

Journées scientifiques du CNFRS  
« Nanosciences et Radioélectricité »

# Objets communicants et nanotechnologies

**Patrice Senn**

*Expert télécom et microélectronique*

*Paris 20/21 mars 2007*



# Plan de la présentation

1. Introduction: objets communicants – quelques exemples d'application
2. Architectures embarquées
3. Contraintes technologiques et apports des nanotechnologies
4. Perspectives et conclusions

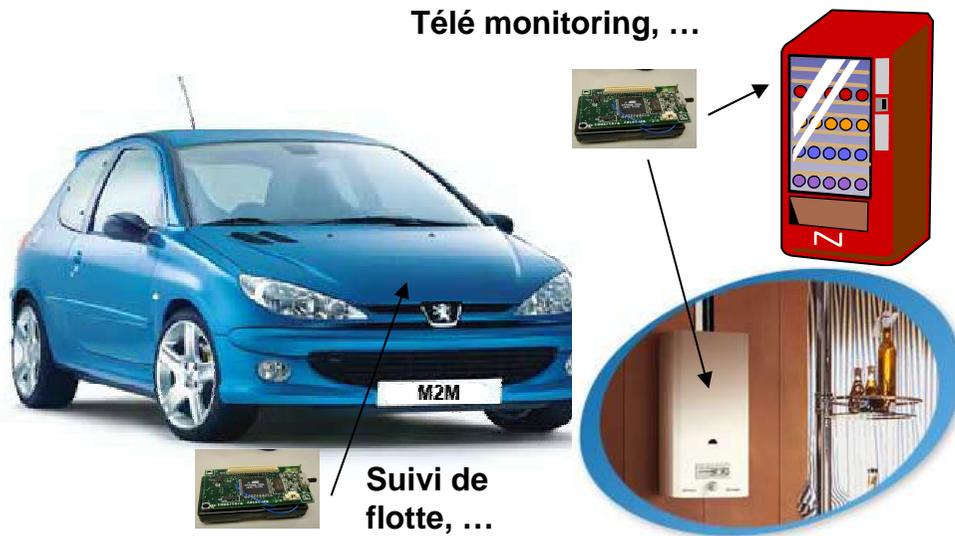
# Objets communicants: « Poussés par la Technologie » ou « Tirés par les Usages » ?

- ▶ **Microelectronics** devices are becoming so small and inexpensive that they can be embedded in almost everything (F. Mattern / ETHZ 2003, SoC'03)
- ▶ **the ultimate Internet revolution will be when all the devices around the world are connected!** (C. Barrett / Intel – 2002)
- ▶ The **future** is not going to be people talking to people; it's not going to be people accessing information. **It's going to be about using machines to talk to other machines on behalf of people.** That's where the growth is going to be. (Paul Saffo, Institute of the Future)
- ▶ **Korea is entering the "U-Society" era** (Daeje Chin, Minister of Information and Communication, Korea): ISSCC'05, San Francisco, February 2005:
  - ▶ "In such society, information technology (IT) enables everyone to enjoy daily life without awareness of IT itself.
  - ▶ "This is made possible by the **"invisible Silicon"** that resides within almost everything in our society, to sense, analyze, and control ourselves and our environment"
  - ▶ ....

# 1. Introduction: objets communicants – quelques exemples d'application

## Objet communicant:

**Module électronique** doté de capacités de communication, de calcul et de mémorisation, voire d'interaction avec son environnement (physique et virtuel), et autonome en énergie et en décision (**sans intervention humaine**)  $\neq$  « microsystème »



