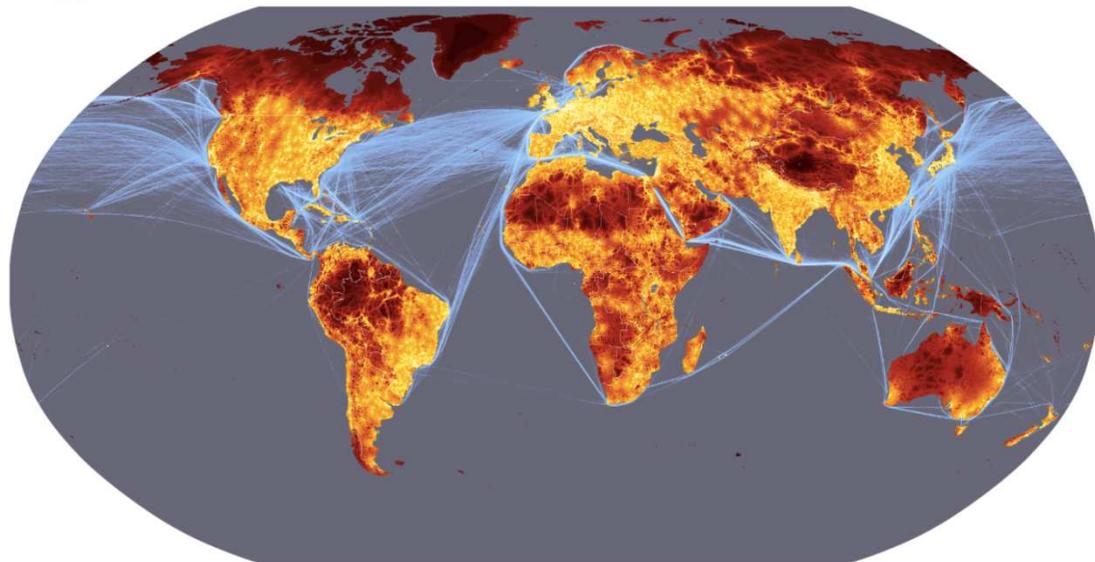
ÉCOLE  
POLYTECHNIQUE  
UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY

CNRS

Inria  
INSTITUT NATIONAL SUPÉRIEUR  
DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE

UP  
EM  
UNIVERSITÉ  
PARIS-EST  
MARNE-LA-VALLÉE





54%

La part de la population mondiale urbaine en 2014

350 000 morts/an

Liés à la qualité de l'air en Europe

4000 milliards de kg

de déchets par an

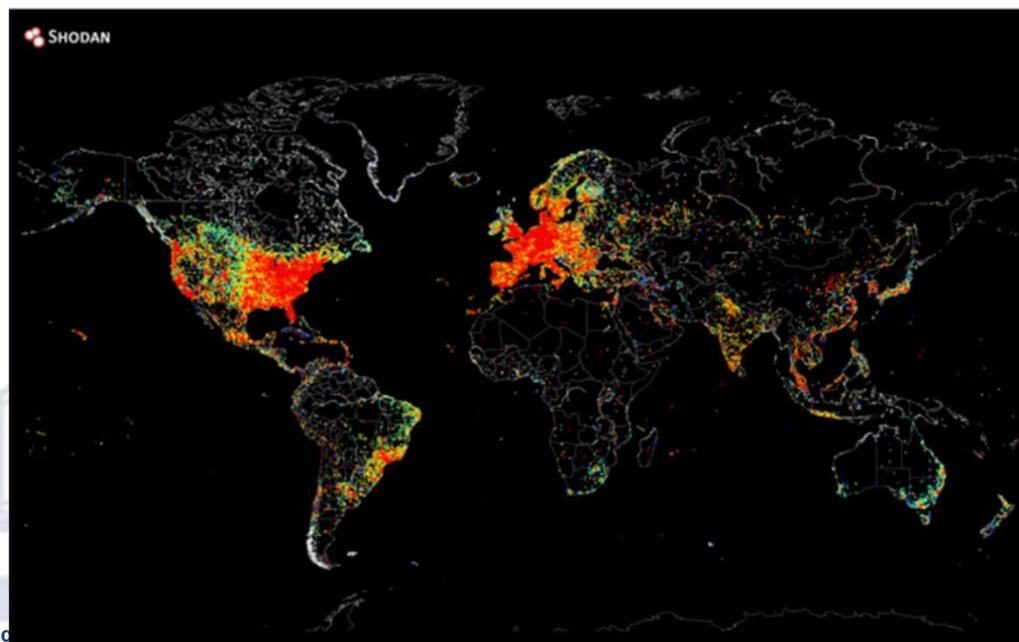
## Exploiter la révolution numérique pour rendre nos villes plus respectueuses de l'environnement

7 Milliards

Le nombre de téléphones portables en 2014

20 Milliards de \$

Le marché des objets connectés en 2014





# Créer un Internet des Capteurs

Pour mesurer massivement la ville au plus près des citoyens

**Rendre la Ville Sensible pour améliorer son fonctionnement au quotidien**

Construire des outils d'aide à la décision pour le citoyen, l'aménageur et le gestionnaire





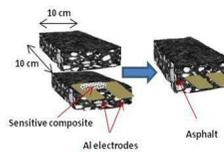
# Une démarche en 3 temps pour de nouveaux outils d'aide à la décision

Du capteur (1) à la modélisation (2) jusqu'à la représentation des phénomènes (3)

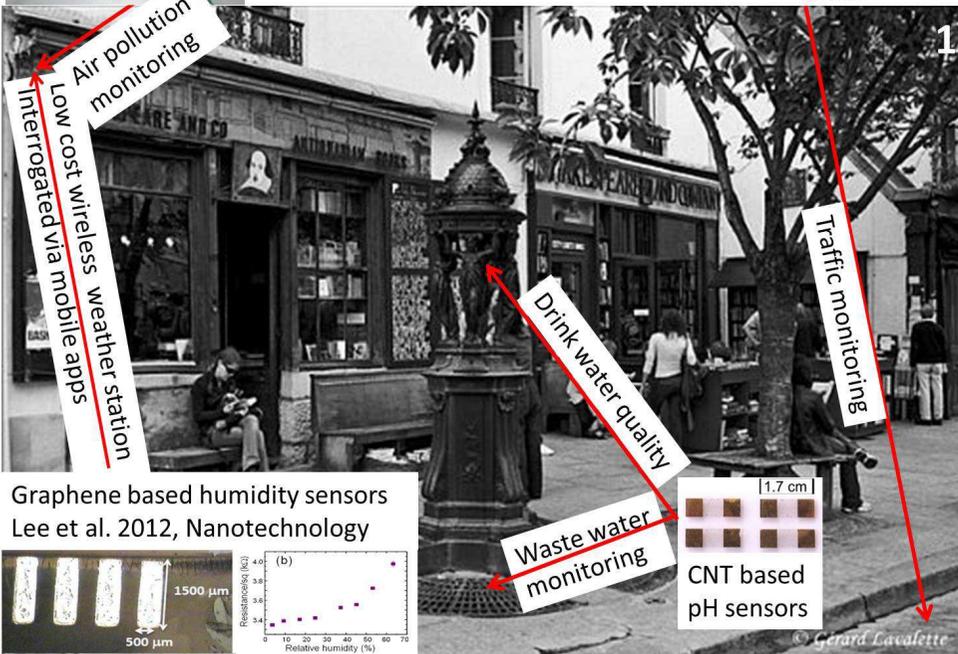
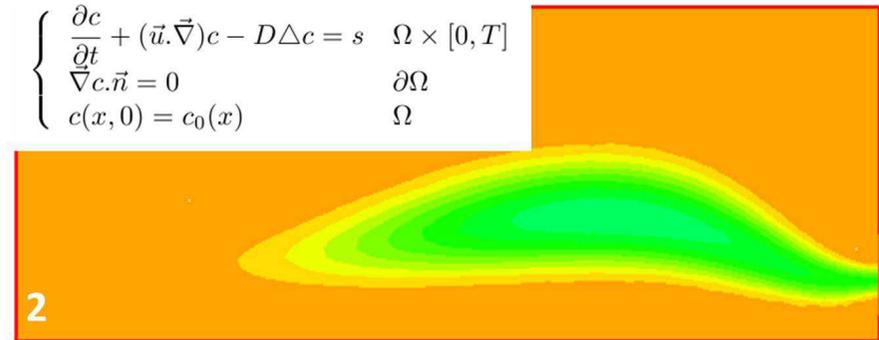


