

# Conception & déploiement de réseaux de capteurs sans fil

Pr. Eric Fleury

ENS de Lyon/LIP – INRIA/D-NET

[Eric.fleury@inria.fr](mailto:Eric.fleury@inria.fr)

<http://www.ens-lyon.fr/LIP/D-NET/>

---

# Plan

- Retour sur 2 expériences de déploiement *in situ*
  - MOSAR / i-Bird
  - AFSSET / TubExpo
- Aperçu des enjeux « réseaux de capteurs »
- Outils de simulation / développement
- SensLAB : Plateforme de test très large échelle

# MOSAR / i-Bird

- **Comprendre / Modéliser / Contrôler** la résistance aux antibiotiques des bactéries responsables des infections nosocomiales.

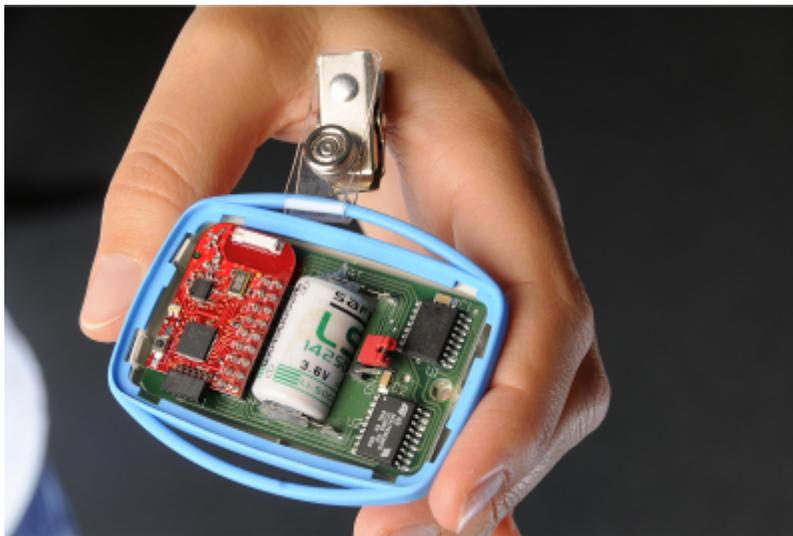


- **i-Bird : Individual Based investigation of resistance dissemination**

# Comment mesurer les « contacts »

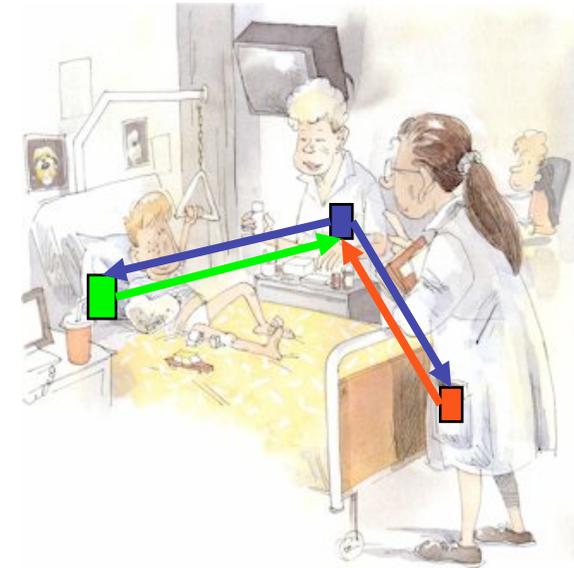
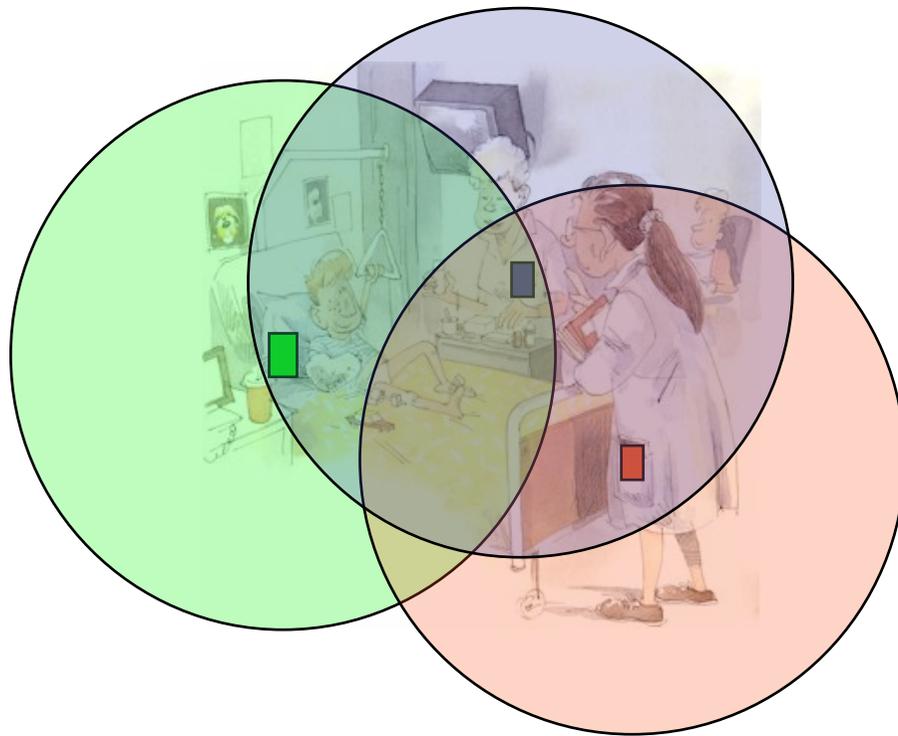
## ■ Idée :

- associer un « capteur/log » à chaque individu
- Sorte de Tamagotchi communiquant.
- *Bigbrother is recording your contacts*



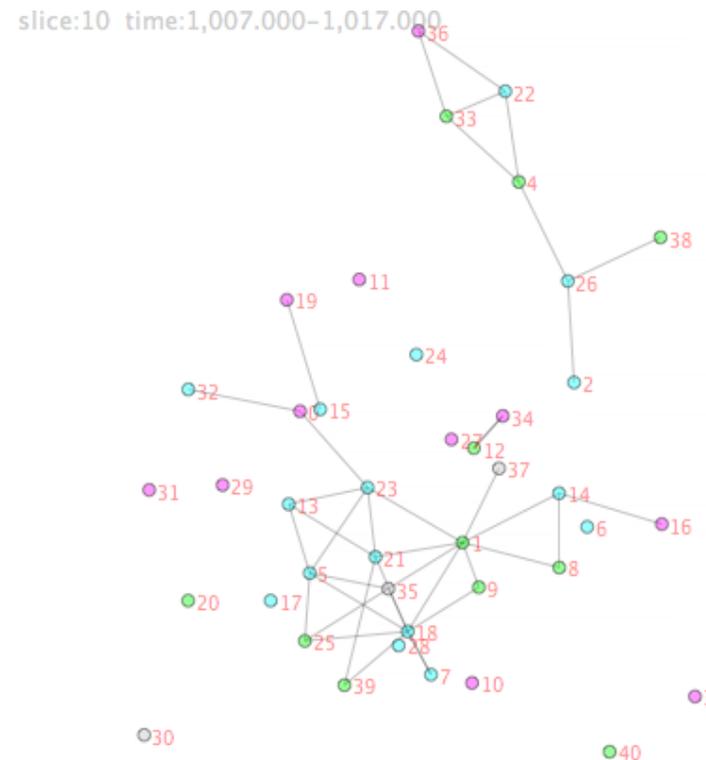
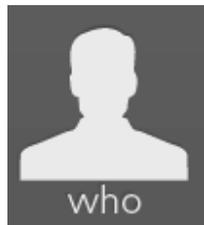
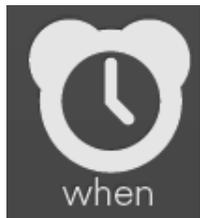
# Expérimentation MOSAR/iBird

- ✓ Film de présentation de MOSAR
- ✓ WebTV de la Cité des sciences et de l'industrie



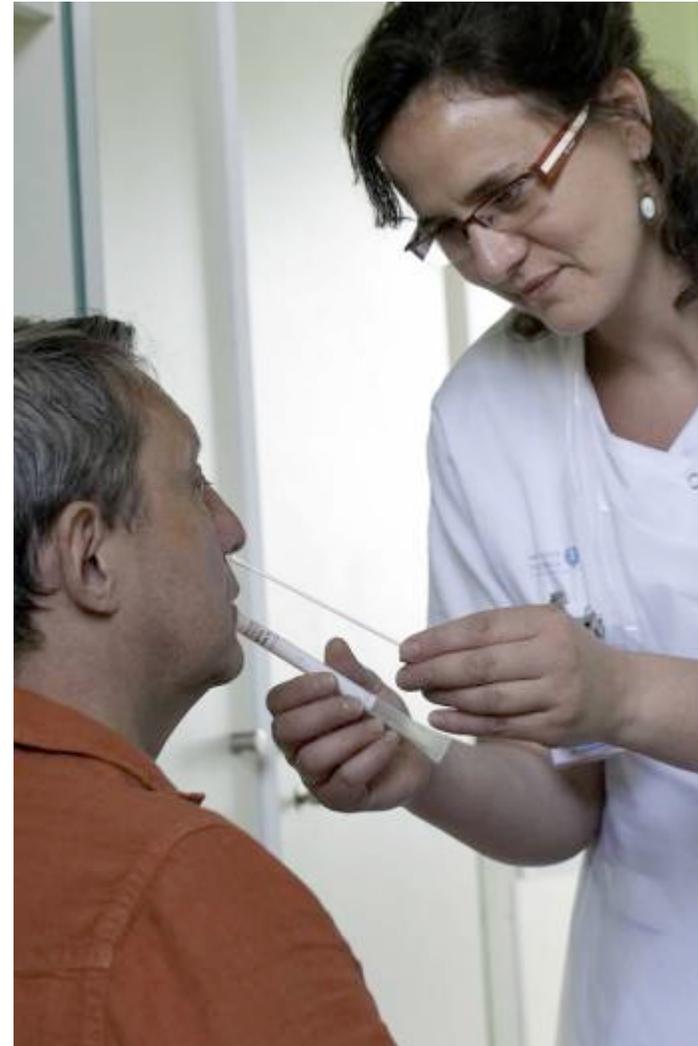
# Plus que les simples contacts

- Données des capteurs :
  - Une mesure toutes les 30s
    - date local time of the node
    - Id **ID** of the node in contact
    - length **duration** of the contact
    - RSSI average strength of the signal of the contact



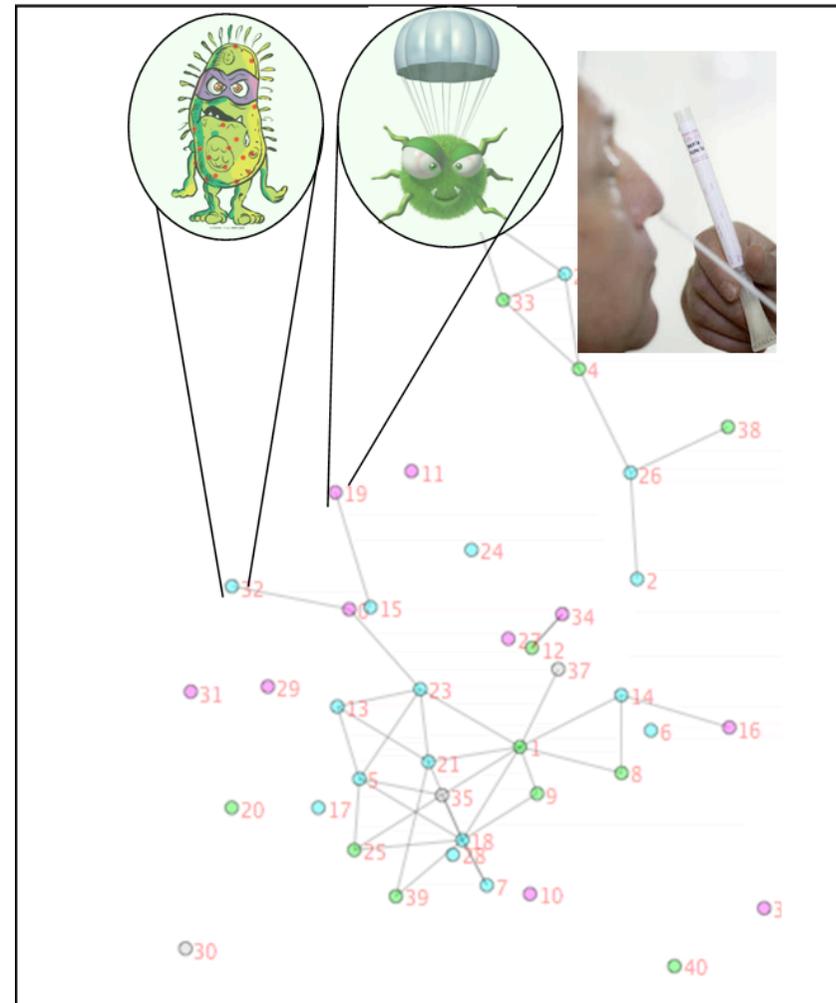
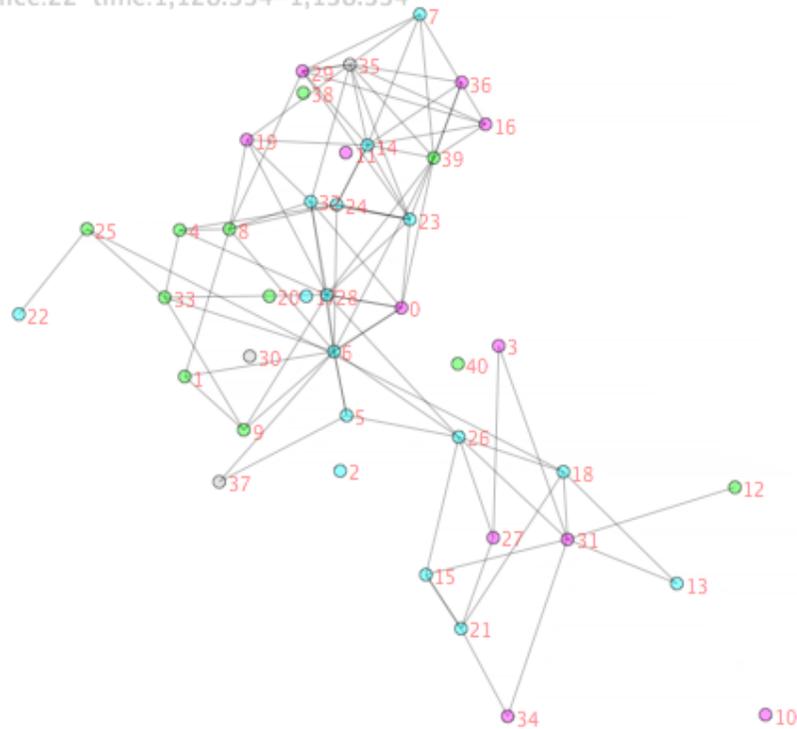
# Plus que les simples contacts

- **Prélèvements :**
  - Nasal (patients & personnels)
  - Plaie (patients)
  - → caractérisation des bactéries / clones
- **Suivi immunologique**
  - Prise de sang (patients)
- **Prescription antibiotique**



# Réseau dynamique multi-modal

slice:22 time:1,128.334-1,138.334



# Hôpital maritime de Berck

- Pathologies :
  - Neurologie / Post-opératoire / Traumatisme  
123 lits (3 unités)
  - Gériatrie 30 lits (1 unité)
  - Obésité 30 lits (1 unité)
- 250 agents hospitaliers
- 183 lits
- Séjour moyen : 2 mois
- 100 patients admis/mois
- Age moyen des patients : 38 ans
- Sex Ratio = 1 : 1