21 mars 2007

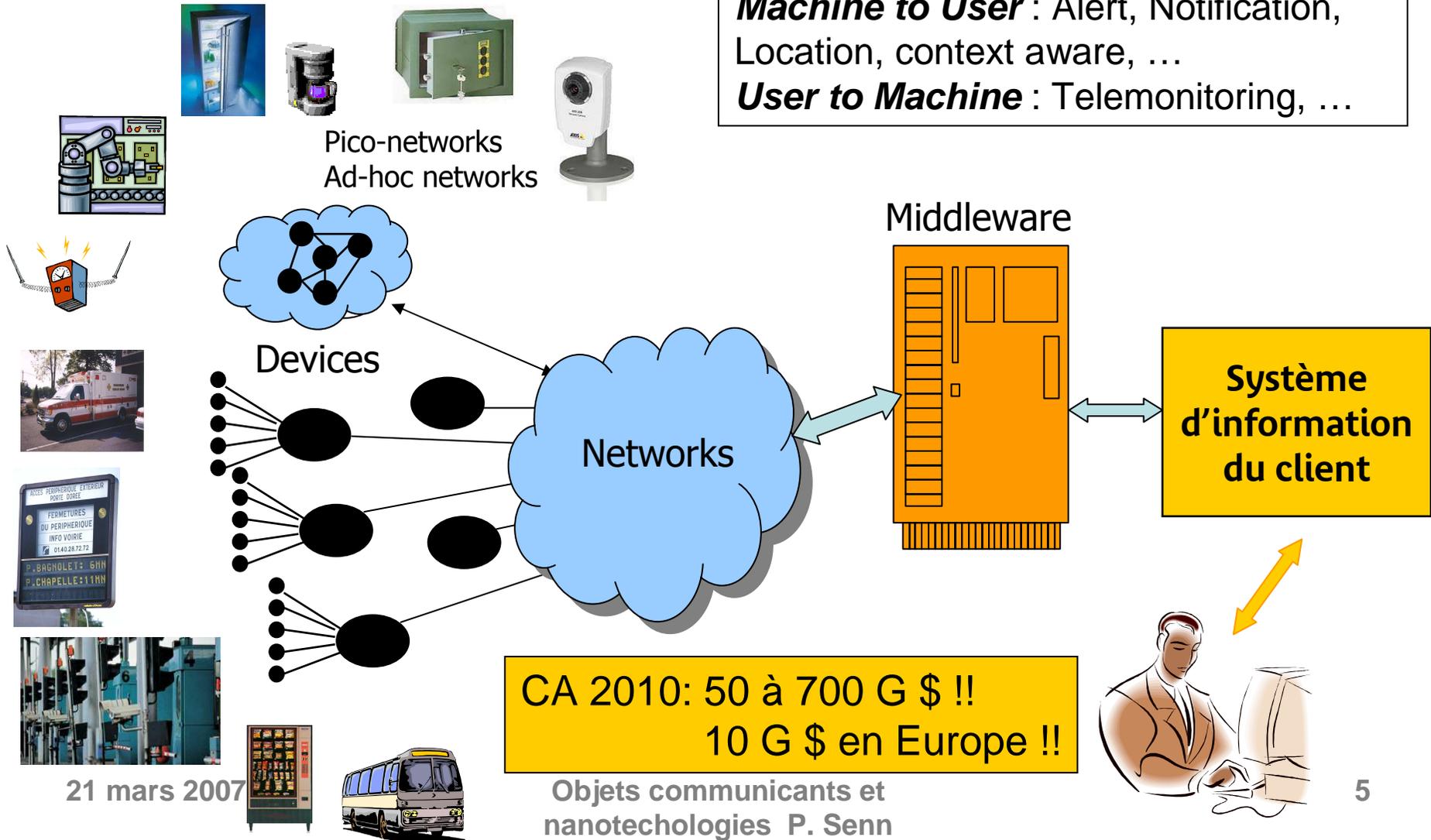
Objets communicants et nanotechnologies P. Senn

Environnement, ...