Microchromatograph  
Cesar et al., IEEE MEMS 2013

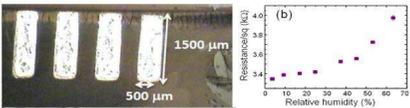
Smart asphalt  
B. Lebental et al. Patent 2014



$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})c - D\Delta c = s & \Omega \times [0, T] \\ \vec{\nabla}c \cdot \vec{n} = 0 & \partial\Omega \\ c(x, 0) = c_0(x) & \Omega \end{cases}$$



Graphene based humidity sensors  
Lee et al. 2012, Nanotechnology

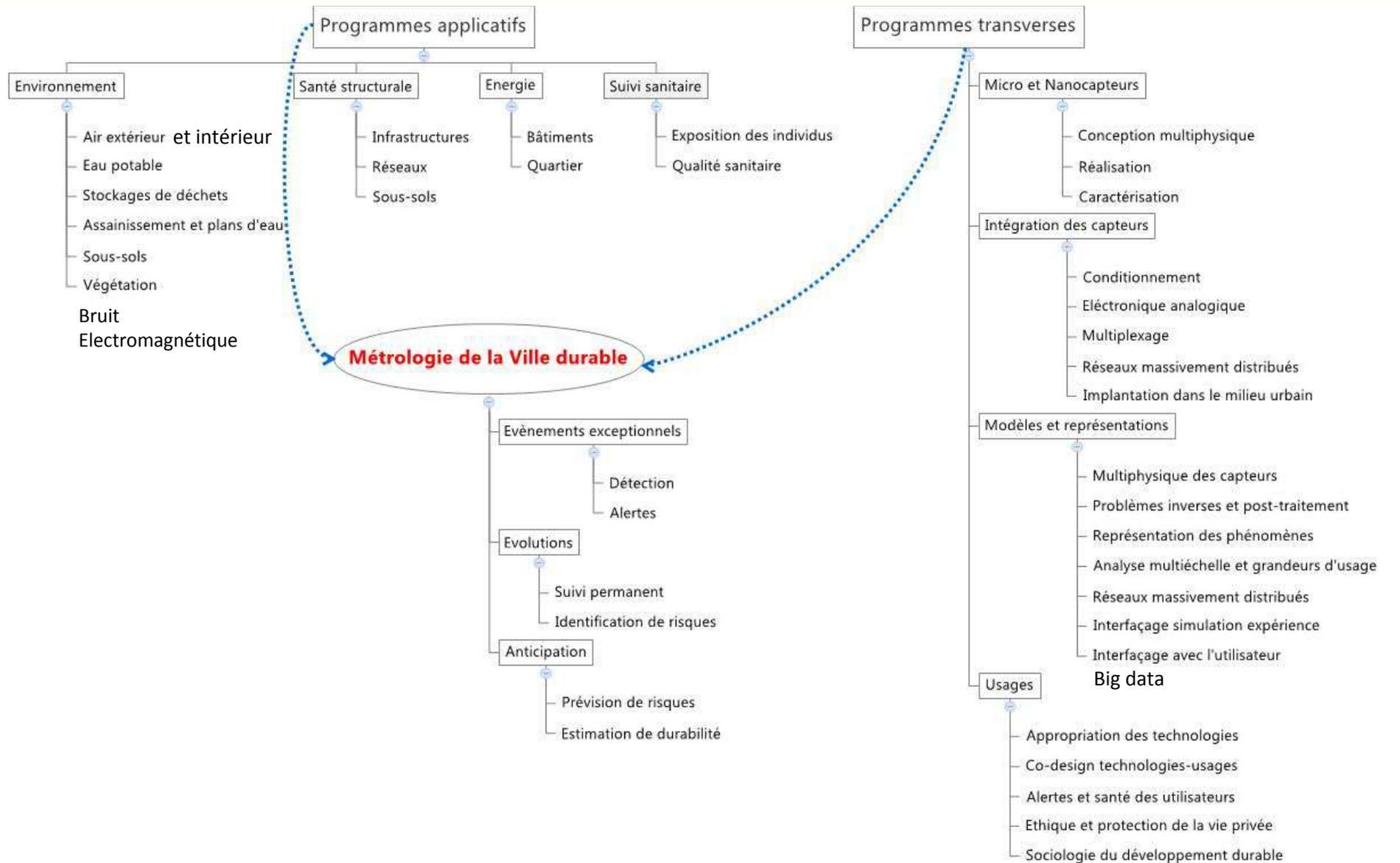


[1.7 cm]  
CNT based pH sensors



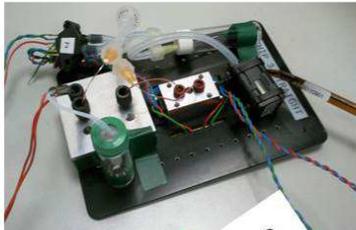


# Les enjeux scientifiques et métiers



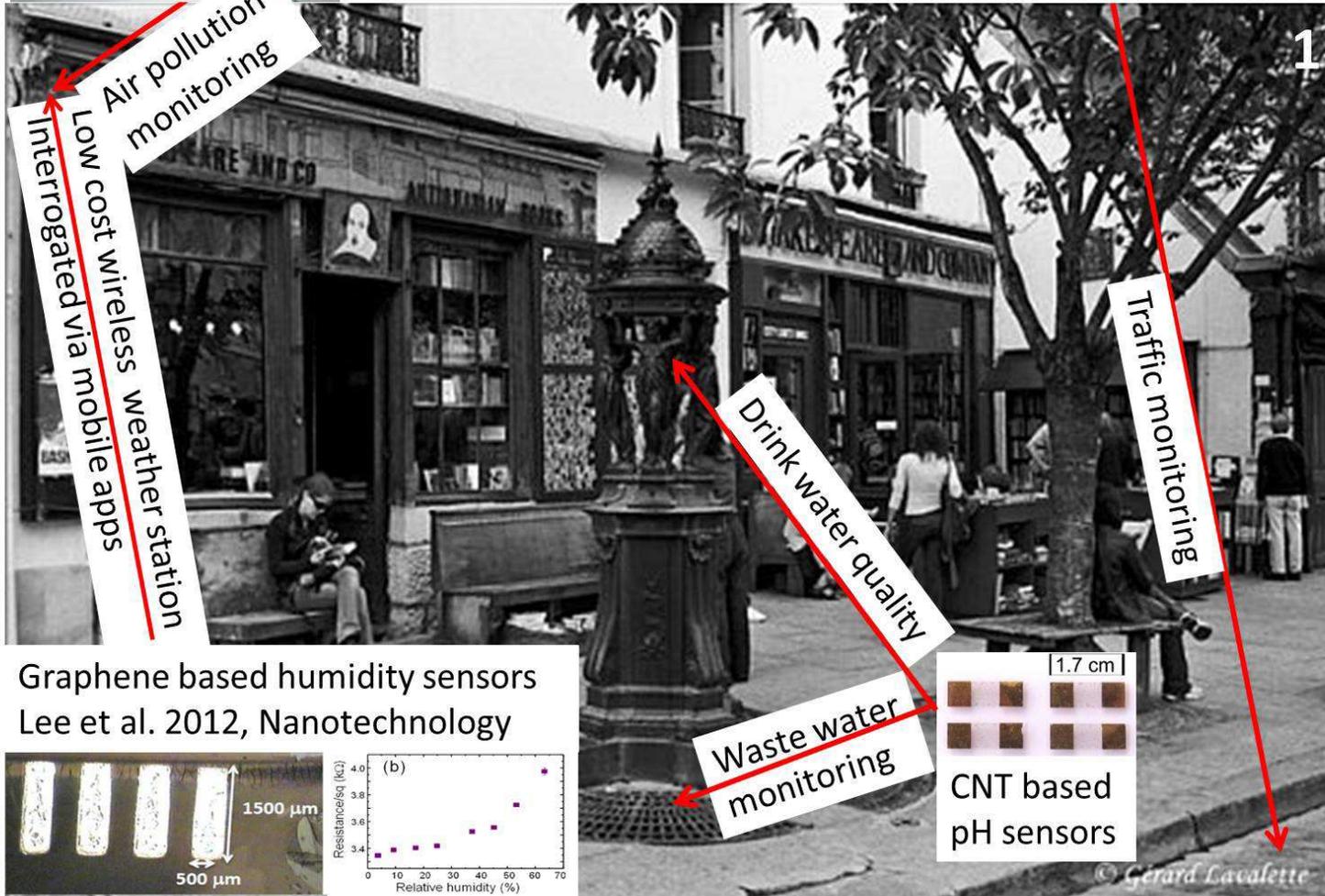
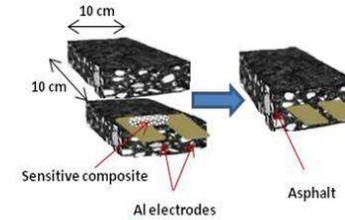