**6 mois d'investigation (26 semaines) : 4 mai – 30 oct 2009**

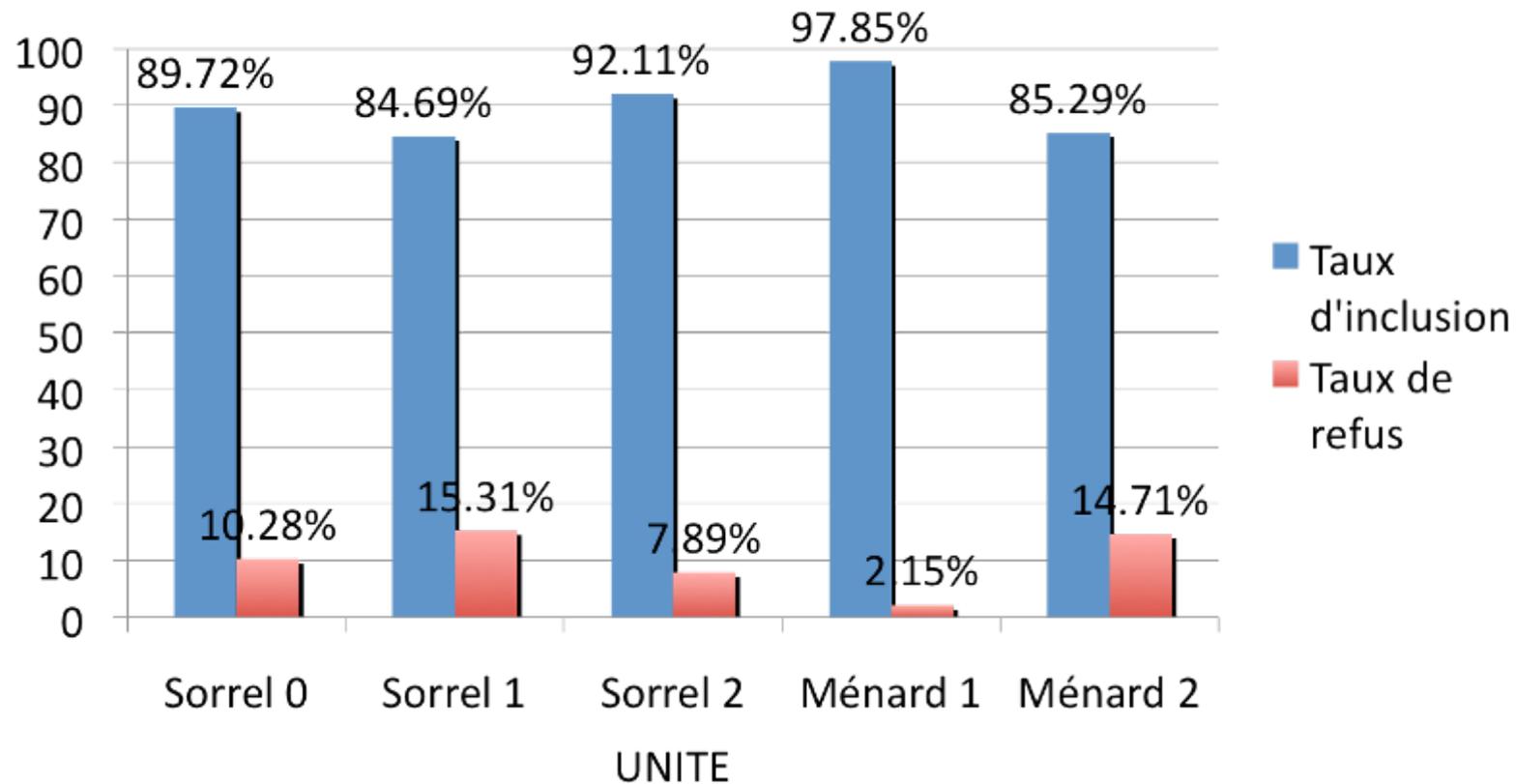
# Patients

- # Patients présents pendant l'étude : 514
- # Patients inclus : 462
- # Patients ayant accepté de participer ensuite : 6
- Taux global de participation de patients : 89,9%
- Taux global de refus de patients : 10,1%
- # Patients-semaines : 3495

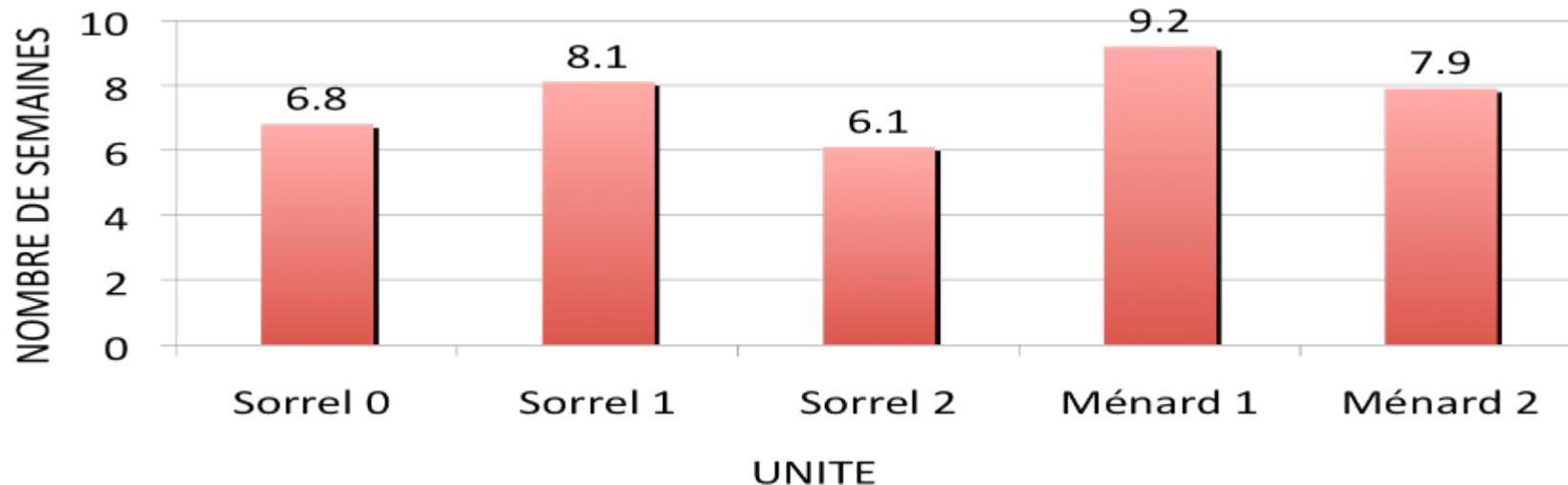


# Patients

Taux de participation et refus des patients



# Patients



- Temps de suivi minimum : 1 semaine
- Temps de suivi maximum : 22 semaines
- Temps de suivi global moyen pour un patient : 7,6 semaines

# Personnel

- # Personnel présents pendant l'étude : 378
- # Personnel inclus : 342
- # Personnel ayant accepté de participer ensuite : 4
- Taux global de participation de personnel : 90,4%
- Taux global de refus de personnel : 9,6%
- # Personnel-semaines : 5104
- Temps de suivi minimum : 2 semaines
- Temps de suivi maximum : 23 semaines
- Temps de suivi global moyenne : 15,2 semaines

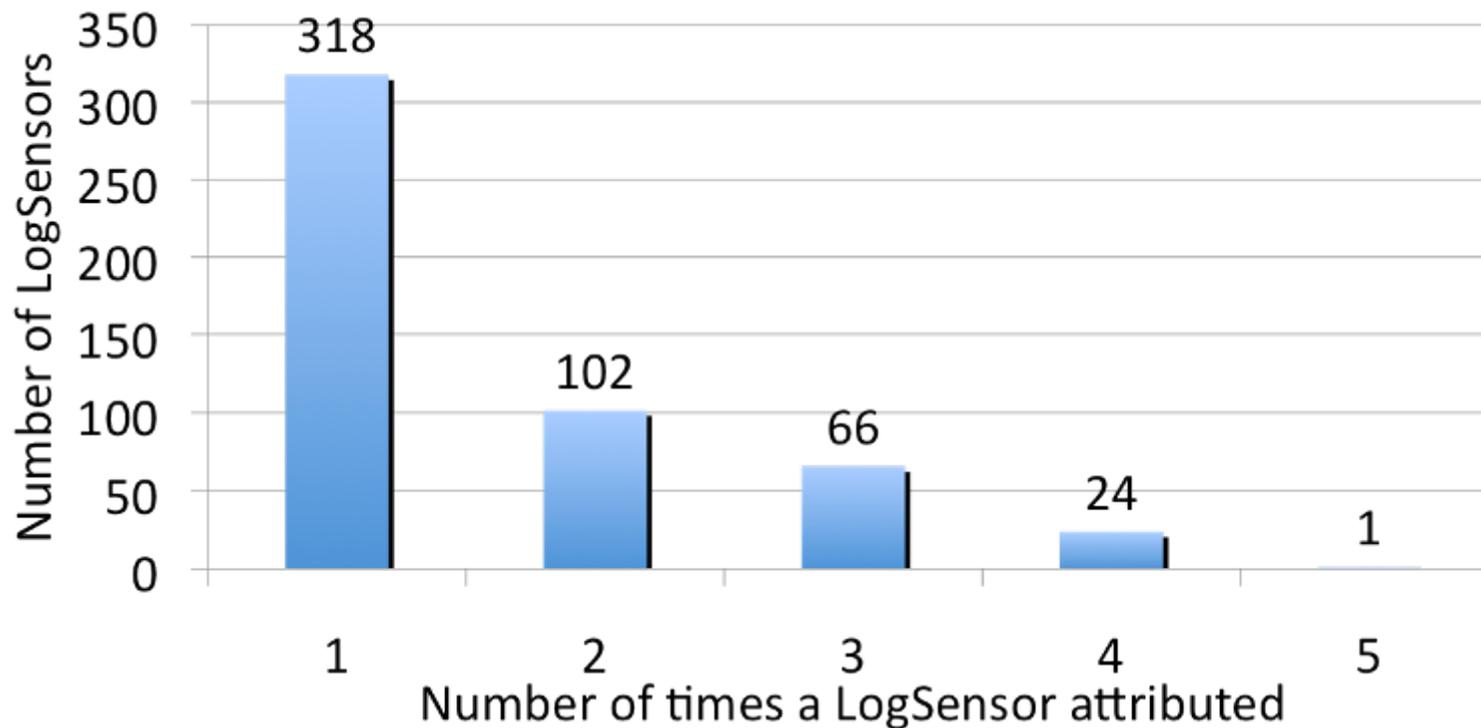


# Patients & Personnel

	<b>Patients</b>	<b>Health Care Workers (HCW)</b>	<b>Total</b>
<b># on site</b>	514	378	892
<b># included in study</b>	<b>462</b>	<b>342</b>	<b>804</b>
<b># eventual participation</b>	6	4	10
<b>% participation</b>	89,9	90,4	<b>90,1</b>
<b>% refusal</b>	10,1	9,6	<b>9,9</b>
<b># patients-weeks</b>	3495	5104	<b>8599</b>
<b>Min follow-up in weeks</b>	1	2	1
<b>Max follow-up in weeks</b>	<b>22</b>	23	23
<b>Mean follow-up in weeks</b>	<b>7,6</b>	<b>15,2</b>	<b>12,5</b>

# Capteurs

- # LogSensors manufactured : 600
- # LogSensors programmed : 580
- # LogSensors attributed : 511 (PA & HCW combined)
- # Participant files : 817 (462 PA & 355 HCW)
- # Participants having never had a LogSensor : 25 (13 PA & 12 HCW)



# AFSSET / TubExpo

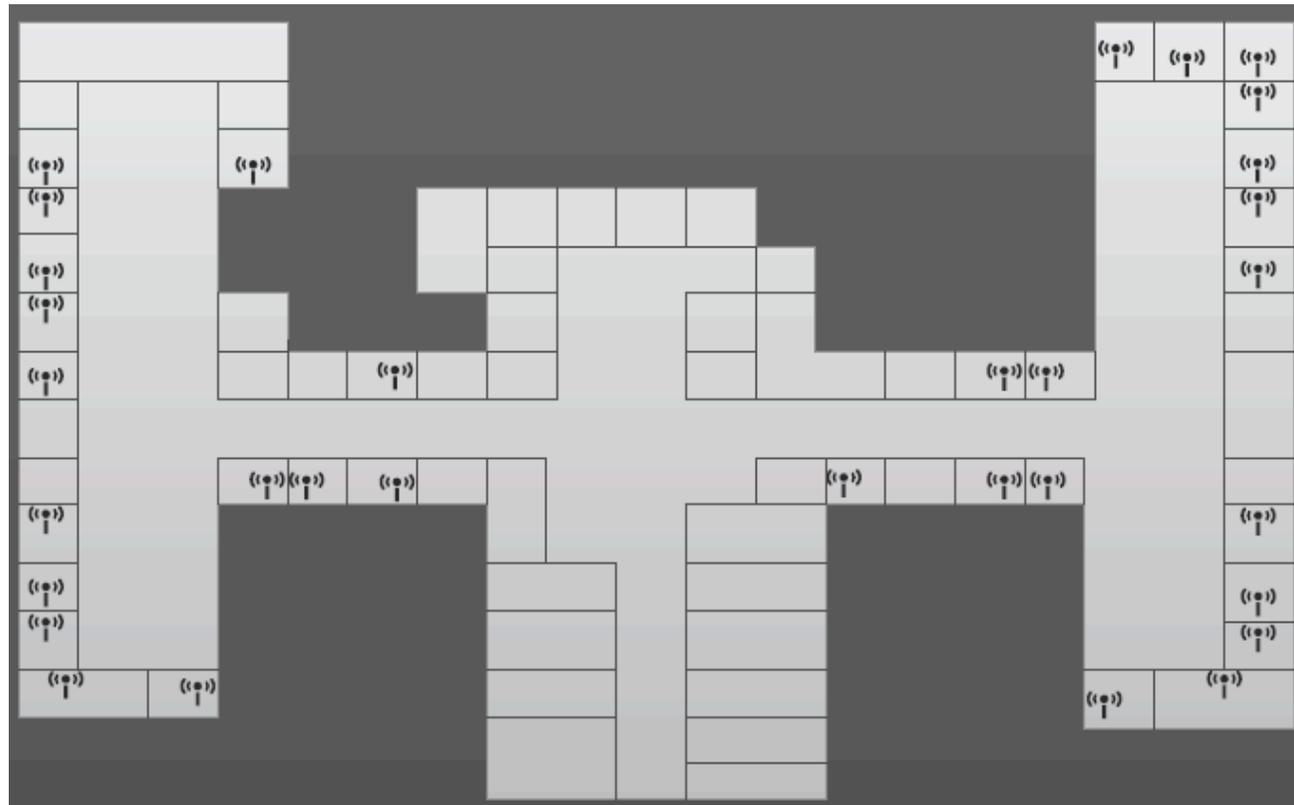
- Evaluer l'exposition du personnel hospitalier à la tuberculose