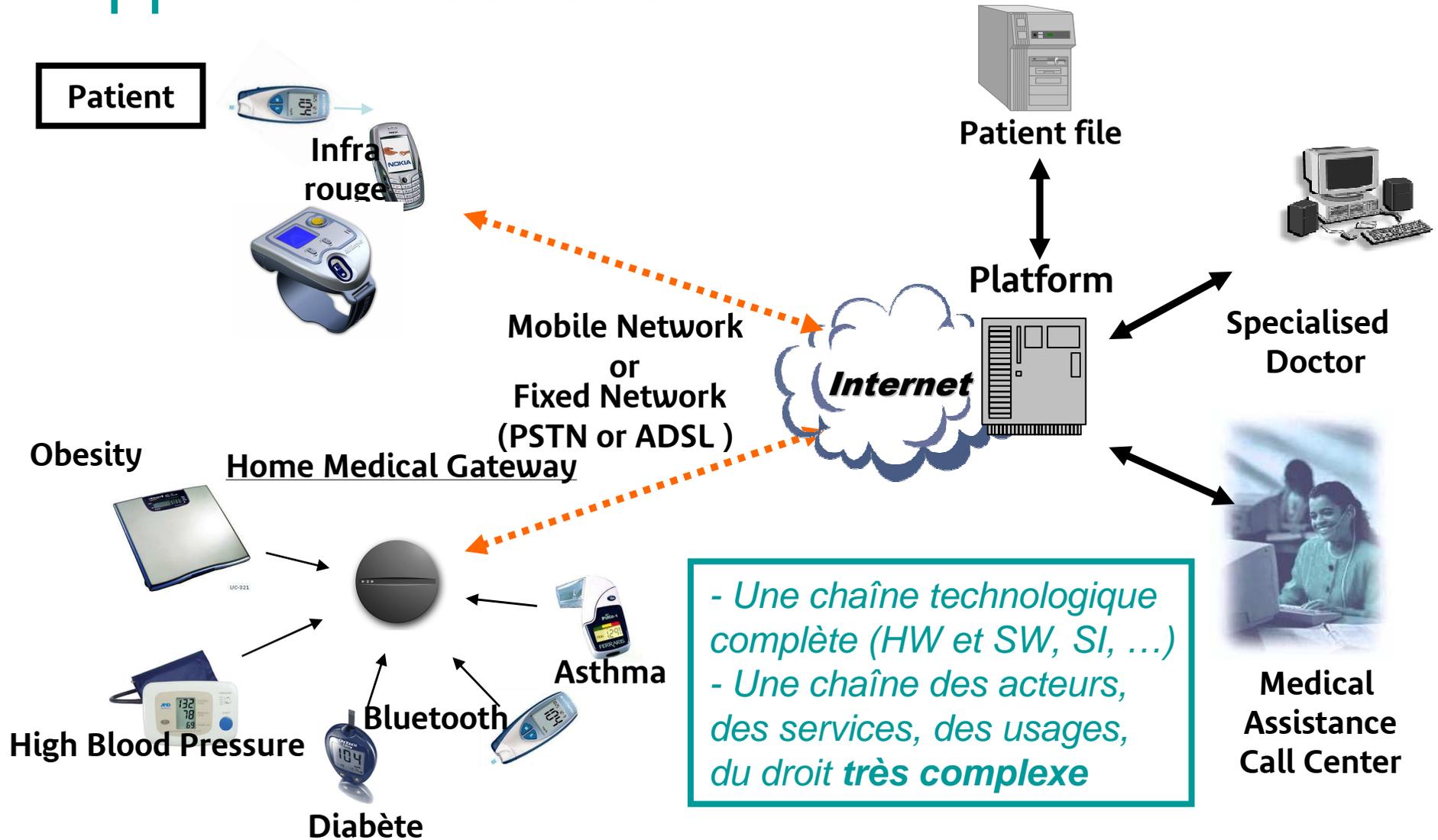
4

# M2M (Machine to Machine) services à base d'objets communicants (de la couche radio au SI)

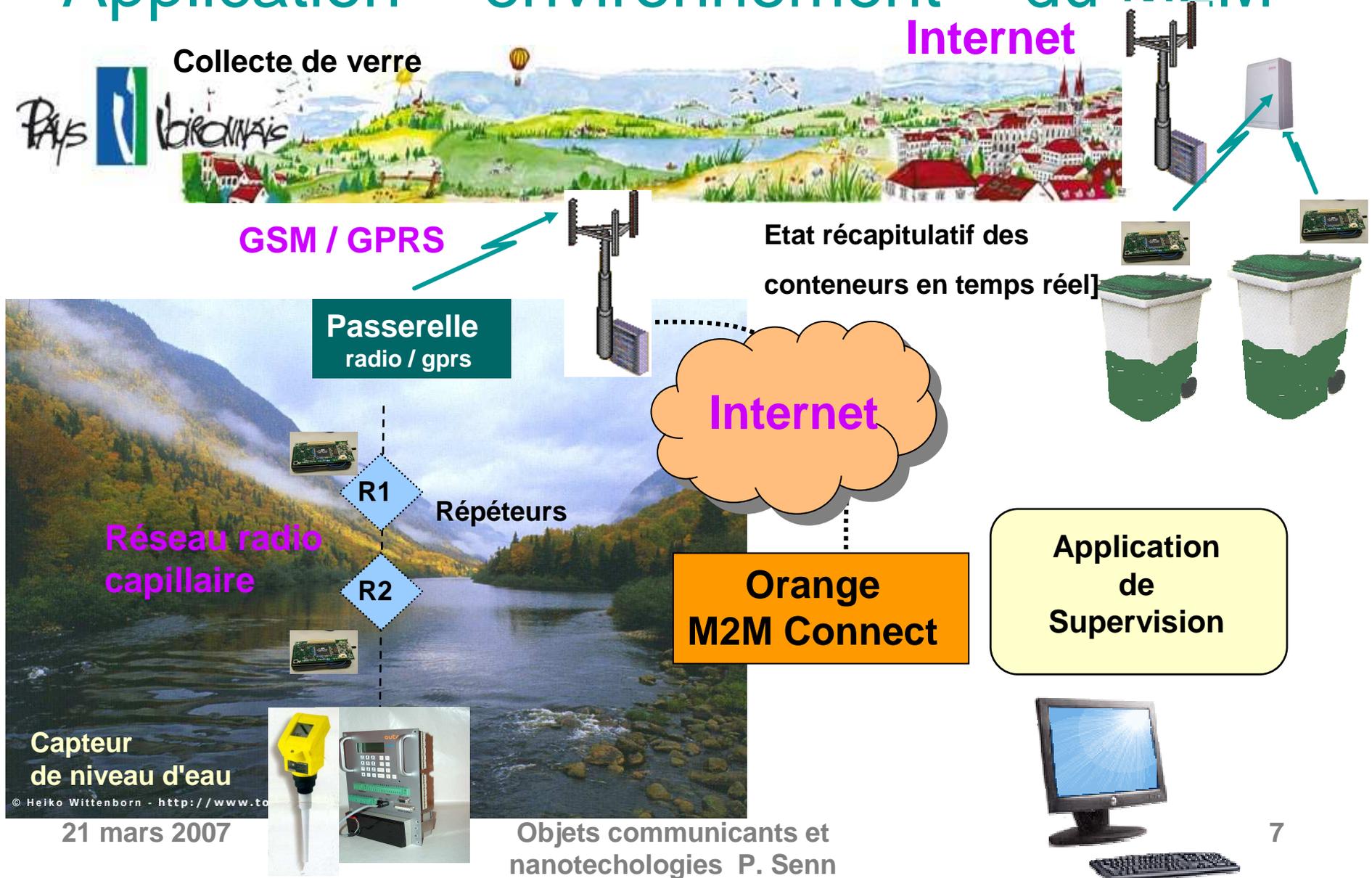
**Machine to User** : Alert, Notification, Location, context aware, ...  
**User to Machine** : Telemonitoring, ...