# Enjeu 1 : Un répertoire de capteurs pour la Ville



Microchromatograph  
Cesar et al., IEEE MEMS 2013

Smart asphalt  
B. Lebental et al. Patent 2014



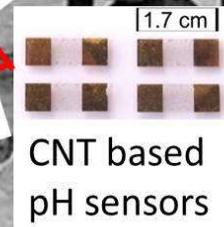
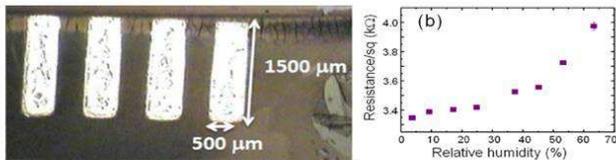
Air pollution monitoring  
Low cost wireless weather station  
Interrogated via mobile apps

Traffic monitoring

Drink water quality

Waste water monitoring

Graphene based humidity sensors  
Lee et al. 2012, Nanotechnology



CNT based pH sensors

1

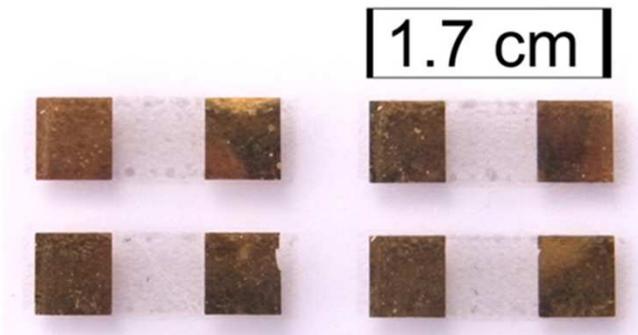
© Gérard Lavolette



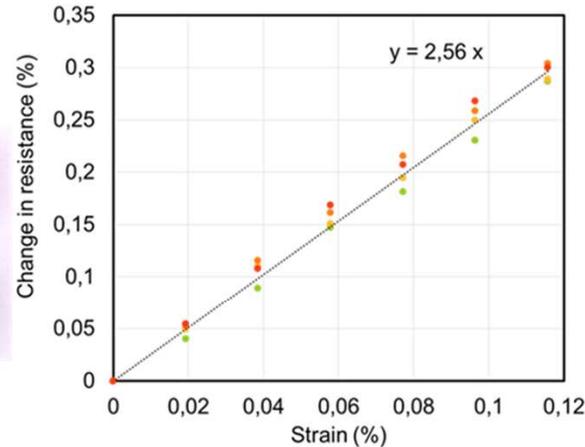
## Enjeu 1 : Un répertoire de capteurs pour la Ville

- Pourquoi de nouveaux capteurs?
  - Seules quelques observables (temperature, humidity, GPS data, accelerometers...) sont mesurables de façon fiable avec une taille raisonnable et à cout (énergétique et financier) abordable dans une approche moyen/grand public
  - Exemple: Qualité de l'air ou de l'eau? Pollution électromagnétique?
- Quelques approches:
  - La voie Silicium: technologies plus complexes; bas cout, mais seulement en grand volume; meilleure précision
  - La voie Bas Cout: bas cout dès la petite série; mais précision limitée

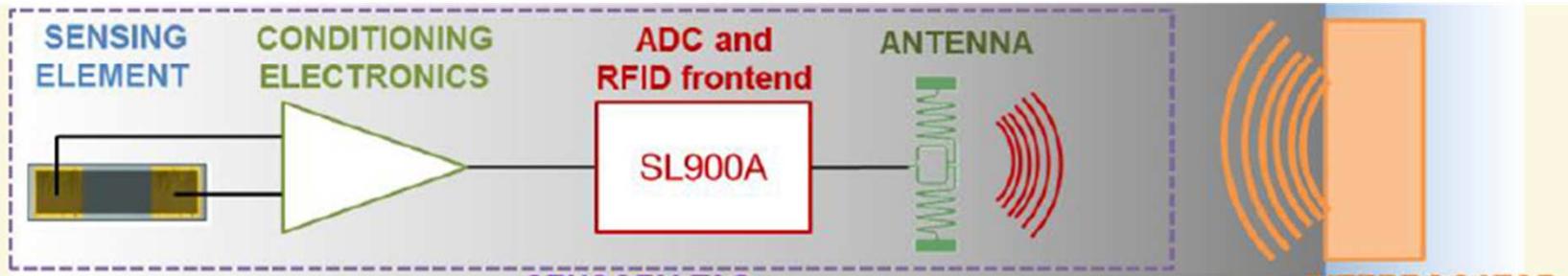
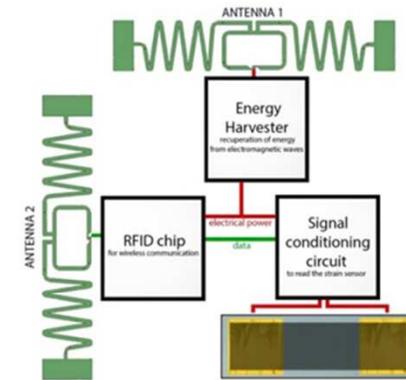
# Enjeu 2 : Du nanocapteur à l'objet connecté



Resistive devices batch-fabricated by ink-jet printing of CNT



• Sensor 1 • Sensor 2 • Sensor 3 • Sensor 4



Structure of the architecture





# Enjeu 3 : Reconstruction des phénomènes et optimisation du positionnement des capteurs

Direct problem: Navier-Stokes + incompressibility

$$\rho \frac{\partial \underline{v}}{\partial t} + \rho \underline{\nabla} \underline{v} \cdot \underline{v} + \underline{\nabla} p - \mu \Delta \underline{v} = \underline{0} \quad \text{in } \Omega \times [0, T]$$

$$\text{div}(\underline{v}) = 0 \quad \text{in } \Omega \times [0, T]$$

$$\underline{v} = \underline{v}_c \quad \text{on } \partial \Omega$$

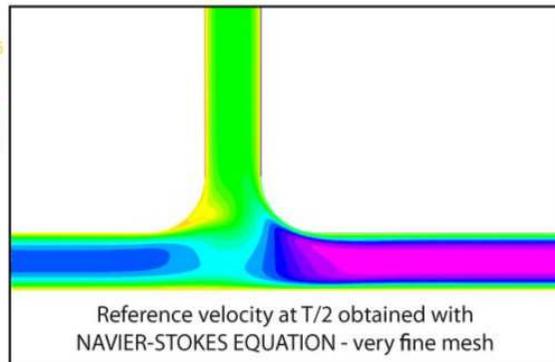
$$\underline{v} = \underline{0} \quad \text{on } \partial \Omega$$

$$\underline{v}(t=0) = \underline{0}$$

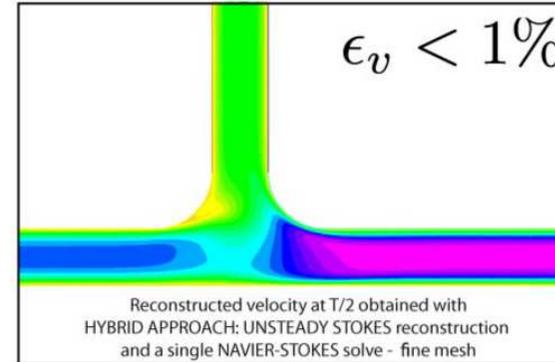
Ecoulements dans les réseaux d'eau potable