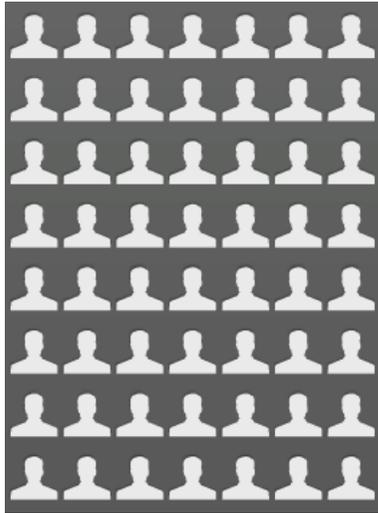
agence française de **sécurité sanitaire**  
de **l'environnement et du travail**

- SMIT : Service Maladies Infectieuses & Tropicales (Hôpital Bichat-Claude Bernard)
- Pitié Salpêtrière

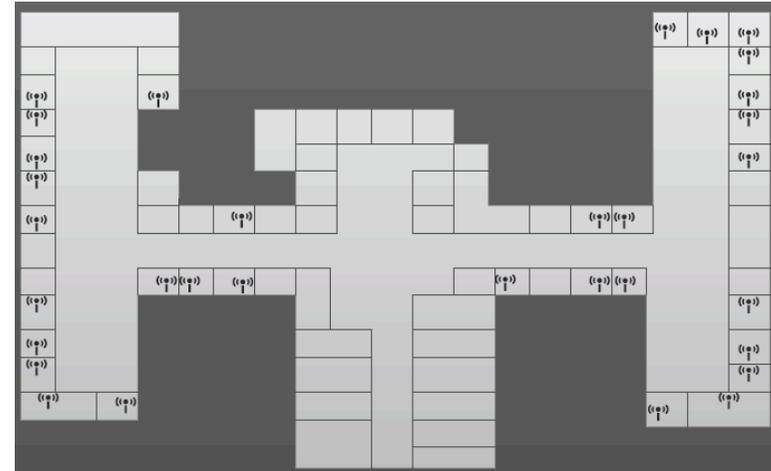
# Expérimentation : 32 chambres



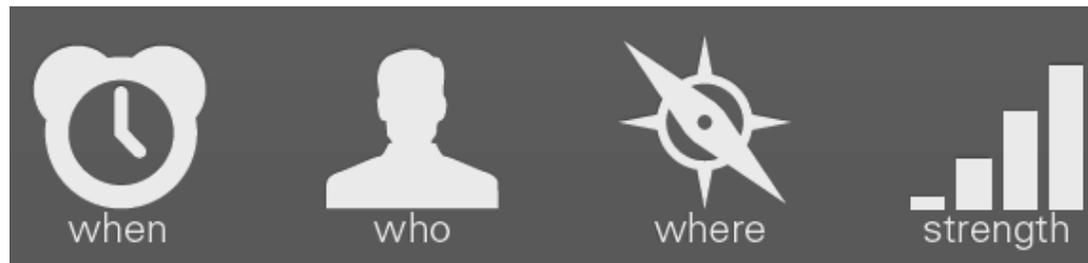
# Expérimentation



**56 capteurs mobiles**



**32 capteurs fixes**



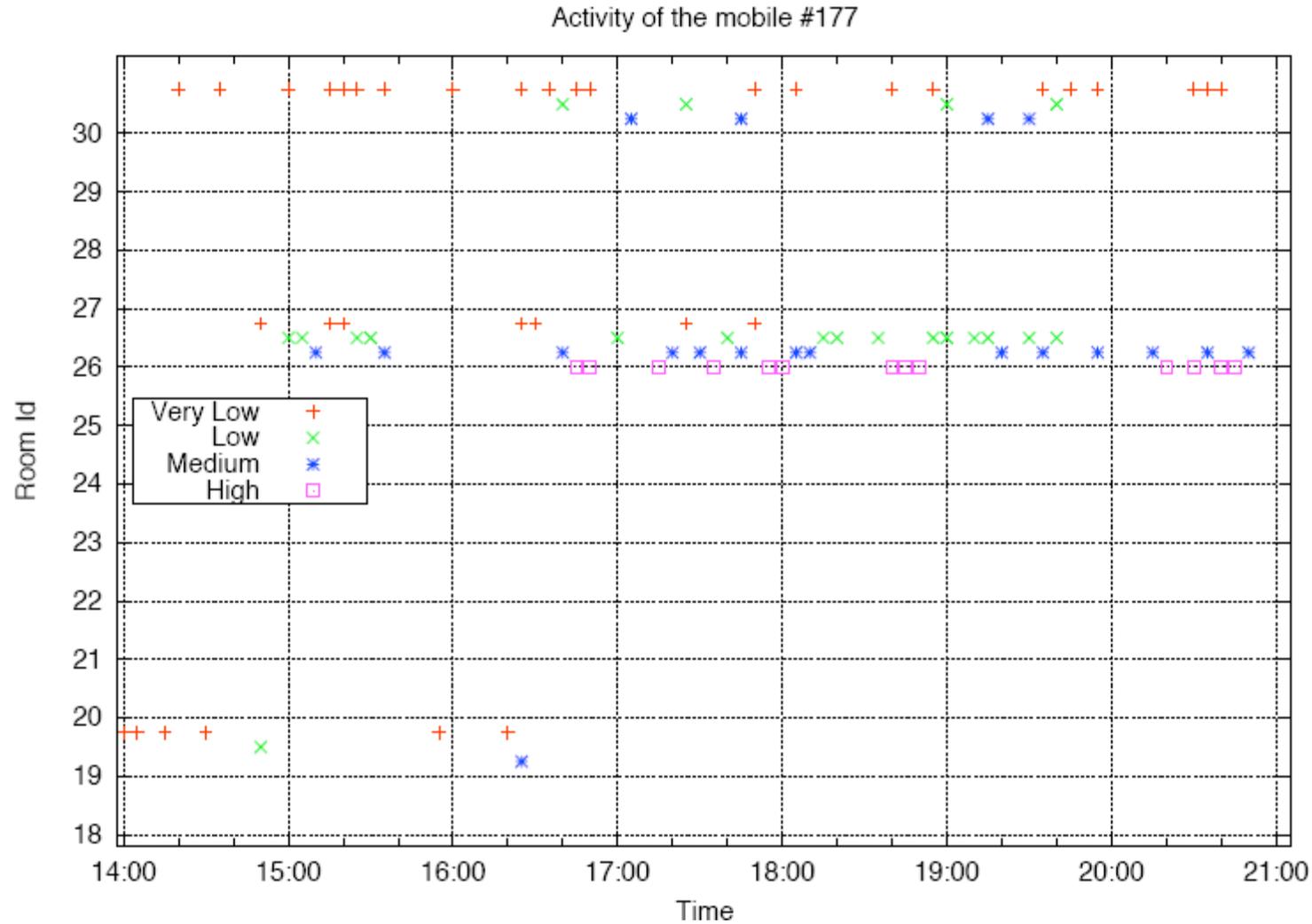
**98 jours**

**16 066 096 contacts**

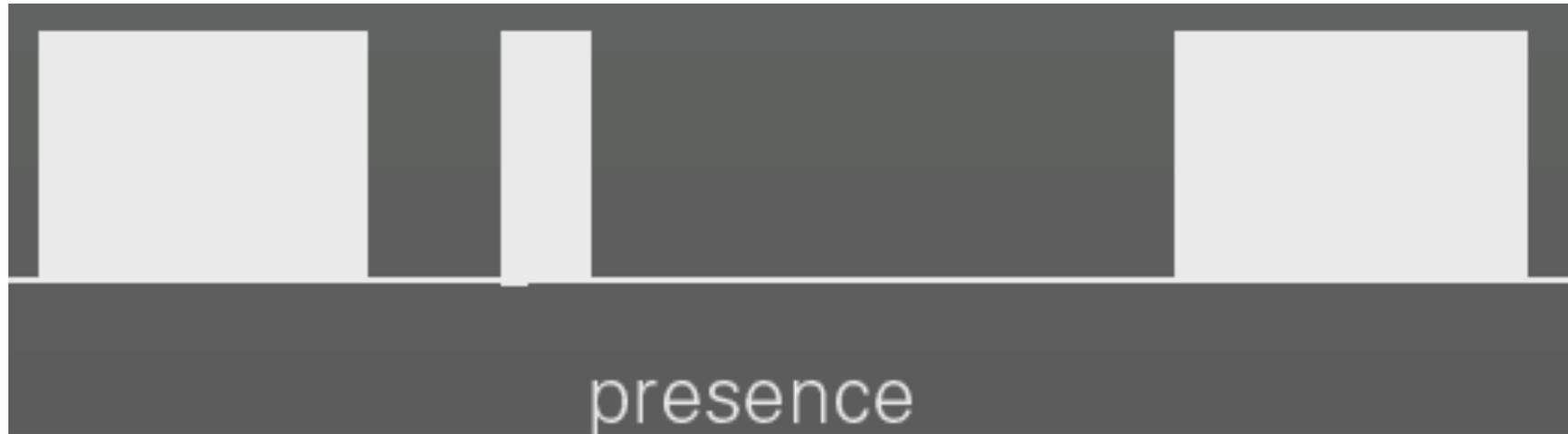
# La seule technologie n'est pas miraculeuse...

- Pertes de paquets
  - Impacte les statistiques sur les temps de contact
  - Besoin de reconstruire le signal
- Nettoyer les traces en fonction des agendas réels
- Quelques trous noirs
  - Problème de dérive d'horloge
  - Problème de pile !

# Un signal très bruité...



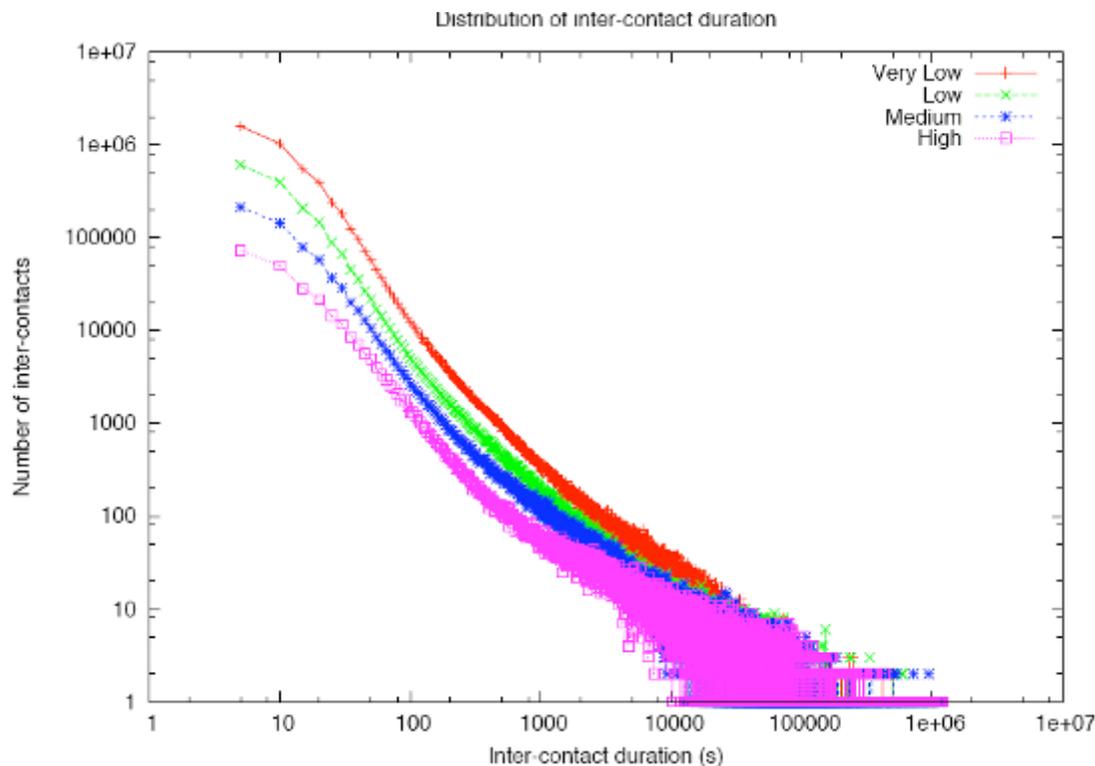
# Pertes de paquets



- Restaurer les faux négatifs
- Supprimer les faux positifs

# Reconstruction possible

- A partir d'audits externes
- Sémantique des contacts



# Plan

- Retour sur 2 expériences de déploiement *in situ*
  - MOSAR / i-Bird
  - AFSSET / TubExpo
- Aperçu des enjeux « réseaux de capteurs »
- Outils de simulation / développement
- SensLAB : Plateforme de test très large échelle

# Enabling Technology for Science

the complex

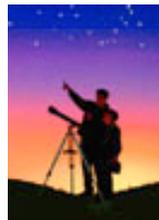
*Perceive ...*

the imperceptible

the atomic

the small

the far



# The (A) Promise of Sensor Networks

- Dense monitoring & analysis of complex phenomena over large regions of space for long periods

- Many, small, inexpensive sensing devices
- Frequent sampling over long durations
- Non-perturbing
- Compute, communicate, and coordinate
- Many sensory modes and vantage points

- Close to the physical phenomena of interest
- Observe complex interactions

# Embedded Networked Sensing

## Many critical issues facing science, government:

- Public call for high fidelity and real time observations of the physical world
- Networks of smart, wireless sensors can reveal the previously unobservable
- Designing physically-coupled, robust, scalable, distributed-systems is challenging



## The technology will also transform:

- business enterprise (from inventory to manufacturing),
- human interactions (from medical to social)



# Sensing the world

- **Miniaturization and Moore's law has enabled us to combine:**
  - sensing, computation and wireless communication
  - integrated, low-power devices
  - **embed networks of these devices in the physical world.**
- **Placing sensing devices up close to the physical phenomena**
  - study details in space and time that were previously unobservable.
- **Observe physical processes with such high fidelity**
  - create models,
  - make predictions
  - manage our increasingly stressed physical world

# ENS: Embedded Networked Sensing

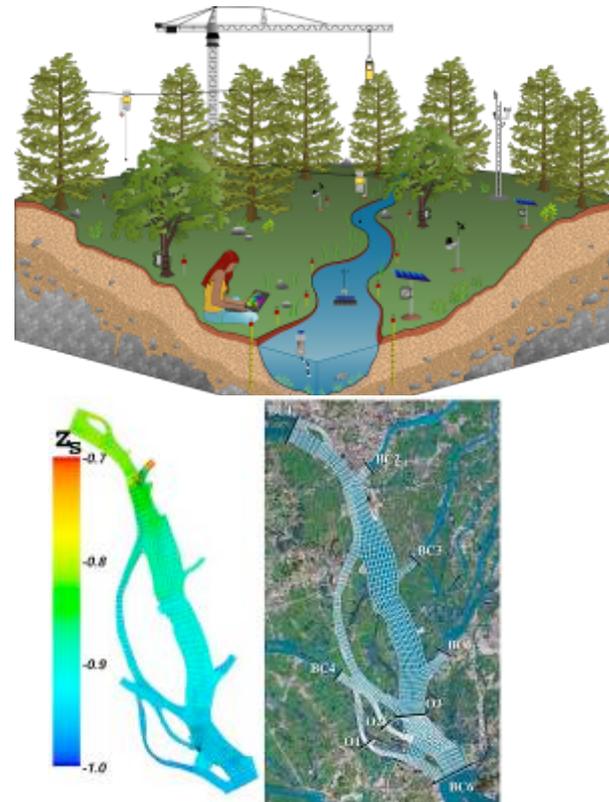
**Embed** numerous devices to monitor the physical world

**Network** to monitor, coordinate and perform higher-level identification

**Sense** and actuate adaptively to maximize information return

**In-network and multi-scale processing** algorithms to achieve:

- *Scalability* for densely deployed sensors
- *Low-latency* for interactivity, triggering, adaptation
- *Integrity* for challenging system deployments



# Advantages of ENS

- The essential power of this technology derives from **EMBEDDING** measurement devices in the physical world and **NETWORKING** them to achieve intelligent coordinated **SENSING** Systems
- ENS has the perfect ingredients for **multidisciplinary research** because it offers transforming capabilities to the applications and challenging problems for the technologists.
- Most generally stated our objective is to **maximize information** return from these adaptive sensing and actuation systems, across design, deployment, and run time the design of multiscale and in network processing algorithms.