# Application santé du M2M

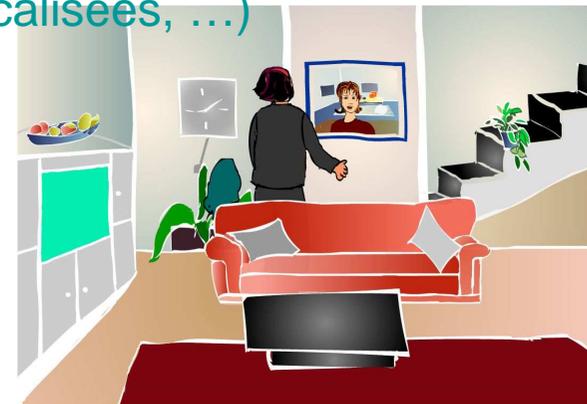
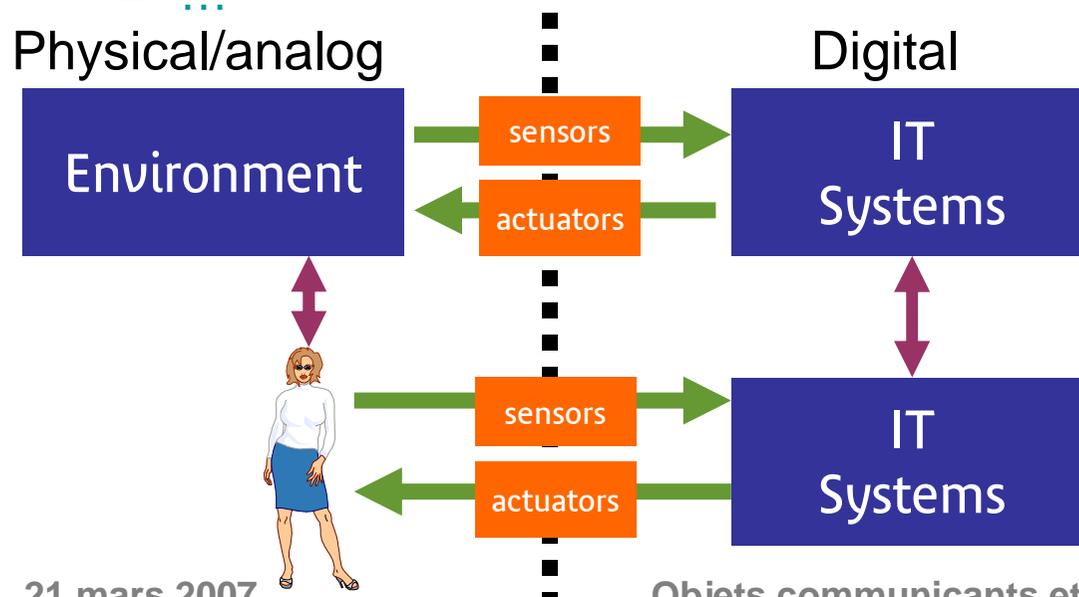


# Application « environnement » du M2M



# L'intelligence ambiante:

- M2M avec une « couche supplémentaire d'intelligence » pour l'analyse du contexte
- Traitement « local » par ontologies\* (proche du web sémantique)
- Feed-back « automatique » sur l'environnement physique
- Applications:
  - Médicales (maintien à domicile, maisons médicalisées, ...)
  - Situations à risques, ...
  - Confort (résidentiel, professionnel, ...)
  - ...



*Cf. France Télécom R&D*



21 mars 2007

\* Ontologie: ensemble structuré de concepts;

Une ontologie est la spécification d'une conceptualisation d'un domaine de connaissance.