Find boundary conditions minimizing data misfit functional:

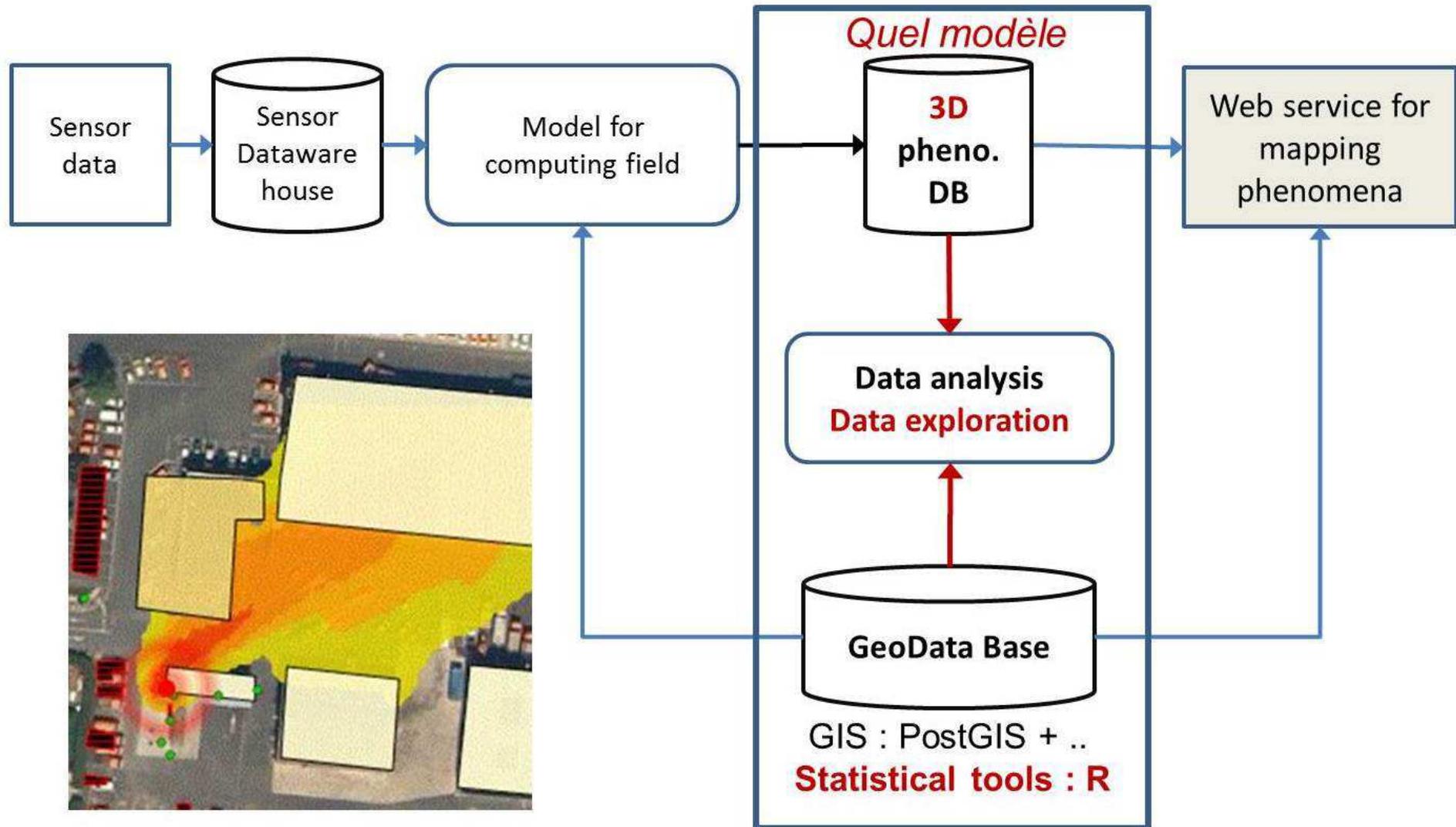
$$\min_{V_c \in \mathcal{V}_c} J(V_c) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n_s} \int_0^T \left( \int_{\Omega} \psi_j^r \underline{v}(V_c) \cdot \underline{d} \, d\Omega - v_j^{mes} \right)^2 dt$$



$\epsilon_v < 1\%$



## Enjeu 4 : Analyse et visualisation des données



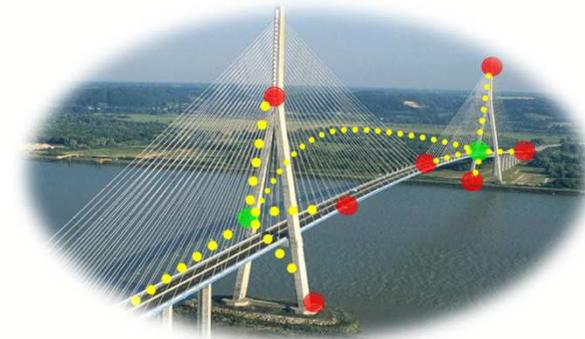


# Enjeu 5 : vers une fiabilité accrue pour des applications de longue durée

Réseau d'eau : 1 an

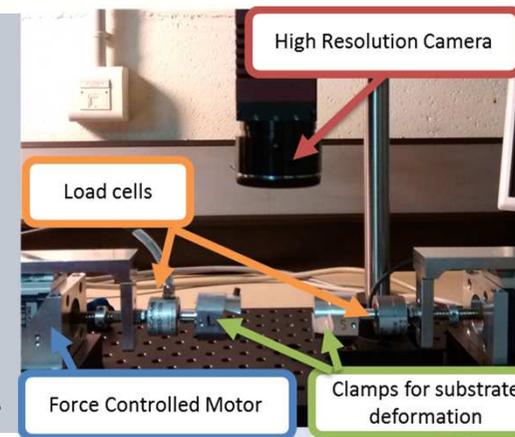
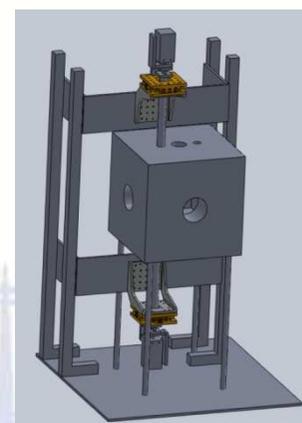
Route : 5 ans

Pont : 50 ans



## PLATINE

Une plateforme pour la fiabilité des nanocapteurs



[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)



## Quels sont les freins?

### Pour les industriels

- Modèles économiques et marchés complexes et/ou nouveaux
- Solutions technologiques complexes à prototyper rapidement
- Méconnaissance des performances réelles

### Pour les académiques

- Eloignement du domaine urbain
- Faible maturité des technologies
- Faible accès à la chaîne de valeur
- Difficultés de financement

### Pour l'aménageur et l'utilisateur

- Méconnaissance ou incompréhension des solutions
- Solutions mal adaptées
- Risques potentiels des nouvelles technologies