---

# Wireless sensor networks

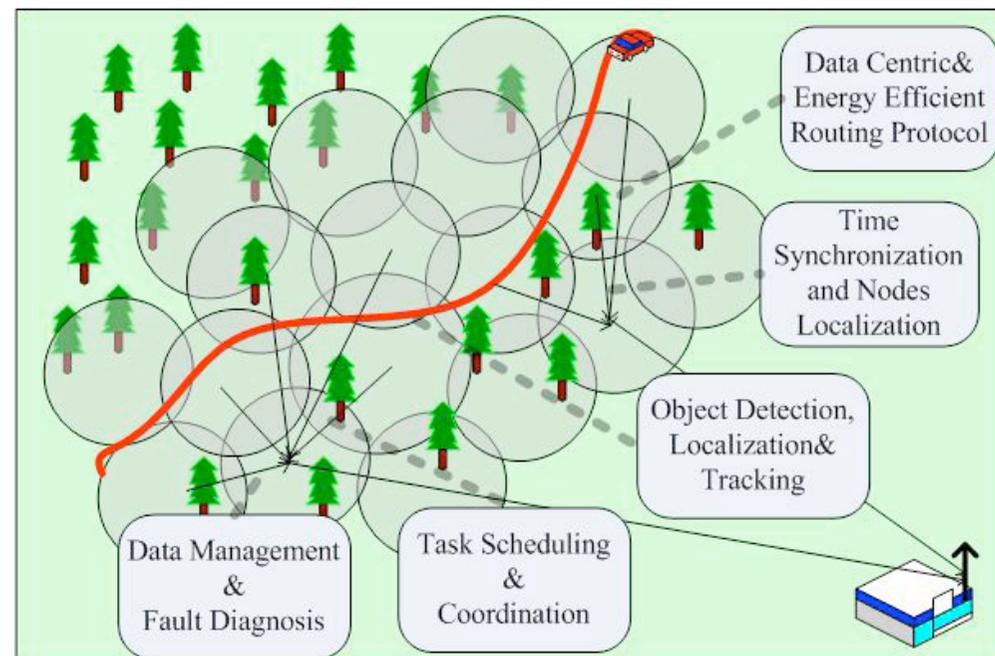
- A great recent technological successes
- Many applications
  - Environmental
  - Security
  - Automotive
  - Healthy
  - And many more
- Still a hot topic in both the academic and industrial worlds

# Plan

- Retour sur 2 expériences de déploiement *in situ*
  - MOSAR / i-Bird
  - AFSSET / TubExpo
- Aperçu des enjeux « réseaux de capteurs »
- Outils de simulation / développement
- SensLAB : Plateforme de test très large échelle

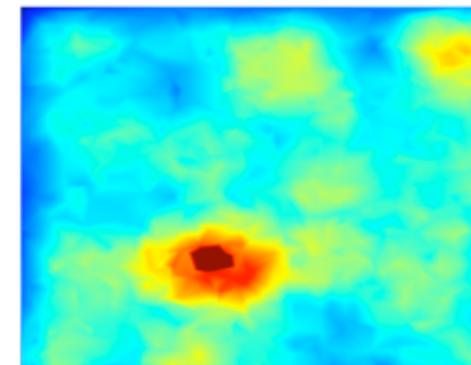
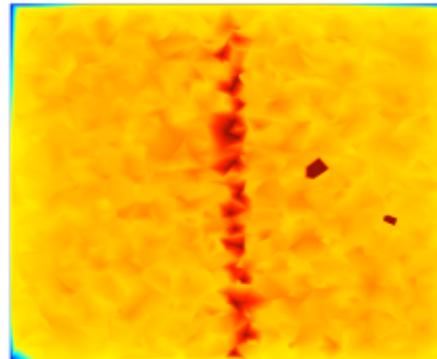
# Quelques grands classiques

- MAC protocols
  - Neighbor discovery
  - 1-1, N-1, 1-N routing
  - Leader election protocols
  - clustering protocols
  - time synchronization protocols
  - activity scheduling
  - etc.
- Constraints:
    - energy efficiency
    - real-time
    - QoS
    - etc.



# Métriques

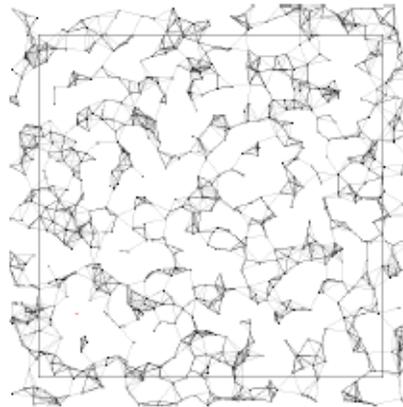
- Classical metrics:
  - Bandwidth
  - Latency
- Energy
  - Global energy consumption
  - Max energy consumption
  - Network lifetime
- Network lifetime
  - First node to die
  - x% of nodes dead
  - Based on coverage / connectivity properties
  - Given by the application operation



# Evaluation

## ■ Analyse

- Stochastic geometry
- Percolation
- Process algebra
- Markov chains

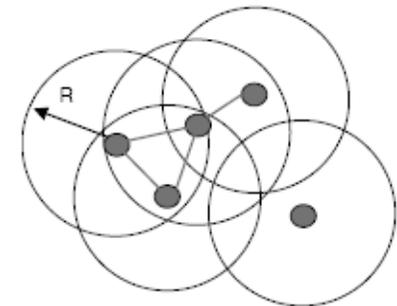


## ■ What to analyse

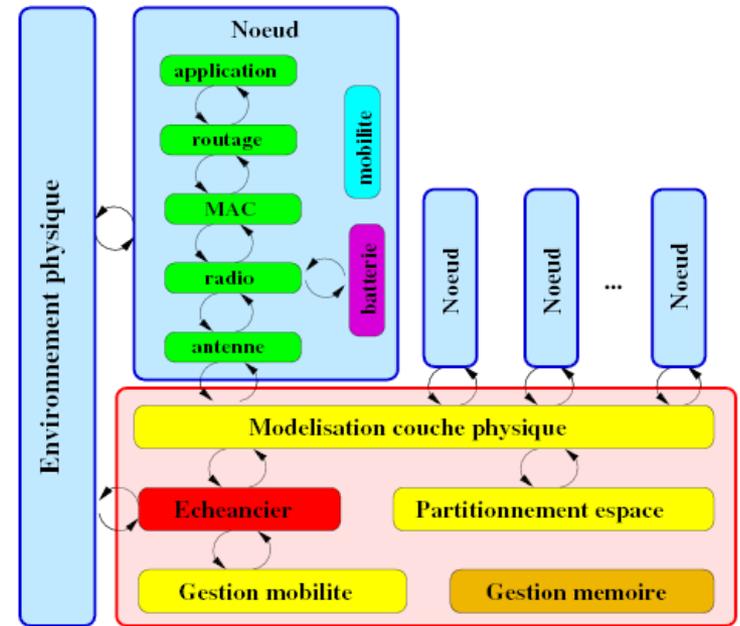
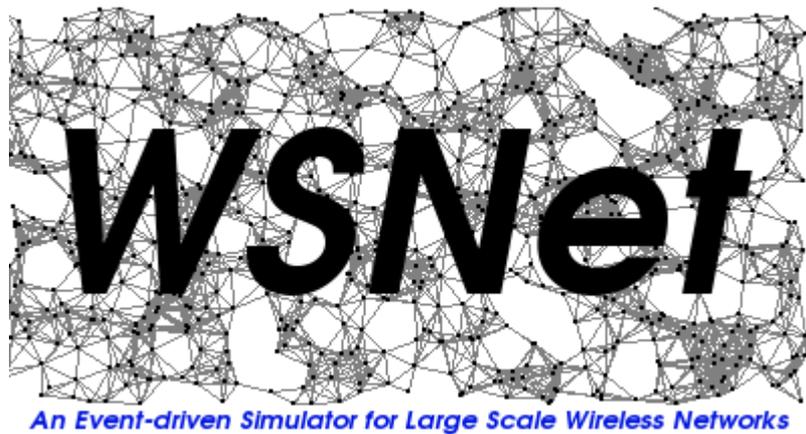
- Which radio model ?
- Which network models ?
- Which modeling precision ?
- Which protocol parameters ?

## ■ Simulation

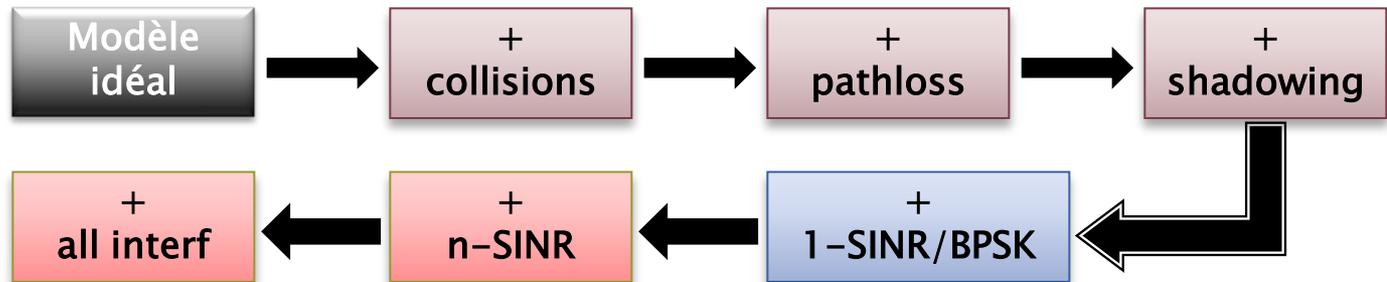
- Network simulator
- SHAWN
- SENSE
- QualNet
- COOJA
- Bonnmotion
- OMNeT++
- **WSNet / WSim**
- TOSSIM
- OPNET