Objets communicants et nanotechnologies P. Senn

# 2. Architectures embarquées

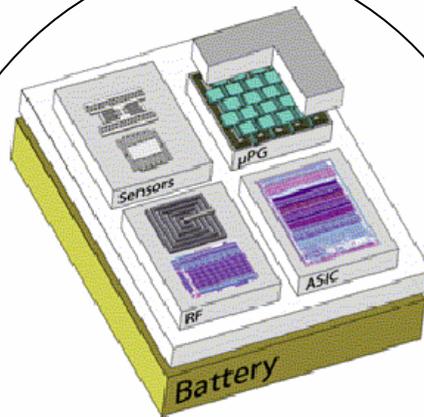
- Du module « GSM » au module RFID passif:



### GSM-GPRS/GPS module

+ alim et antennes  
 + « SIM card »  
 (Wavecom, ...)  
 Typ. <10 km

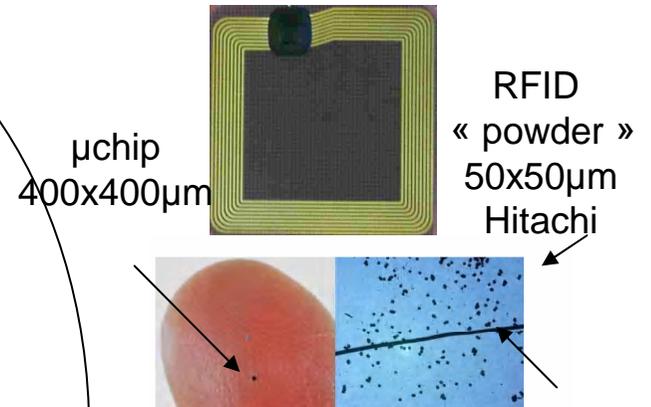
PRU: 20 € !!  
 Quant. (2007): 10 million ?



### TAG actif

Zigbee, BT, WiBree ...  
 Wavenis, Pico radio,  
 RuBee (IEEE 1902.1)  
 132 to 450 KHz actif  
 Typ. <100m.

5 € à 10 € !!  
 100 million\*

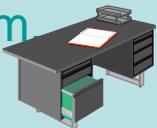


### TAG passif

HF : 13,56 MHz to →  
 UHF (800-900 MHz) E →  
 RuBee (IEEE 1902.1) B →  
 132 to 450 KHz passif

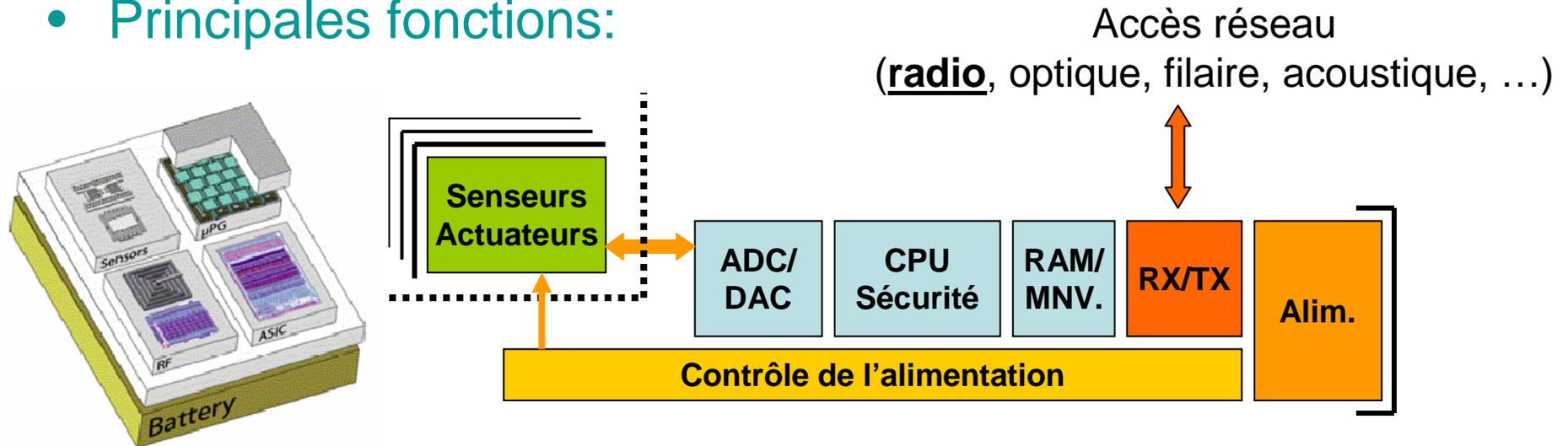
Typ. <1m  
 0,15 € à 1 € !!  
 1,7 G

# Contraintes d'intégration

	Complexité	Contraintes de coûts	Contraintes d'alimentation	Intégration (SoC ou SiP)
Classe 1 	Peu de contraintes technologiques Domaine du M2M			
Classe 2 – Alim disponible  				
Classe 2 – Pas d'alim disponible 	++	+	++	+
Classe 3 	Importantes contraintes technologiques Encore du domaine de la faisabilité technologique			
Classe 4 				