### Pour les financeurs

- Difficile évaluation des résultats
- Faible généralisation et répliquabilité
- Transferts technologiques limités
- Cycles de développement trop lents





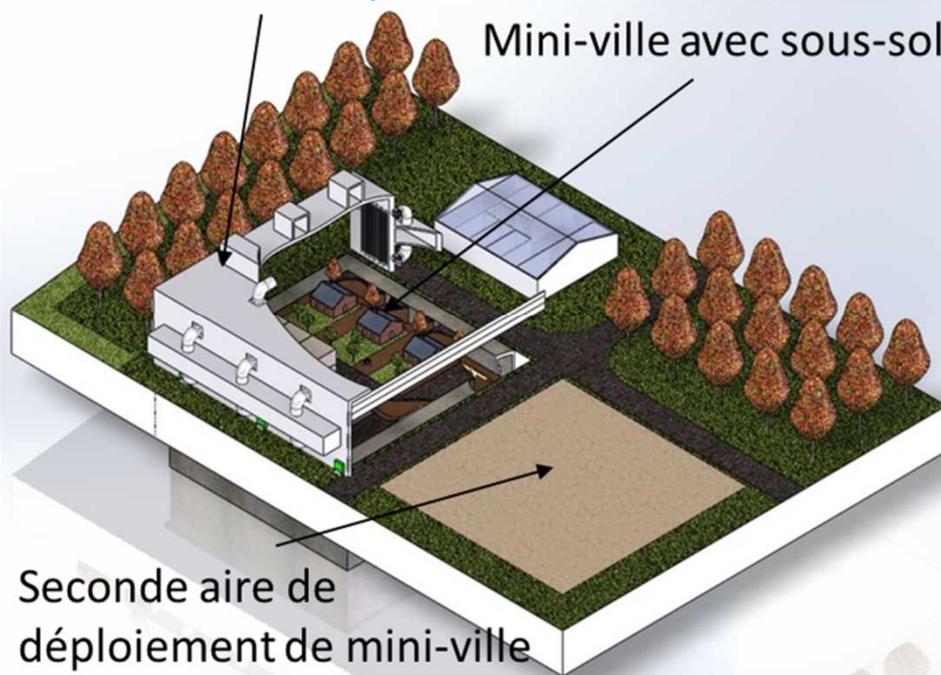
## Sense-City, un démonstrateur pour la Ville Sensible

Dès 2017, 400m<sup>2</sup> de scénarios urbains instrumentés en environnement climatique contrôlé

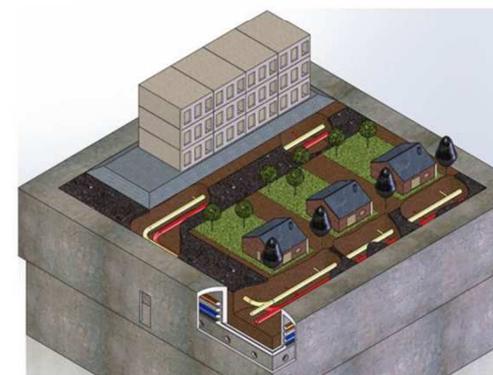
**Un espace de validation unique en Europe**

Chambre climatique mobile

Mini-ville avec sous-sol



Seconde aire de déploiement de mini-ville



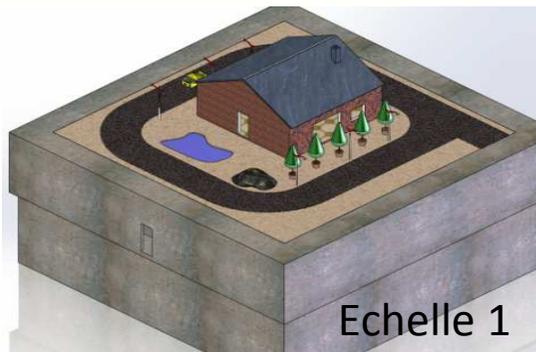
## La complexité d'un quartier...

- Aménagement urbain



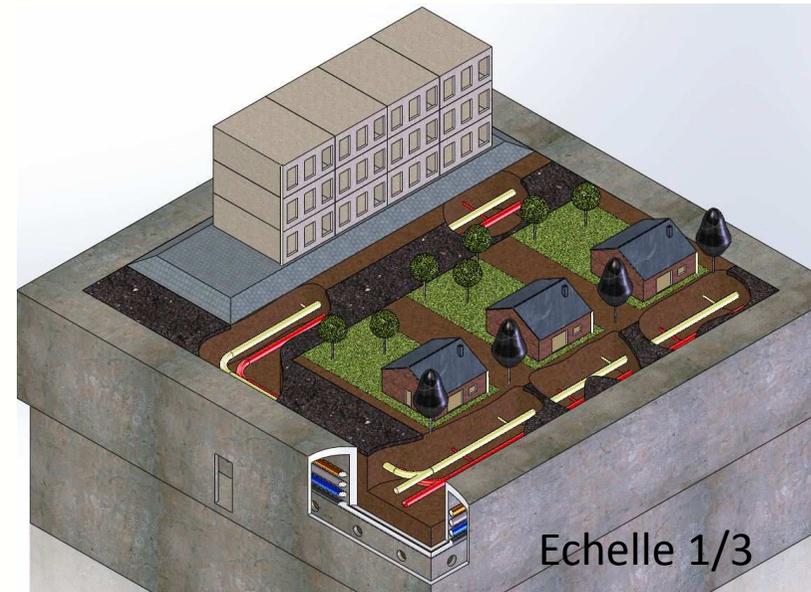
Echelle 1/3

- Maison instrumentée



Echelle 1

Aménagement filtration  
imperméabilité des sols

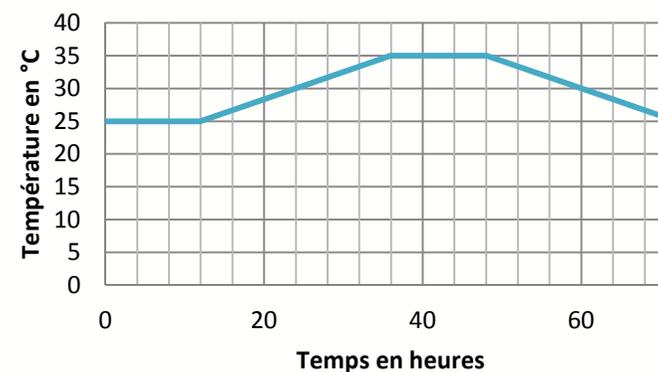


Echelle 1/3



## ...soumis aux aléas du climat

- Un environnement climatique contrôlé
  - Température,
  - Humidité
  - Rayonnement solaire
  - Pluie
  - Polluants



➔ Vers la simulation d'évènements climatiques extrêmes (URBACLIM)