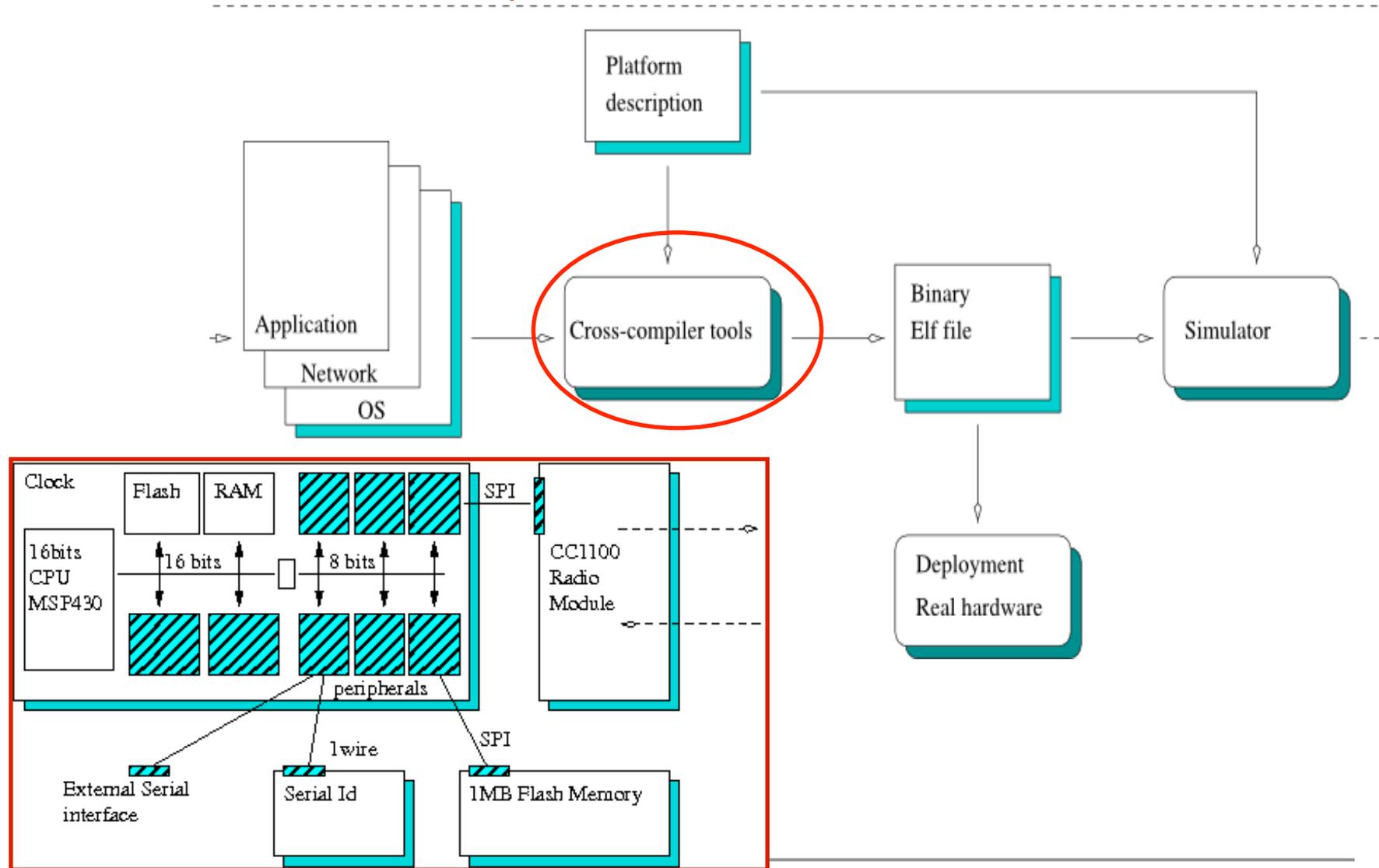
# Suite logicielle complète / précise



**Modélisation  
couche PHY**



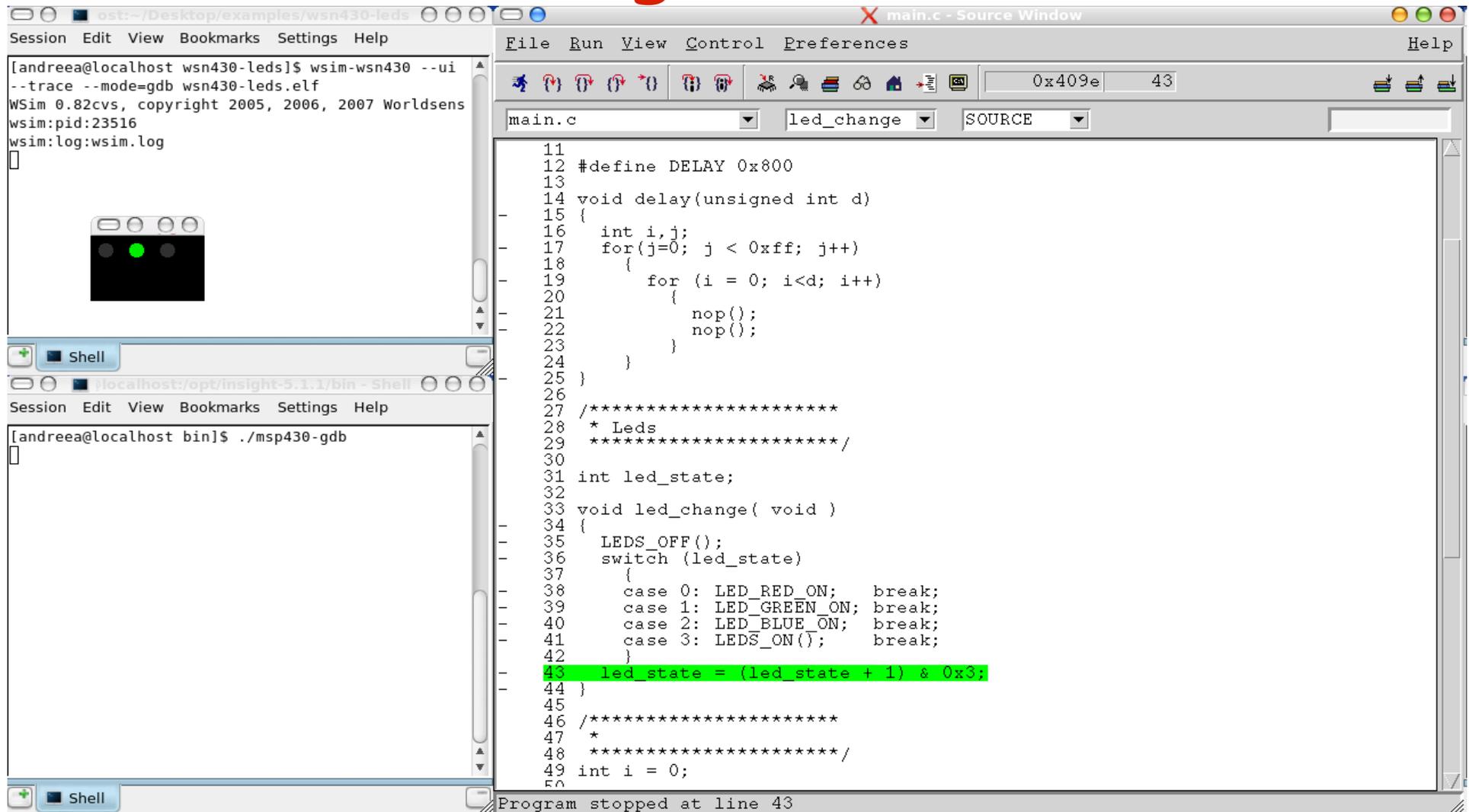
# WSIM : Full platform simulator



# WSIM

- Full instruction set support for the target microcontroller
- Cycle-accurate simulation
- Simulation of peripherals such as timers
- Interrupts
- Cycle-accurate simulation of other peripherals (e.g. UART)
- External peripherals (radio modules, LCD display)
- A full system debug and performance analysis framework

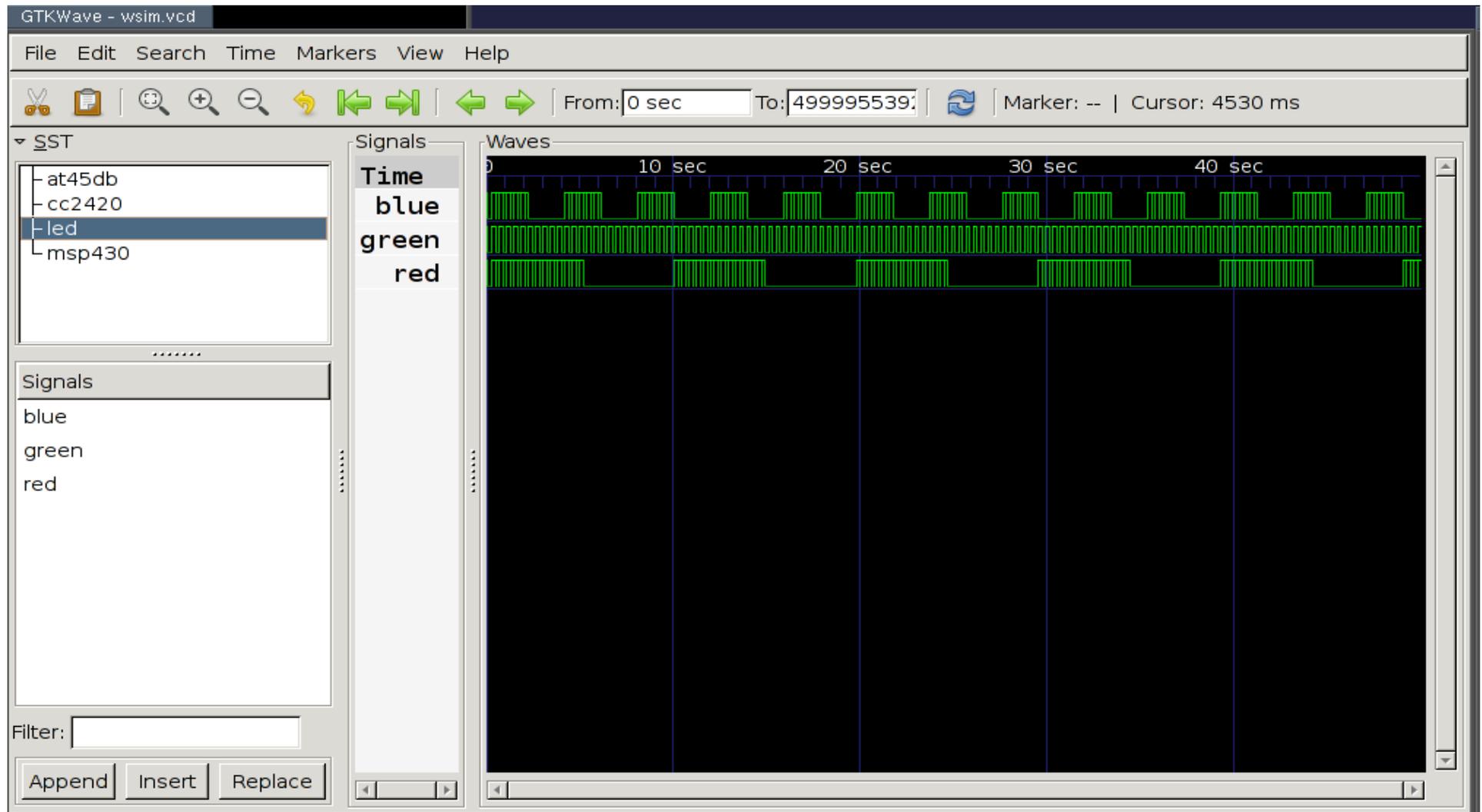
# WSIM : debug



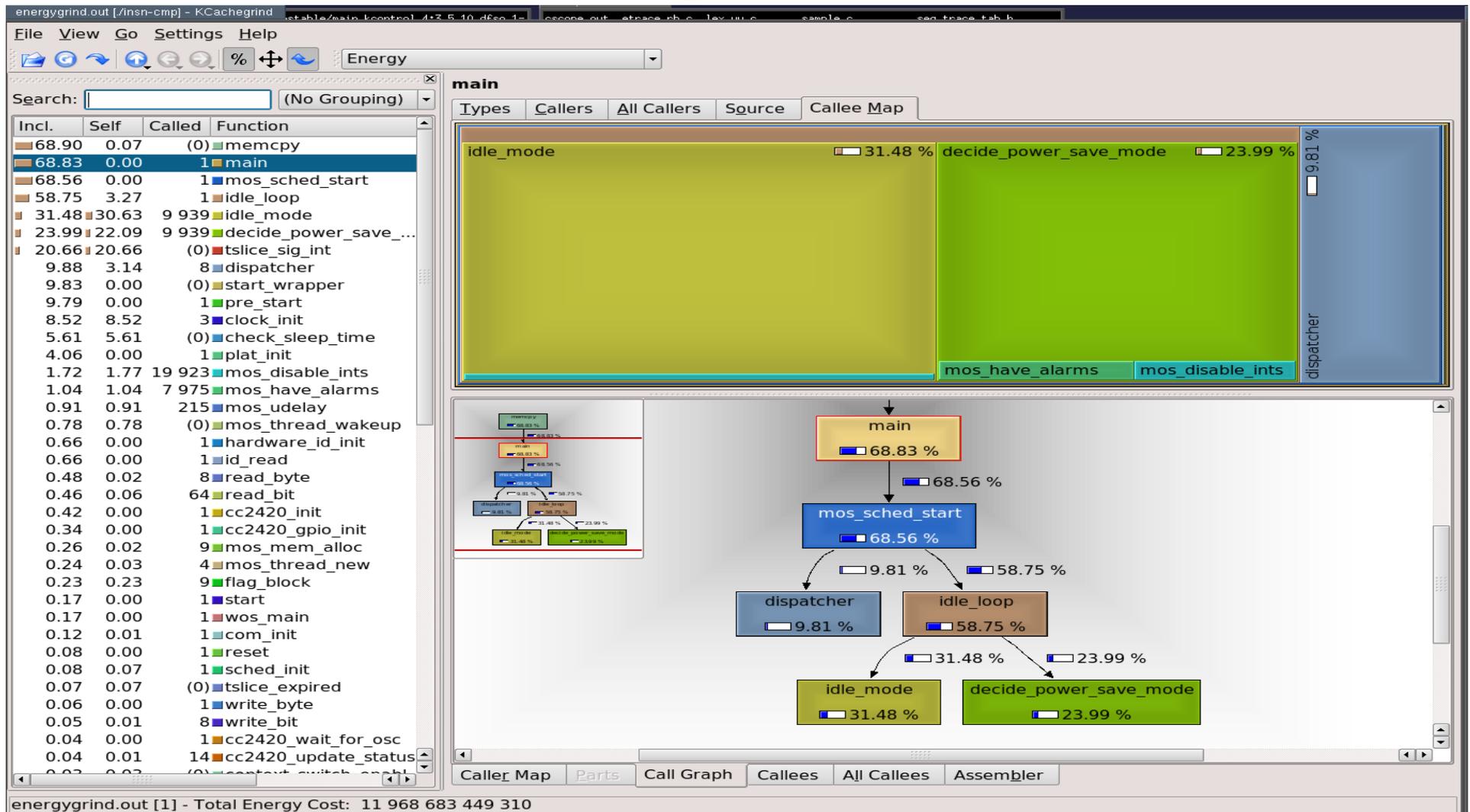
The screenshot displays the WSIM (Worldsims) debugging environment. It consists of three main windows:

- Terminal Window (Top Left):** Shows the execution of the `wsim-wsn430` command with options `--ui` and `--mode=gdb`. The output includes the version `WSim 0.82cvs`, copyright information, and the process ID `wsim:pid:23516`. Below the terminal, a small window shows a black square with a single green dot, representing the state of the simulated LEDs.
- Shell Window (Bottom Left):** Shows the execution of the `./msp430-gdb` command, which has started the GDB debugger.
- Source Window (Right):** Displays the source code of `main.c`. The code defines a `delay` function and a `led_change` function. The `led_change` function uses a `switch` statement to set the state of three LEDs (Red, Green, Blue) and then increments the state. Line 43, `led_state = (led_state + 1) & 0x3;`, is highlighted in green, and the status bar at the bottom indicates "Program stopped at line 43".

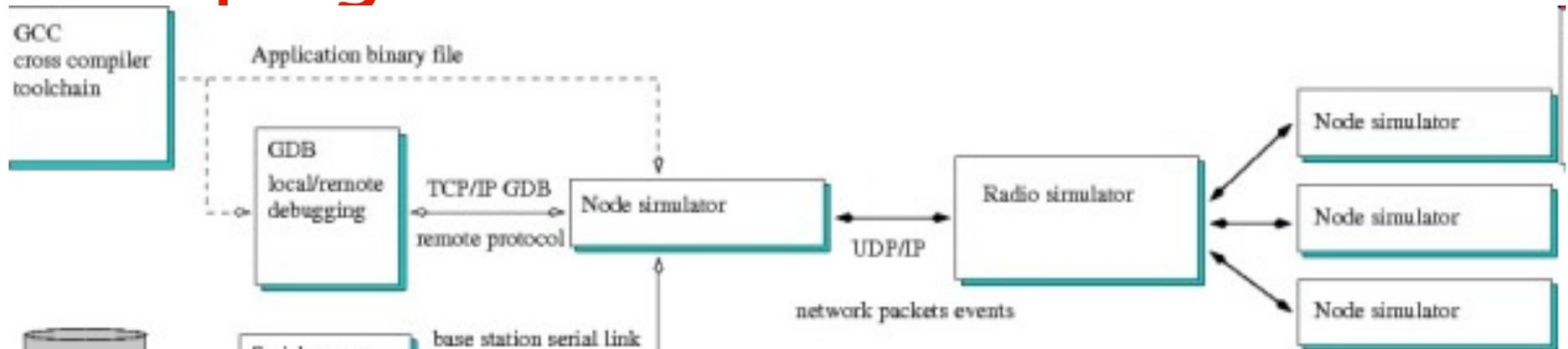
# WSIM : GTKWave



# WSIM : Cachegrind



# Couplage WSIM + WSNET



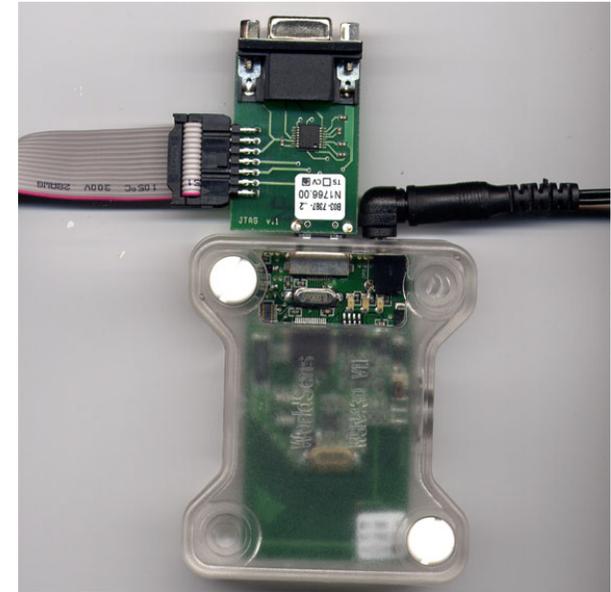
The screenshot shows a terminal window with several panes. The top pane shows network logs for a pan ID 22101 and address 11:01, including acknowledgments and data reception. Below it are four panes for WSim 0, WSim 1, WSim 2, and WSim 3, each displaying simulation logs with timestamps and sequence numbers (seq). The logs show SYN and TIME events, indicating network communication between nodes.