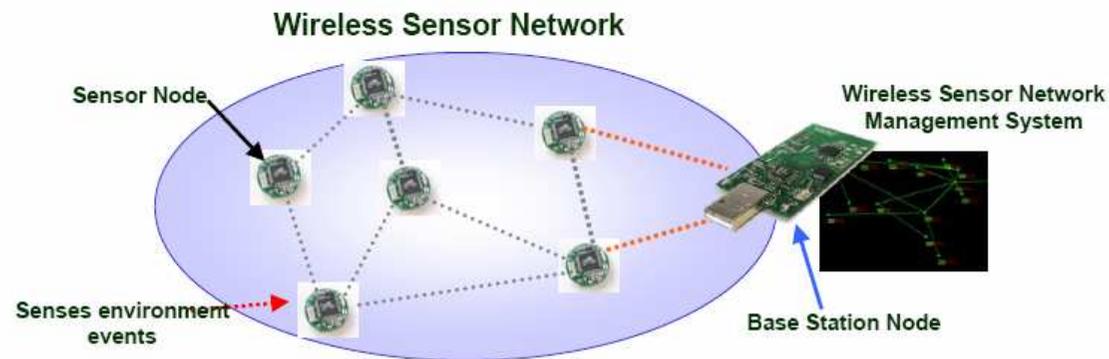
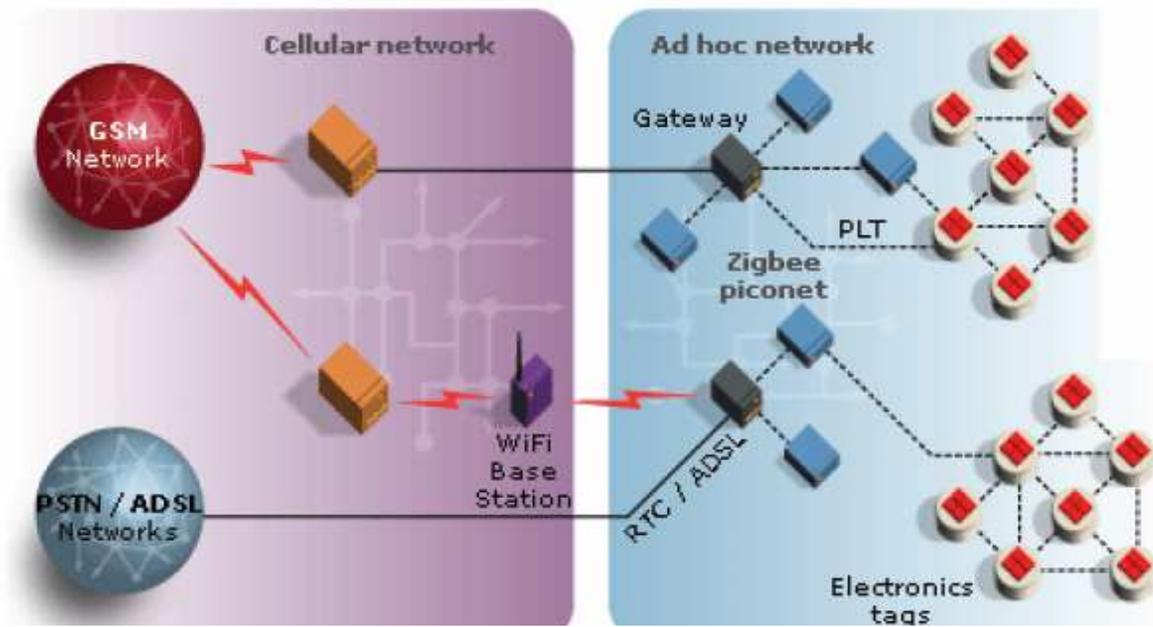
# Architectures embarquées

- Principales fonctions:



- Volume: le plus faible possible, **10 cm<sup>3</sup>** (5x2x1 cm) à **<1 cm<sup>3</sup>** !!
- Autonomie: durée de vie du système, **5 à 10 ans**
- Coût: le plus faible possible, **5 à 10 €**
- Radio: **optimisation « portée - consommation - robustesse »**
- **Reconfigurabilité, programmabilité, ...**
- **Mise en réseau, ...**