## Sense-City, un accélérateur de transfert technologique pour la ville

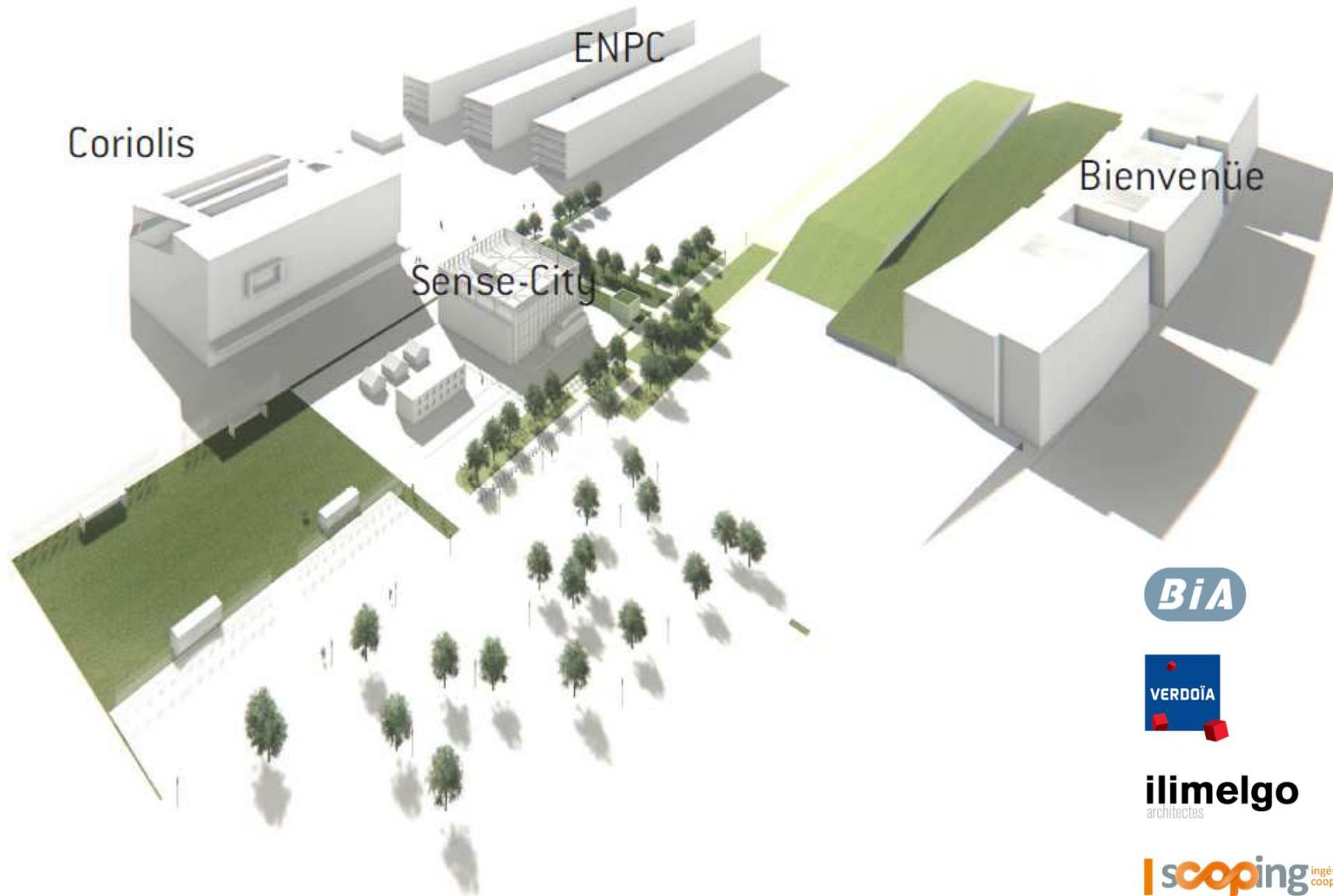
- Rapprocher les acteurs de la R&D des acteurs de l'urbain
- Garantir les performances de longue haleine des produits de la R&D urbaine
- Faciliter l'appropriation des technologies par usagers, collectivités et exploitants
- Favoriser la co-conception des produits de la R&D urbaine
- Imaginer de nouveaux produits et usages



[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)



# Implantation





# Projet architectural



scénario 1



chambre climatique mobile



scénario 2



## La mini-ville communicante

### Le 1<sup>er</sup> scénario urbain instrumenté de Sense-City

- 250m<sup>2</sup> à ciel ouvert autour de la maison et de la route intelligente
- 200+ k€ de budget
- 60+ capteurs connectés
- 15 expérimentations en cours ou en préparation





# sense CITY

Architecture de collecte de donnée  
Internet of Things for smart cities



**Air Quality**  
T, Hr, NO2, CO, O3, Dust  
4x Air Quality Egg



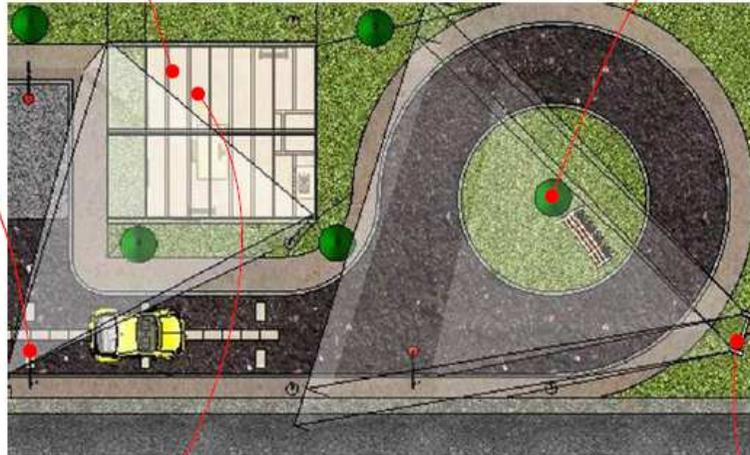
**Air Temperature**  
24x PT100



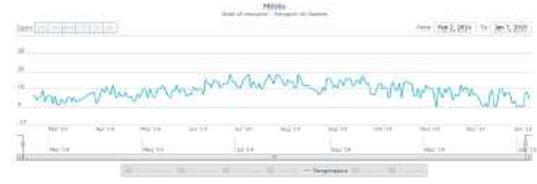
**Open-Data**  
Airport weather reports (METAR)  
Météo-France observations (SYNOP)



**Embedded sensors for concrete**  
Inside temperature and humidity  
4x SHT75  
8x Strain gauges (nano and commercial)



**Sensors supervisor**  
Big data  
Models processing (Matlab)



Thousands of sensors  
Billions of measure points  
Mathematical models

**Internet gateway**  
Connect cities to internet of things



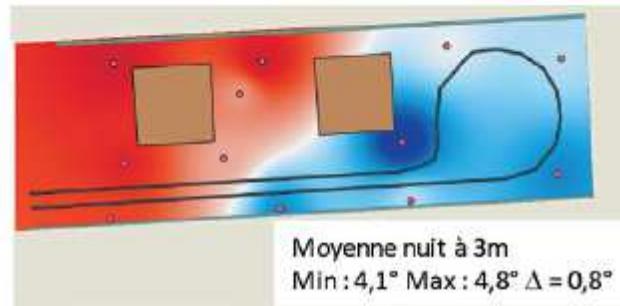
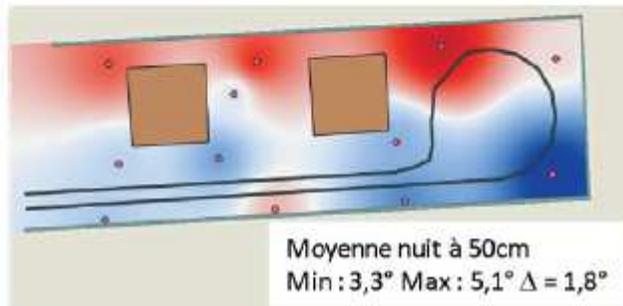
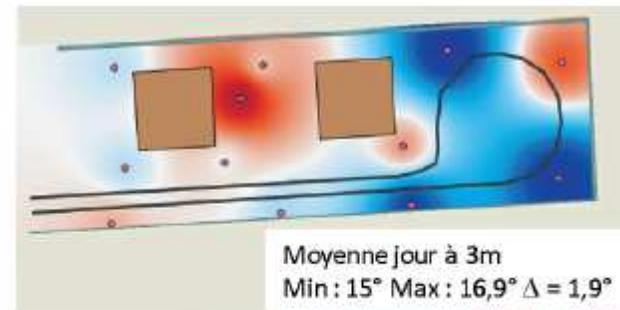
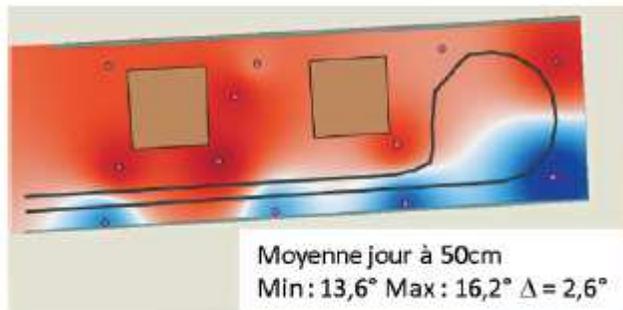
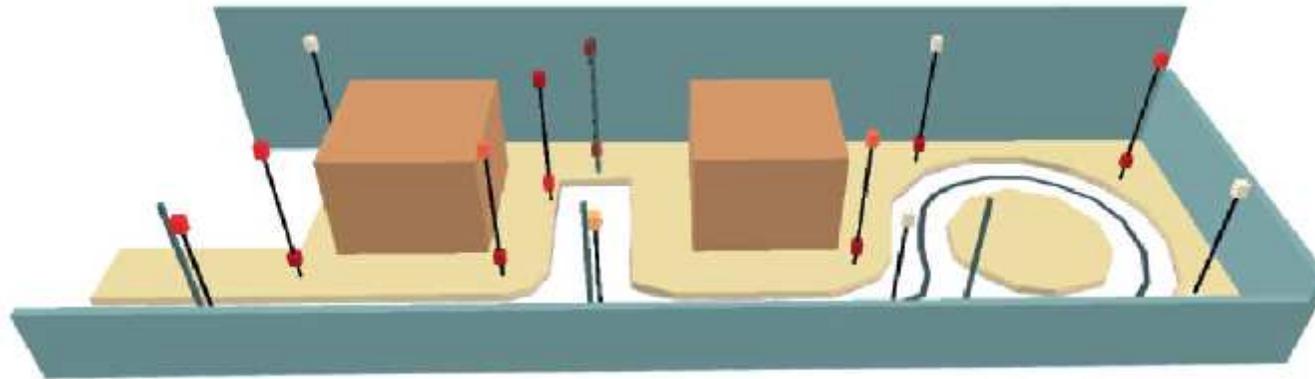
Vincent Le Cam