# Plan

- Retour sur 2 expériences de déploiement *in situ*
  - MOSAR / i-Bird
  - AFSSET / TubExpo
- Aperçu des enjeux « réseaux de capteurs »
- Outils de simulation / développement
- **SensLAB : Plateforme de test très large échelle**

# Déploiement d'applications réelles

- Créer de nouveaux protocoles
  - spécification, conception
  - simulation
  - **Expérimentation**
- Problème d'expérimenter à large échelle
  - Extrêmement fastidieux dès 10 capteurs
  - **procédure manuelle, longue, contraignante, peu gratifiante**



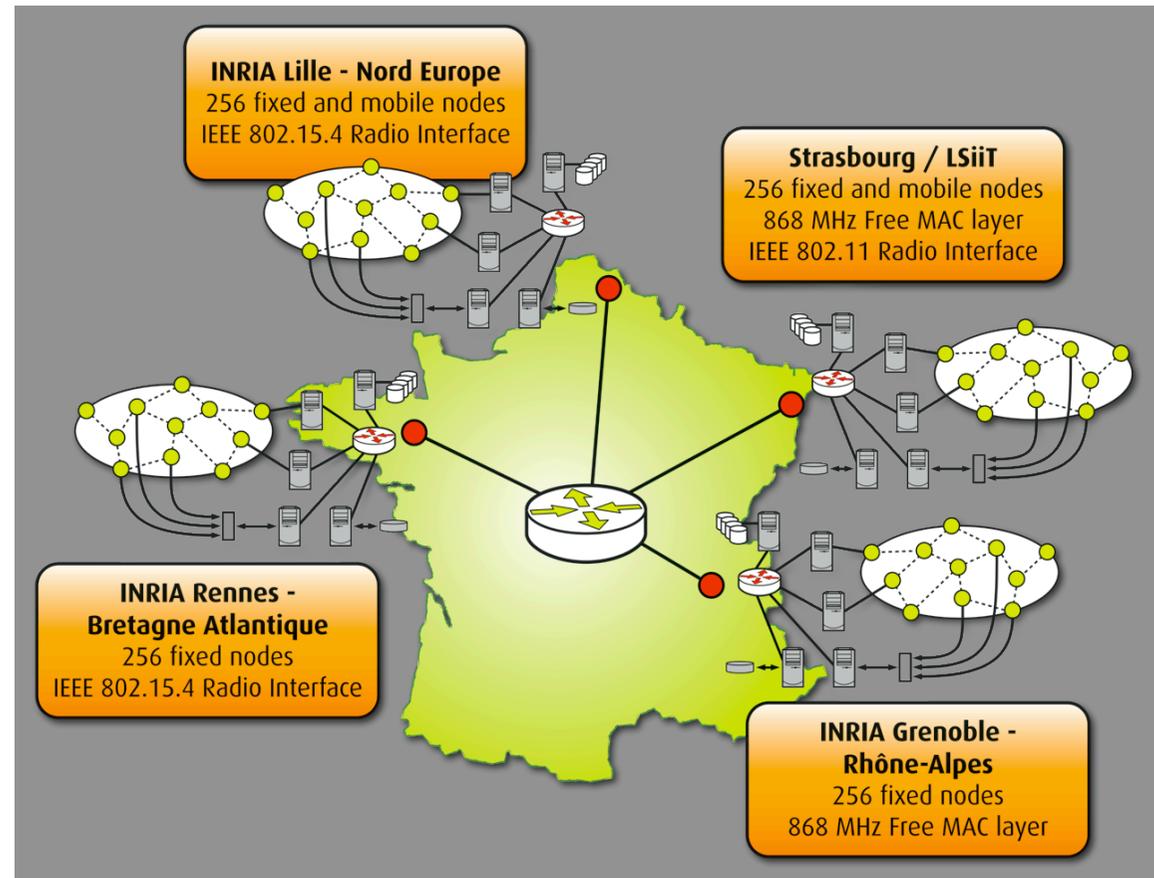
- **Nécessité de créer un outil scientifique spécifique**
- **Notion d'expérience scientifique / reproductibilité**

# Plate-forme expérimentale

- But de SensLAB
  - Plate-forme d'expérimentation de réseau de capteurs
  - Outils large échelle pour la communauté scientifique
  - Projet ANR
    - Kickoff février 2008
    - durée 36 mois
- Spécificités
  - Distribuée sur 4 sites distants
  - Grande échelle avec 256 capteurs par site
  - Automatisée / Ouverte
  - Accessible à distance

# Plate-forme expérimentale

- 6 partenaires du projet SensLAB
  - Académiques
    - INRIA
      - ASAP
      - D-NET
      - POPS
      - UPMC / LIP6
      - LSIIT
  - Industriels
    - Thalès



# Cahier des charges

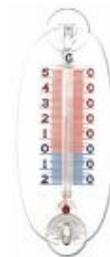
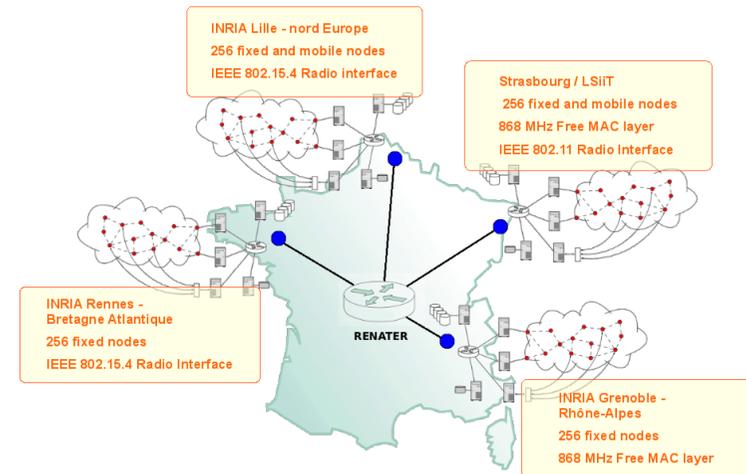
- Outil scientifique national
  - Large échelle → 1000 nœuds
  - Générique / Ouverte
  - Automatisée
  - Hétérogène
  - Accessible à distance
- Fonctionnalités
  - Monitoring non intrusif des applications
    - Énergie,
    - Radio
    - Activité
- Outils de validation
  - A posteriori
  - Prototypage, debug,
  - Evaluation de performance
- Expériences reproductibles
  - *Versioning* des expérimentations
  - *Log / replay* des stimuli

# Cahier des charges

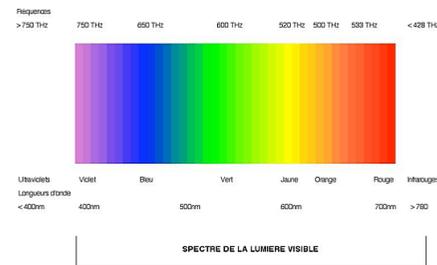
- Hardware
  - Accès temps réel / robuste / fiable à la plate forme distribué
  - Canal retour fiable / filaire pour la gestion et les logs
- Software
  - Support de plusieurs applications simultanément
  - Garanti de la sécurité et de l'intégrité des données générées durant une expérience
  - Offrir un accès au données en temps réel durant une expérience

# Caractéristiques très générales

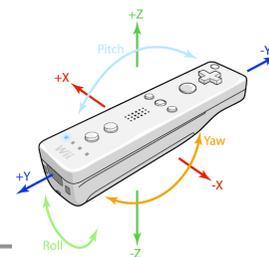
- 4 sites complémentaires :
  - Technologies radio
    - Zigbee IEEE 802.15.4 2,4GHz (TI CC2420)
    - Open MAC 868MHz (TI CC1101)
    - Wi-Fi IEEE 802.11b
  - Senseurs standards
    - température
    - luminosité
    - acoustique
  - Senseurs optionnels
    - Accéléromètre / gyroscope
    - accéléromètre + GPS



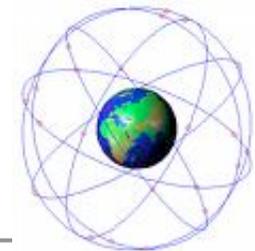
+



+

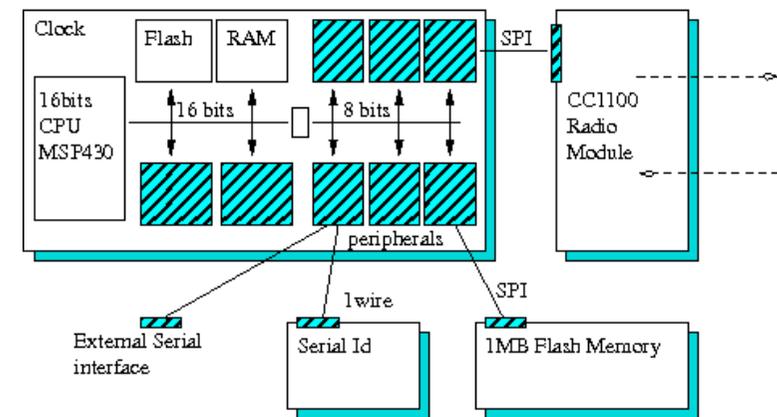
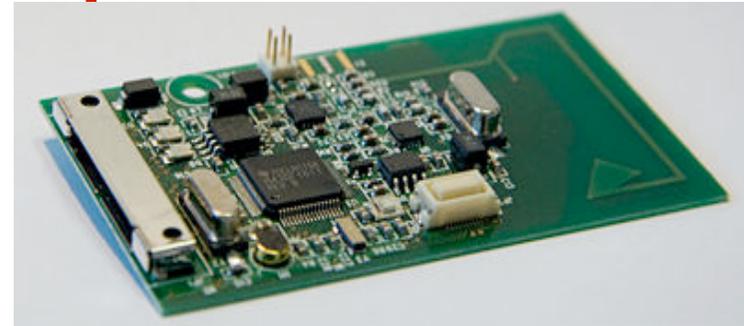


et / ou

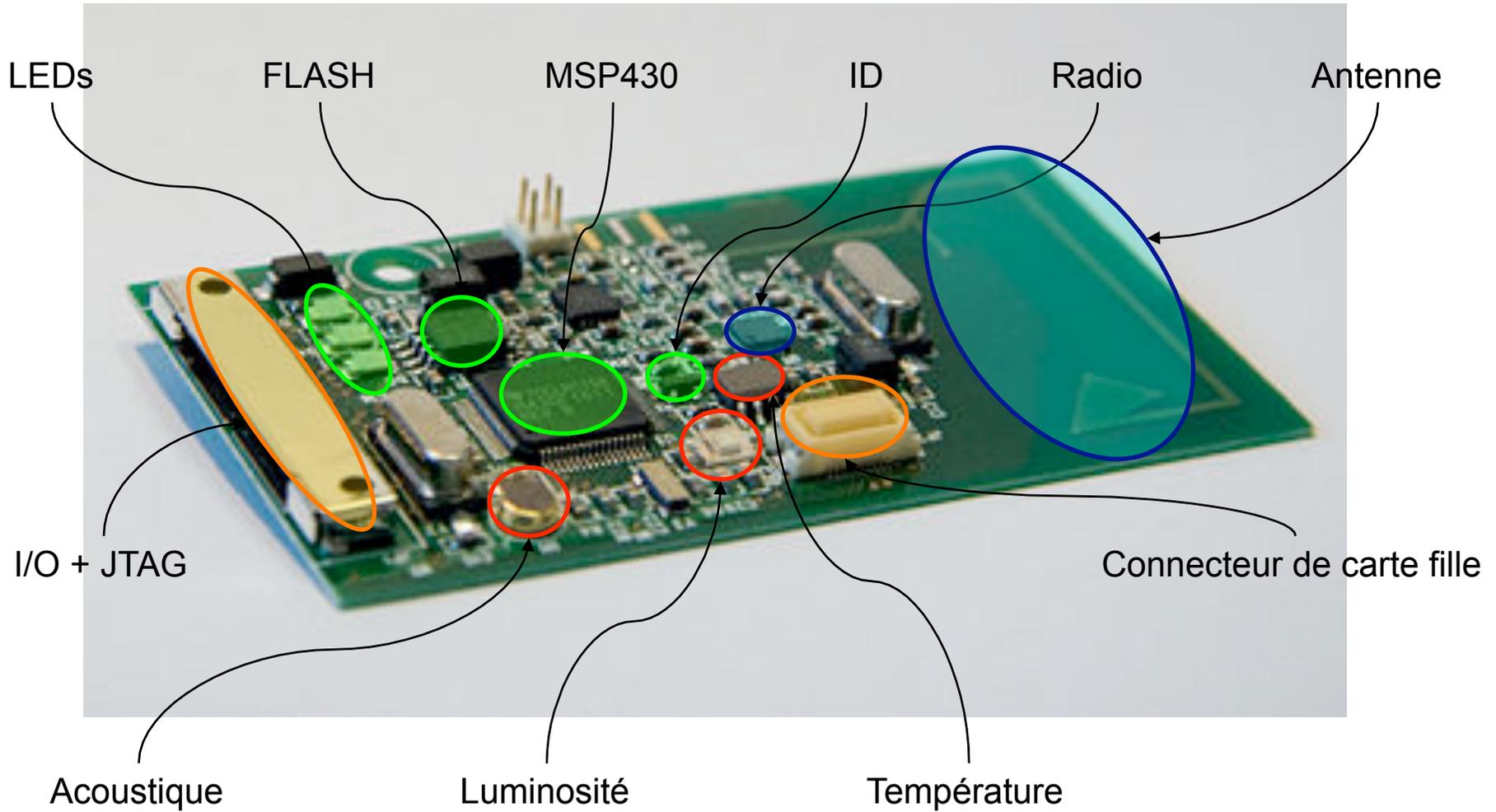


# Architecture d'un capteur

- Redéveloppé en interne
- Caractéristiques techniques
  - Micro-contrôleur TI MSP430-1611
    - 8Mhz@16bit
    - 48Ko ROM
    - 10Ko RAM
  - Interface Radio TI CC1101/CC2420
    - fréquence 868Mhz/2.4Ghz
    - puissance de -30dBm à +10 dBm
  - Numéro de série unique DS2411 sur 6 octets
  - Mémoire Flash externe ST M25P80 de 1Mo
  - Batteries Varta avec contrôleur de charge MCP73861

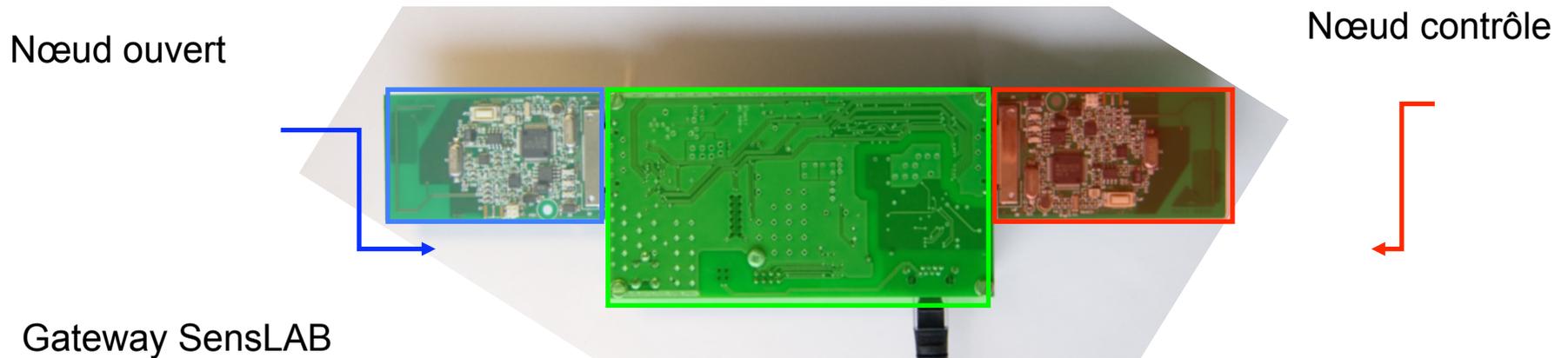


# Capteurs SensLAB (D1.1a)



# Nœud SensLAB (D1.1b)

- Qu'est-ce qu'un Nœud SensLAB ?
    - Ouvert, *i.e.*, pas d'hypothèse sur le soft déployé sur le capteur
    - Canal retour fiable
      - un nœud ouvert SensLAB dédié à l'utilisateur / expérience
      - un nœud de contrôle SensLAB
      - une gateway SensLAB
- = Nœud Ouvert + Gateway SensLAB + Nœud de Contrôle