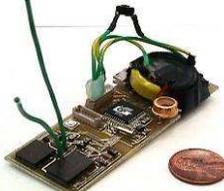
# Configuration en réseau



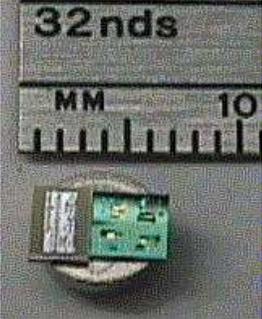
# Exemple d'objets communicants



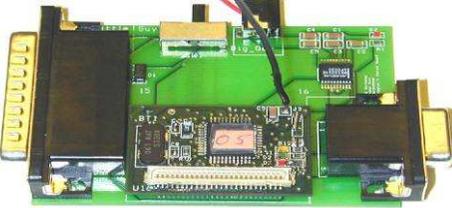
UC Berkeley: COTS Dust



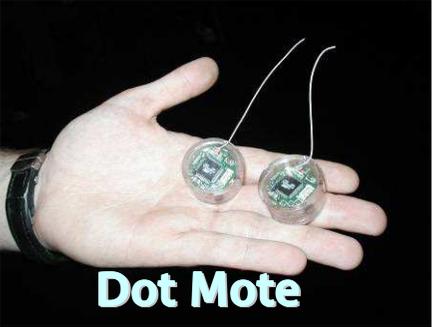
UC Berkeley: COTS Dust



UC Berkeley: Smart Dust



Rene Mote



Dot Mote



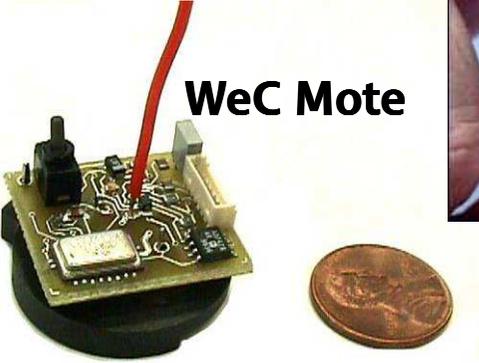
JPL: Sensor Webs



Mica node



Rockwell: WINS

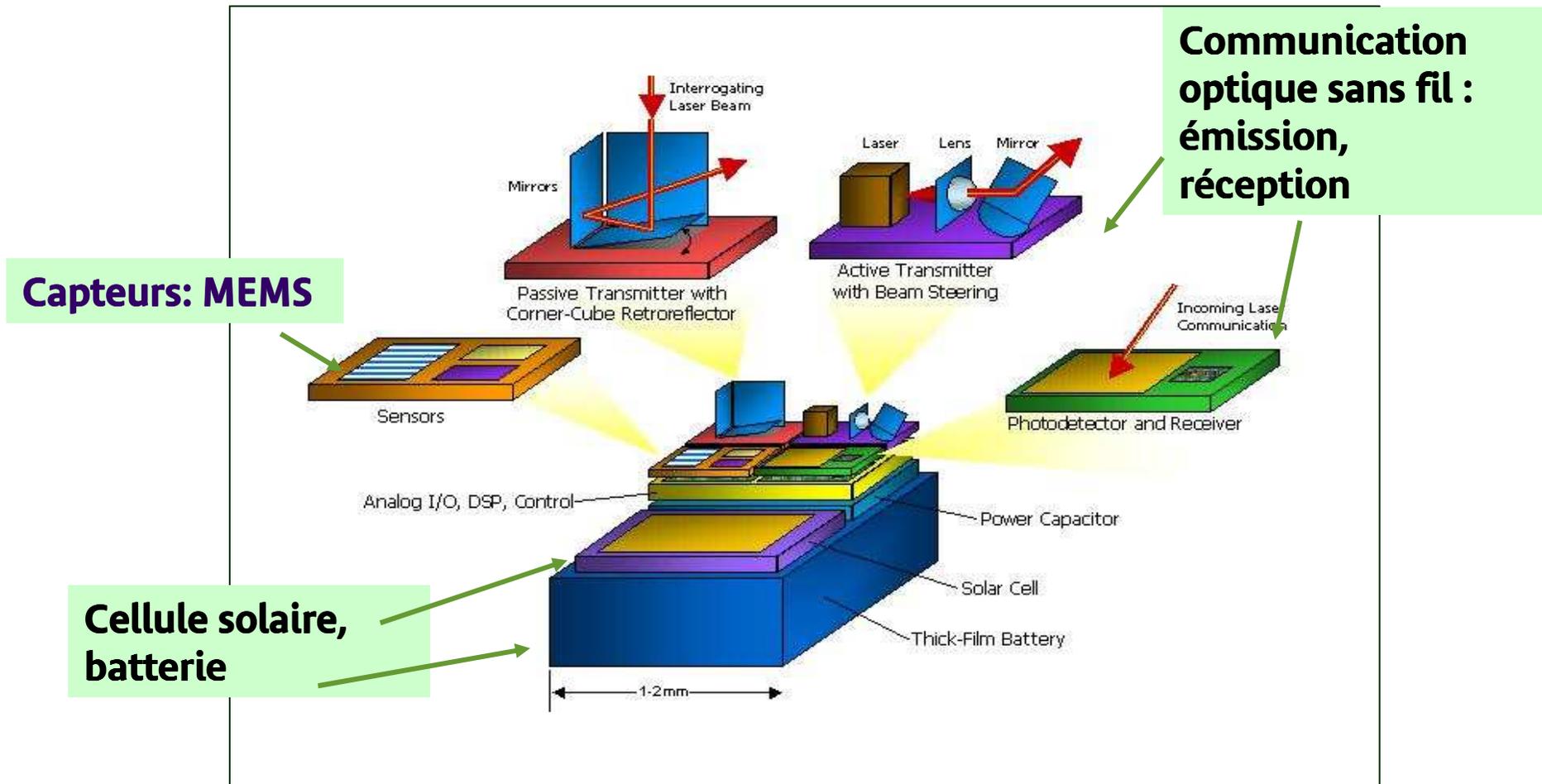


WeC Mote

Erdal Cayirci. Tutorial on sensor networks. ICC, Paris 2004.