# De la mesure à la représentation des températures



IFSTTAR



Anne Ruas



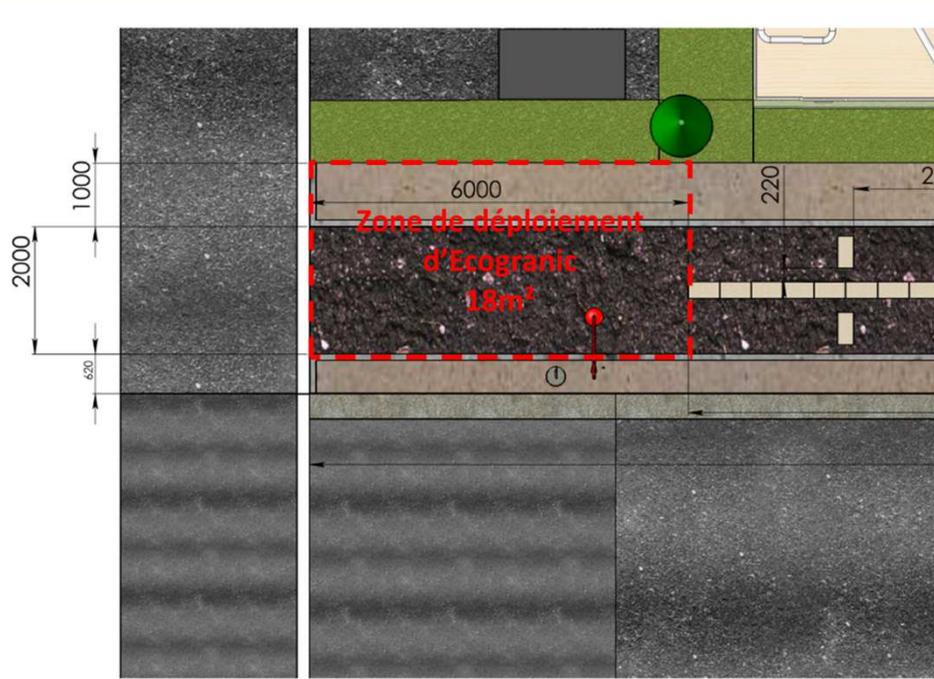
## Vers un maillage dense de capteurs pour la QAI et QAE

- Déploiement T4 2015
- Financement via projet URBACLIM (CPEP)
- 6 nœuds QAI: COV/PM/NO<sub>2</sub>
- 12 nœuds QAE: PM/NO<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>
- 2 ans de maintenance (=recalibration)
- Collecte des données en WIFI et envoi vers superviseur générique