# Nœud SensLAB

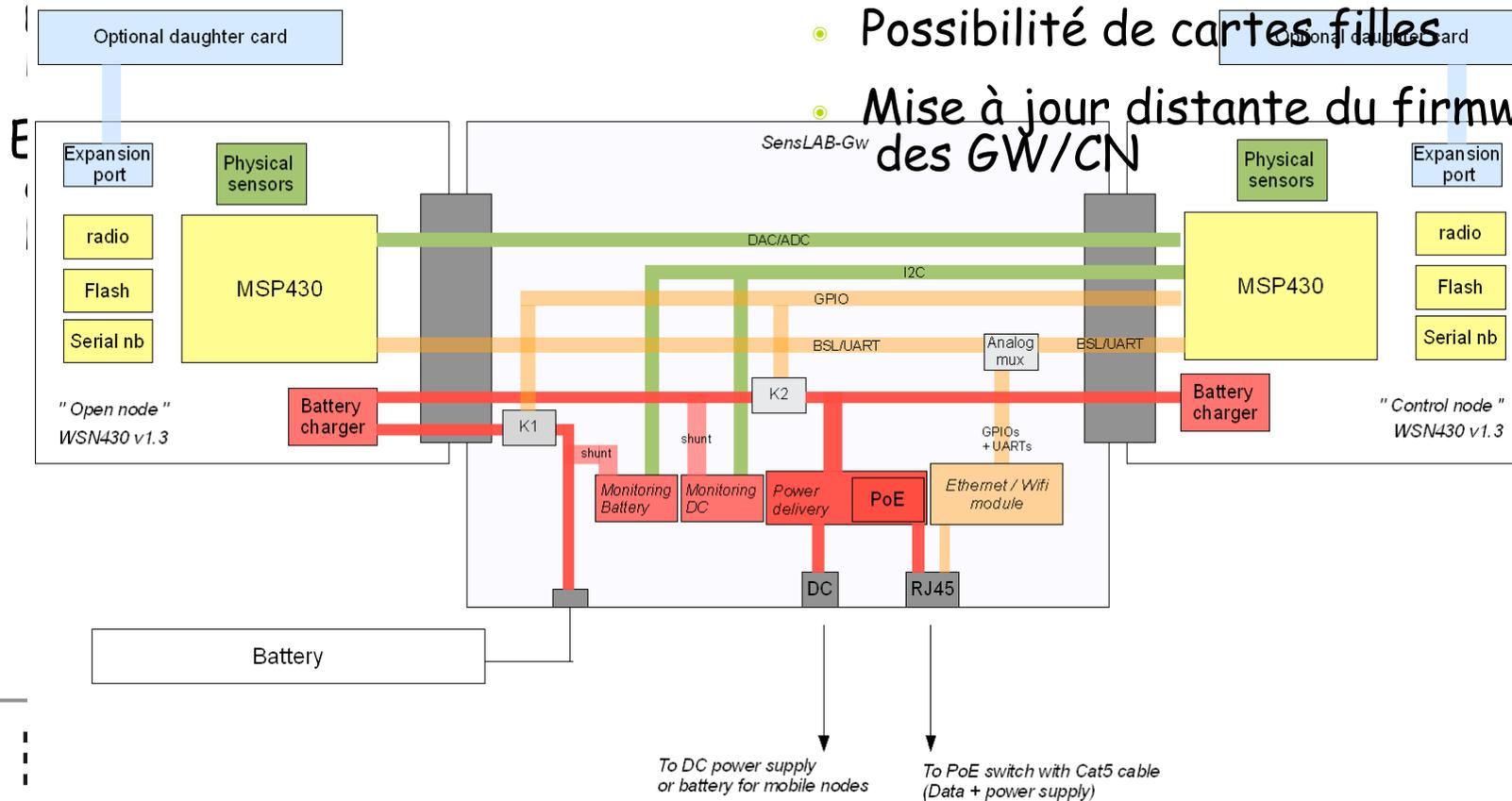
- Nœud Ouvert et Nœud de Contrôle
  - Techniquement identiques → gain/simplicité de réalisation
  - Rôles différents
- Nœud Ouvert
  - Entièrement programmable par l'utilisateur !
- Nœud de Contrôle
  - Firmware non modifiable par l'utilisateur
  - Monitorer le Nœud Ouvert
  - Générer des interférences

# Nœud SensLAB

- ◉ Rôle de la Gateway SensLAB
  - Contrôler le Nœud Ouvert et le Nœud de Contrôle
  - Contrôler et mesurer l'alimentation électrique du Nœud Ouvert
  - Simuler une panne du Nœud Ouvert
  - Récupérer les mesures du Nœud de Contrôle
  - Fournir une interface de communication pour le Node Handler

# Architecture du nœud SensLAB

- Déploiement automatique de firmware
- Monitoring de consommation (batterie/DC)
- Monitoring radio / injection bruit
- Configuration des capteurs en
- Power over Ethernet pour une alimentation standardisée et une gestion simple
- Configuration de chaque nœud ouvert en mode « sink » (redirection des input/output)
- Possibilité de cartes filles
- Mise à jour distante du firmware des GW/CN



# Se connecter à un nœud SensLAB

- Comment se connecter au Nœud SensLAB ?
  - Par l'intermédiaire de la Gateway en IPv4
  - En Ethernet (nœud fixe)
  - En Wi-Fi (nœud mobile, nœud extérieur)



# Plate-forme expérimentale

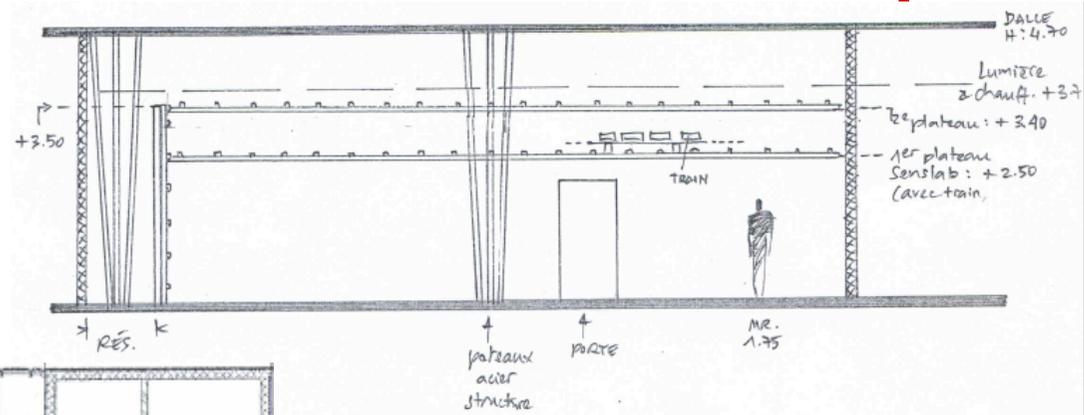
- Résumé des fonctionnalités par site :

	Grenoble	Lille	Rennes	Strasbourg
Zigbee		X	X	
OpenMAC	X			X
802.11b				X

Intérieur	X	X	X	X
Mobilité		X		X
Extérieur				X

Accéléromètre		X		X
GPS				X

# Site INRIA Lille - Nord Europe



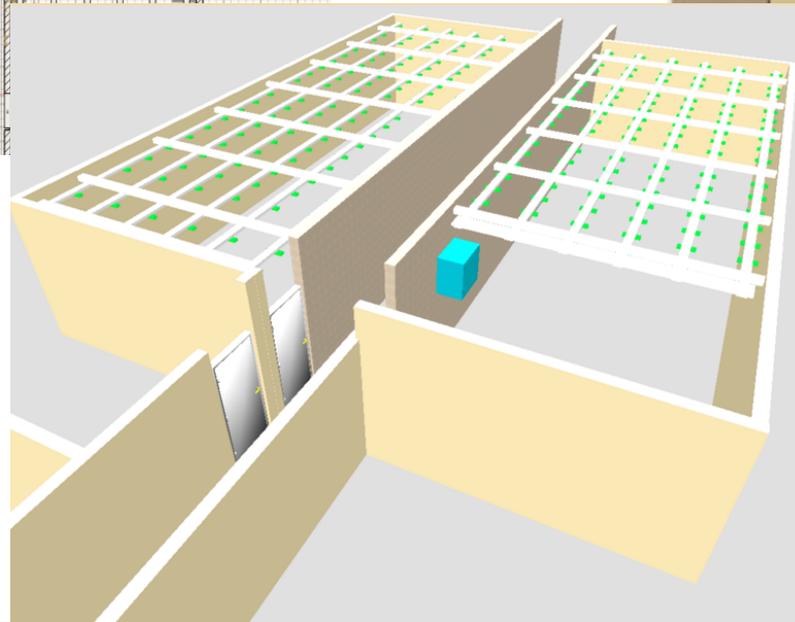
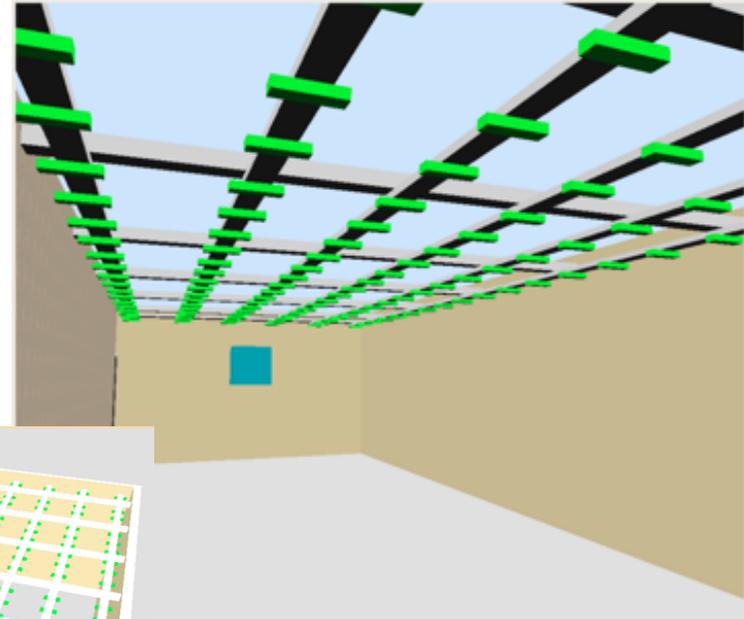
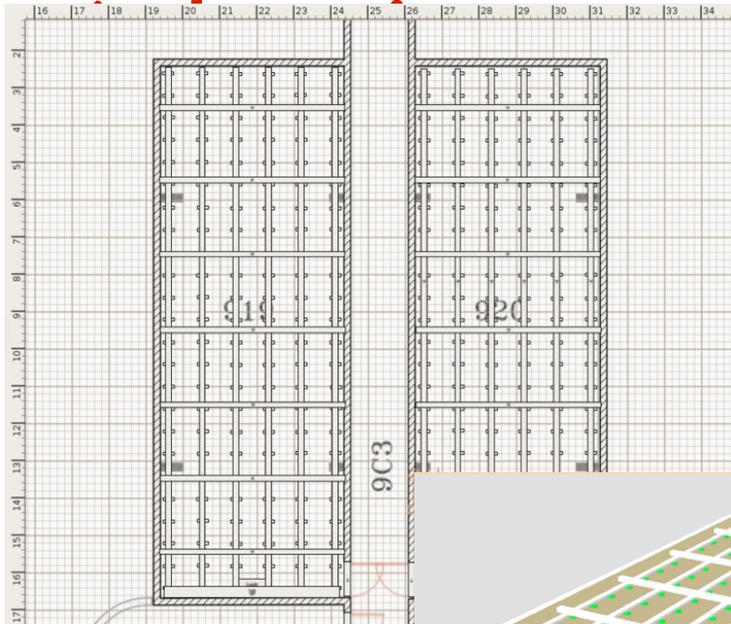
## Euratechnologies

- 2 plateaux de plexiglas
  - 2.50m et 3.40m
- 32 capteurs mobiles sur rail

# Site INRIA Lille - Nord Europe

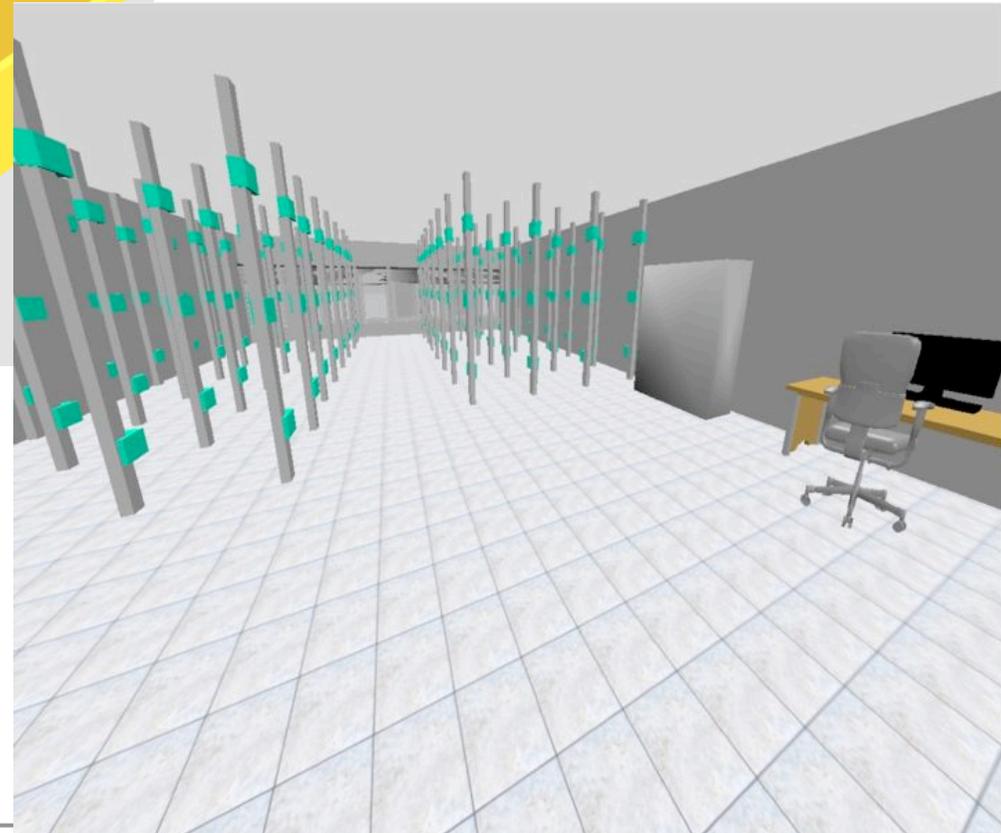
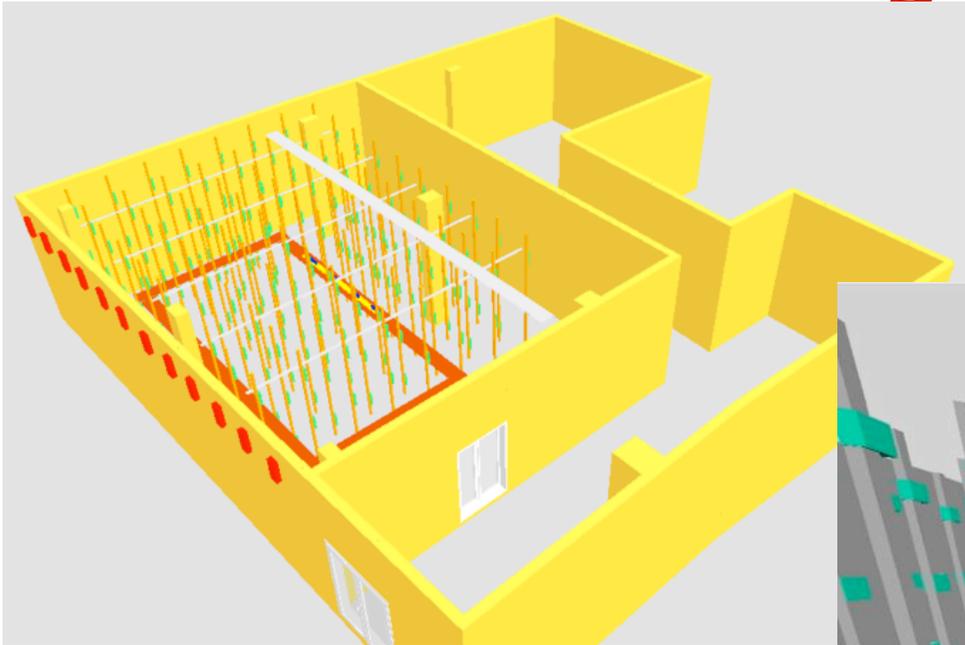