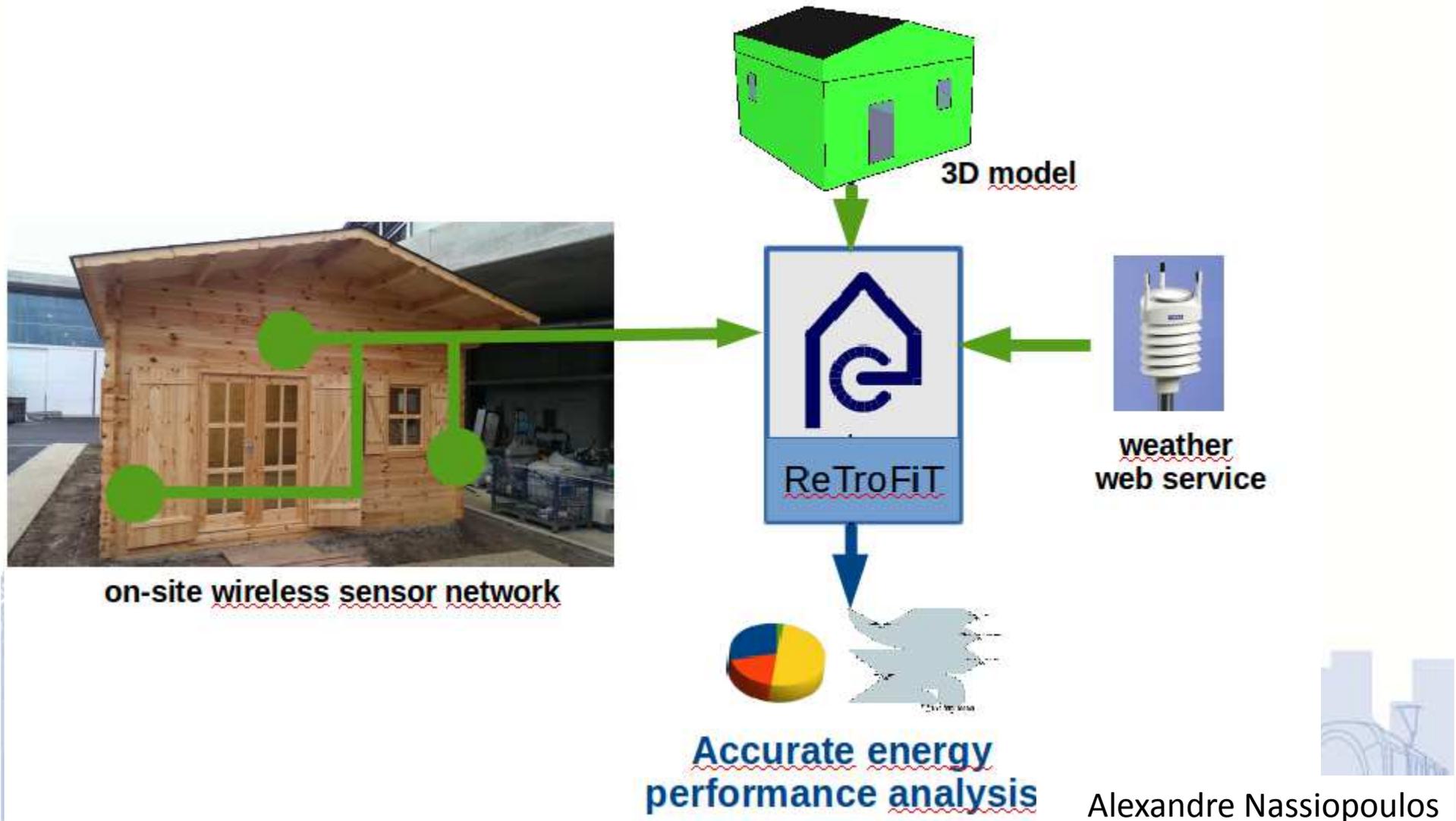


## Ecogranic - Béton dépolluant URBATP



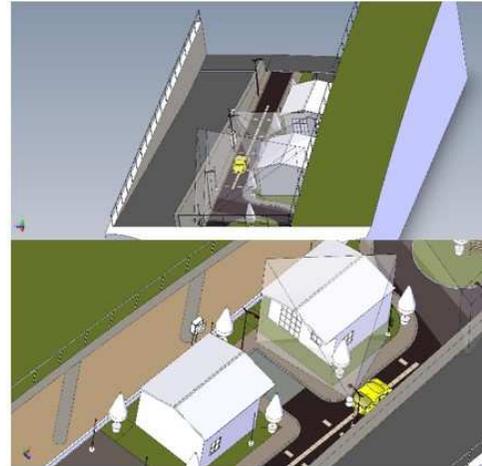


# Instrumentation en temps réel du comportement énergétique d'un bâtiment





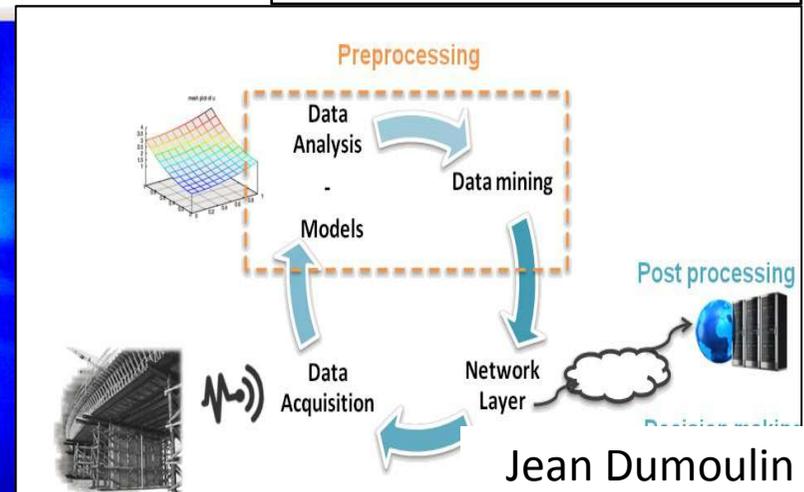
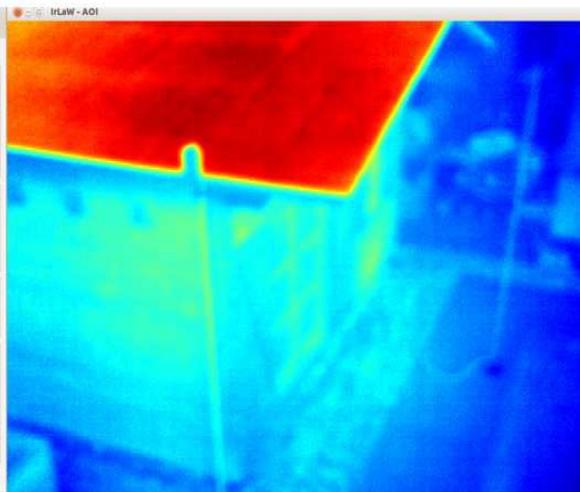
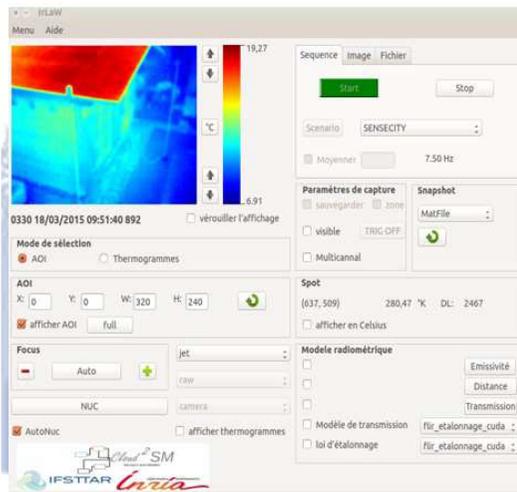
# Instrumentation thermique en extérieur par thermographie infrarouge connectée



sense CITY

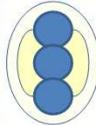
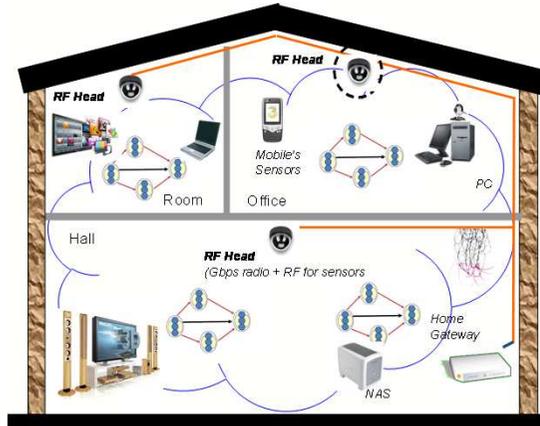


**Alimentation de BDD  
Etude, Développement,  
Intégration et mise en  
œuvre de Modèles et de  
Ressources de calcul  
Interopérabilité via portail  
Web**





# Dense and energy efficient wireless sensors networks



- Wireless Sensors**
- Environmental
  - Automation
  - Ambiance
  - Health



Motivations for the Radio-over-Fibre Infrastructure:

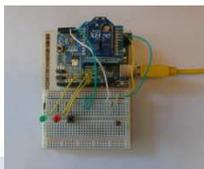
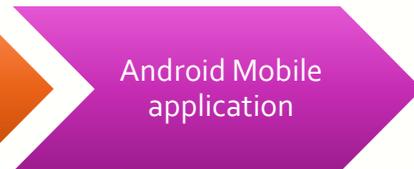
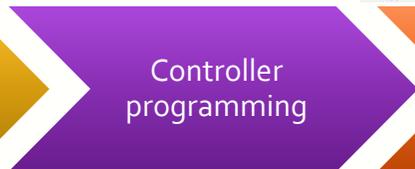
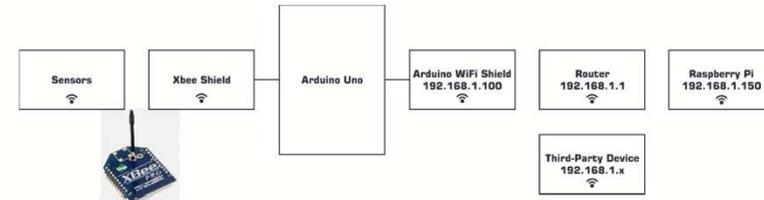
- Rationalize the required EM emission
- Increase Sensors/devices autonomy
- Guarantee the reception anywhere
- Transparent to protocols and standards
- A single and flexible infrastructure for all home services (phone, WiFi, sensors...)



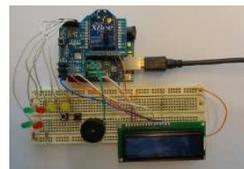
- Temp/Light/Humidity sensors
- motion sensor
- moisture sensor
- adjustable lights



Zigbee Sensor + WiFi network and server installed



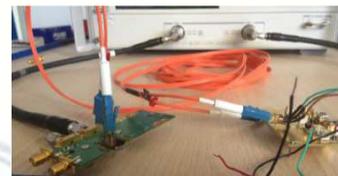
T/L/H sensors



Xbee coord.



2.45GHz antenna



Optical infra



Android app



- **Next step:** packaging and onsite implementation, power efficiency monitoring



## Merci pour votre attention

- Questions?



[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)