# Site INRIA Rennes - Bretagne



- IRISA
  - 2 salles
  - Goulot d'étranglement

# Site Strasbourg - LSIIT

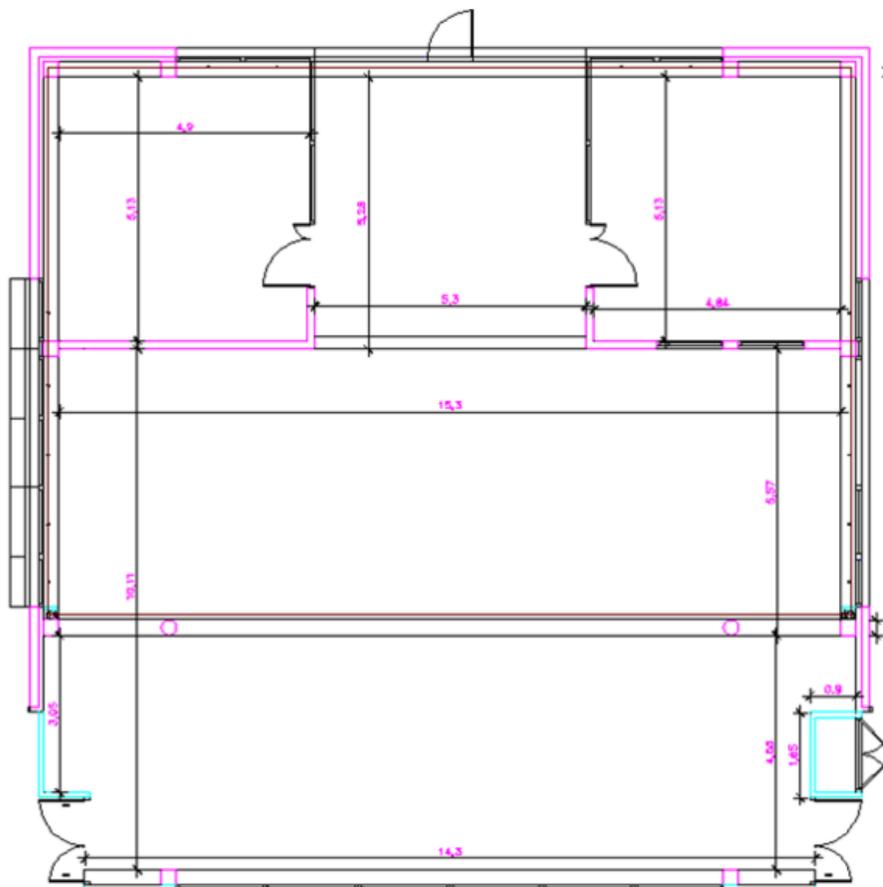


- LSIIT
  - Connexion sur l'extérieur
  - 16 Capteurs mobiles sur rail

# Site Strasbourg - LSIIT



# Site INRIA Grenoble - Rhône Alpes



- Halle robotique
  - 14m x 14m
  - Mur / plafond / irrégulier

# Déploiement sur le site INRIA Grenoble - Rhône Alpes



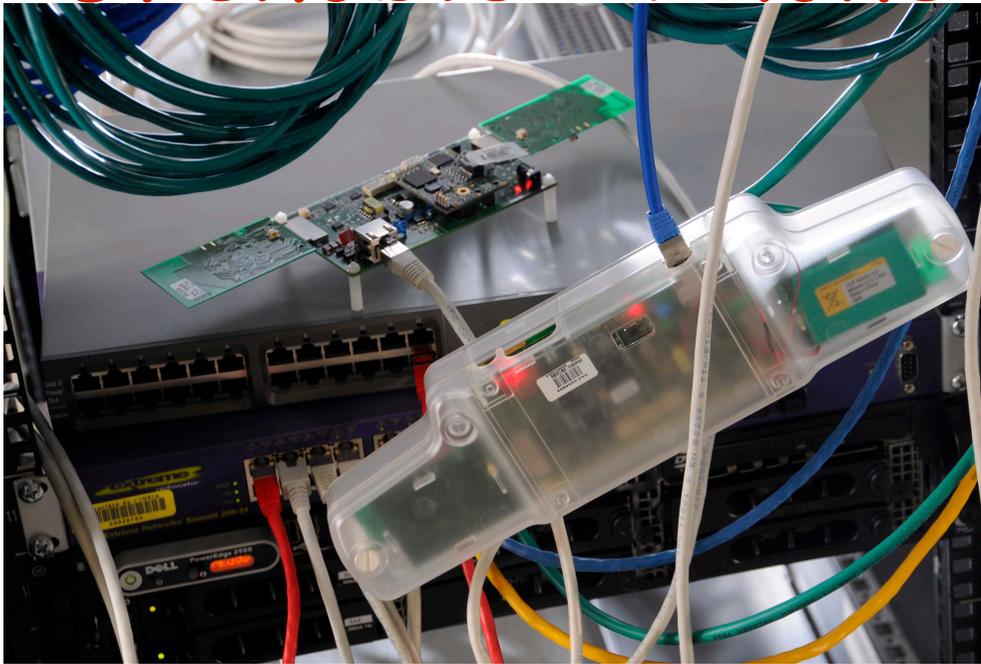
© INRIA / Photo Keksonen

# Déploiement sur le site INRIA Grenoble - Rhône Alpes



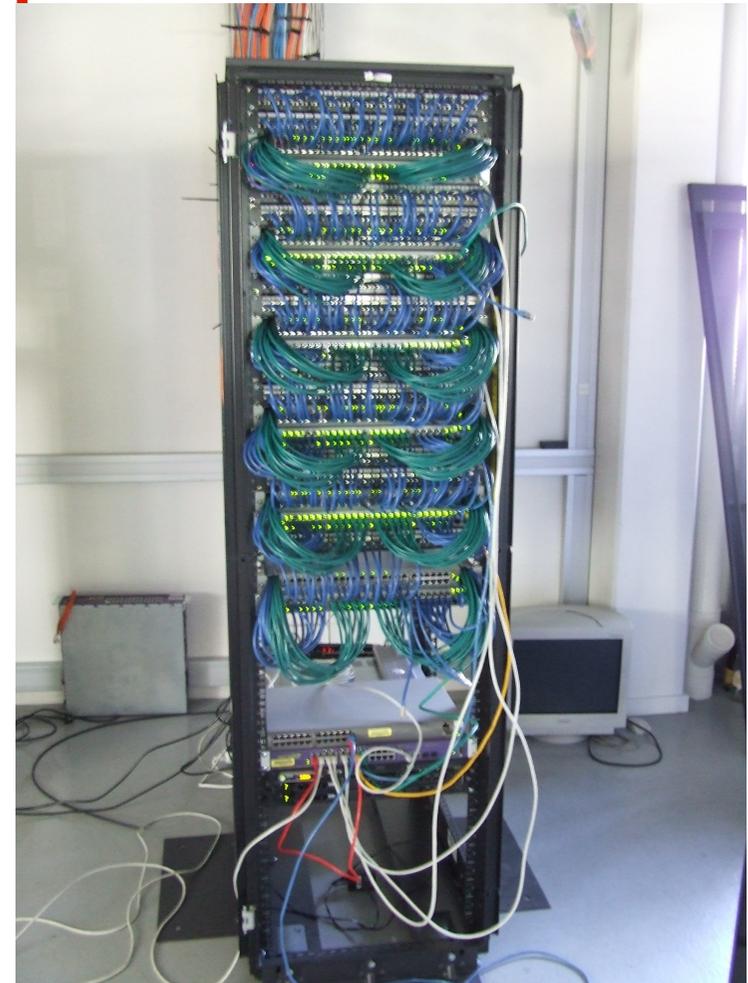
© INRIA / Photo Keksonen

# Déploiement sur le site INRIA Grenoble - Rhône Alpes



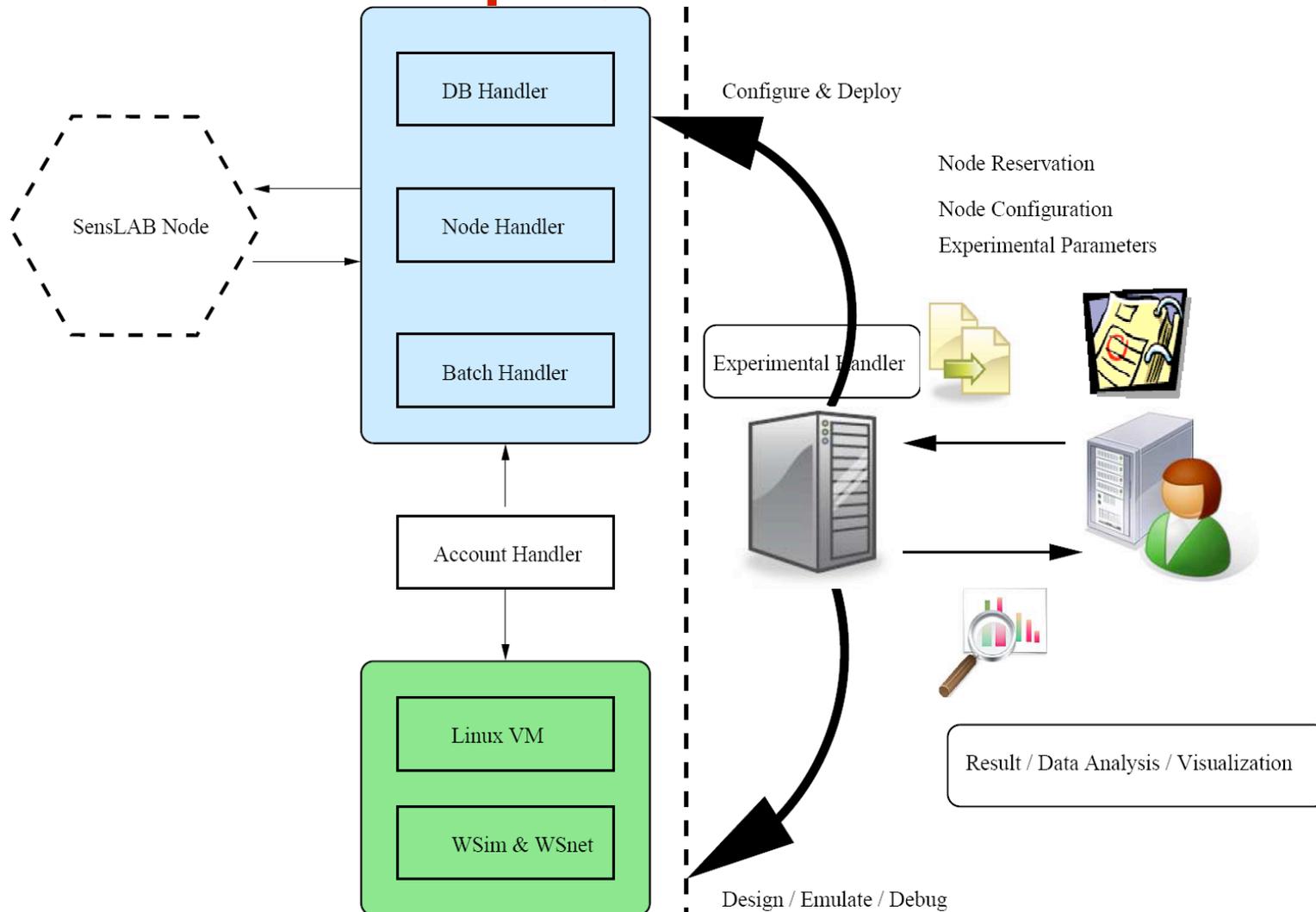
© INRIA / Photo Keksonen

Ouverture  
septembre  
2010



© INRIA / Photo Keksonen

# Vue très simplifiée !



# Merci!

## Institut Pasteur/Inserm

- Pr Didier Guillemot
- Dr Jérôme Salomon
- Inga Bertucci
- Laure Petit
- Odile Le Minor
- Anne Demond
- Et le reste de l'U657/PhEMI

## Hôpital de Garches – AP-HP

- Pr Jean-Louis Herrmann
- Dr Christine Lawrence
- Corinne Langlois
- Dr Estelle Ronco
- Syana Fausta
- Mathilde Padilla
- Carole Grégoire
- Sylvie Blua
- Marie-Noëlle Sculo et Jean-Pierre Menjon
- Marie-Hélène Canneson et Patricia Béal
- Anne-Laure Roux et Yassine Boutrad
- Et le reste du laboratoire de l'Hôpital de Garches

## Hôpital Maritime de Berck – AP-HP

- Brigitte Martel
- Peggy Vuillin
- Dr Philippe Tronchet
- Catherine Lys
- Catherine Sacleux
- Joëlle Sabatier
- Valérie François
- Christelle Billet
- Valérie Charlier
- Christine Lebas, Marie-Cécile Colmant, et Pascal Delmotte
- Les cadres, médecins et personnel administratif
- L'équipe soignante pour leur participation
- Les patients pour leur participation

## AP-HP

- Jean-Michel Péan
- Christophe Menuet
- Pr Christian Brun-Buisson
- Anouk Vandenberghe

## INRIA

- Antoine Fraboulet
- Guillaume Chelius
- Adrien Friggerii

## InGen Biosciences

- Camille Cyncynatus
- Damien Thomas

## Inserm Transfert

- Jérôme Weinbach
- Delphine Sondaz

## Inserm ADR Paris V

- Lyddie Laaland
- Laurence Parmentier
- Christine Rulliat
- Huguette Pellemeule
- Priscille Riviere

## Institut Pasteur

- Marie-Pierre Landète
- Francis Décheron
- Corinne Jamma

## Equipe i-Bird

- Marie-Laure Delaby
- Marie Perard
- Isabelle Mouton
- Florence Dannet
- Audrey Baraffe
- Jennifer Lassley

## INRIA

- M. Bertier
- R. Pissard Gibollet
- C. Brailon
- C. Burin des Rozières
- L. Lemaître
- N. Mitton
- D. Simplot Ryl
- J. Vandaele

## UMPC / LIP6

- M. Dias de amorim
- T. Claveirole

## LSIIT

- A. Gallais
- T. Noel
- G. Schreiner

## Thales

- Vania Conan
- J. Leguay
- V. Gay

# Plus d'information

- [Film de présentation de MOSAR](#)
- [WebTV de la Cité des sciences et de l'industrie](#)
- [Film de présentation de SensLAB](#)
  
- [www.senslab.info](http://www.senslab.info)
  - Plate forme de test large échelle
- [esimu.gforge.inria.fr](http://esimu.gforge.inria.fr) :
  - Analyse de trace, annotation de code source avec information de performance et de consommation.
- [wsim.gforge.inria.fr](http://wsim.gforge.inria.fr)
  - Emulateur de plateforme de capteur
- [wsnet.gforge.inria.fr](http://wsnet.gforge.inria.fr)
  - Simulateur de réseau radio