# Concept de « smart dust » à UC Berkeley

<http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/archive/users/warneke-brett/SmartDust/>



# 3. Contraintes technologiques (impact des nanotechnologies : -- à ++)

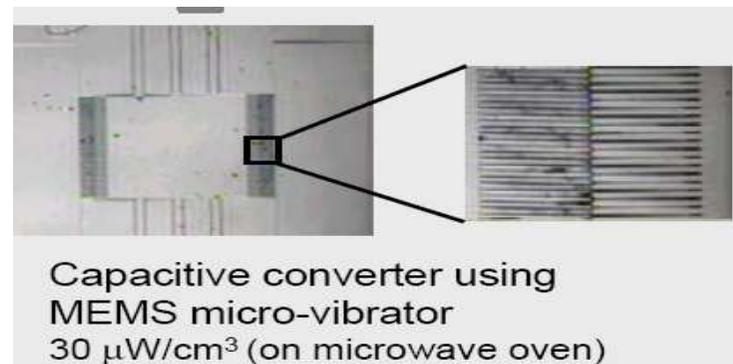
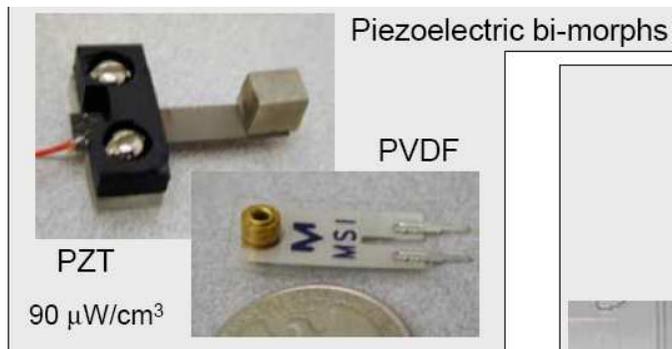
## Challenges:

- **Puissances de calcul:**
  - Fonctions programmables (OS, ...): **10 à 50 MIPS** **(--)**
    - OS (1 à 10 MIPS), MAC, routage, API, ... 5 à 50 MIPS)
  - Fonctions « câblées » (crypto, interfaces A/D, ..) **0,1 à 1 GOPS** **(--)**
- **Mémoires:**
  - Mémoires: RAM et non volatiles (démarrage inst.) **MRAM, PRAM,...** **(+)**
- **Fonctions analogiques:**
  - Fonctions A/D – D/A  $f_{om}=P/(2^{Nb} \cdot F_s)$  **60fJ/step (65nm)** **(-)**
  - Modem (radio): **R<sup>dt.</sup>, P (mW) ?** **(-)**
- **Fonctions capteurs/actuateurs**
  - MEM's et capteurs **Nano capteurs !** **(++)**
- **Fonction alimentation:**
  - Batteries, piles, récupération énergie, .. **1 mWh(3.6J)/24h sur 5 ans** **(+)**
- **Packaging et antenne:**
  - Faible coût, SiP, CoC, SoC, **méta-matériaux, ...** **(+)**

# Fonction alimentation:

- **Volume: 5 cm<sup>3</sup>**

- Batterie Li-ion (550 Wh/l)      **2,75 Wh**      -5 à -10%/mois      < 3 ans
  - Pile Lithium « CR2 »      2,25 Wh      >3 €      > 5 ans
  - Batterie NiMH      1,1 Wh      -20%/mois
  - Piles alcalines      1,7 Wh      1 €      0,3%/mois      > 5ans
- soit **0,75 mWh / 24h** sur 5 ans (**2,7 J/24h**)
- **Vibrations 10 à 30 μW/cm<sup>3</sup>** p<sup>dt</sup> 24h : **0,125 à 0,375 mWh** par 24h (2,5 cm<sup>3</sup>) avec batterie/super C tampon (2,5 cm<sup>3</sup>), voire en « under IC »



- **Surface: 10 cm<sup>2</sup>**

- **Cellules solaire (10 cm<sup>2</sup>)\*** 0,1 à 5 mW/cm<sup>2</sup> (ext) (selon éclairnement) (avec batterie, super Capa. tampon) soit **4 mWh à 200 mWh** par 24 h

# Fonction alimentation:

- **Autres sources (générateurs thermique, signaux RF, ...)**
- **Pile à combustible (5 cm<sup>3</sup>):**
  - Méthanol (densité d'énergie th.): env. 5 Wh/cm<sup>3</sup>
  - Rendement piles à combustible (Méthanol): 80%
  - Pour un volume total d'env. 5 cm<sup>3</sup>, (2)
  - **Intérêt: recharge « facile » du s** Wh !

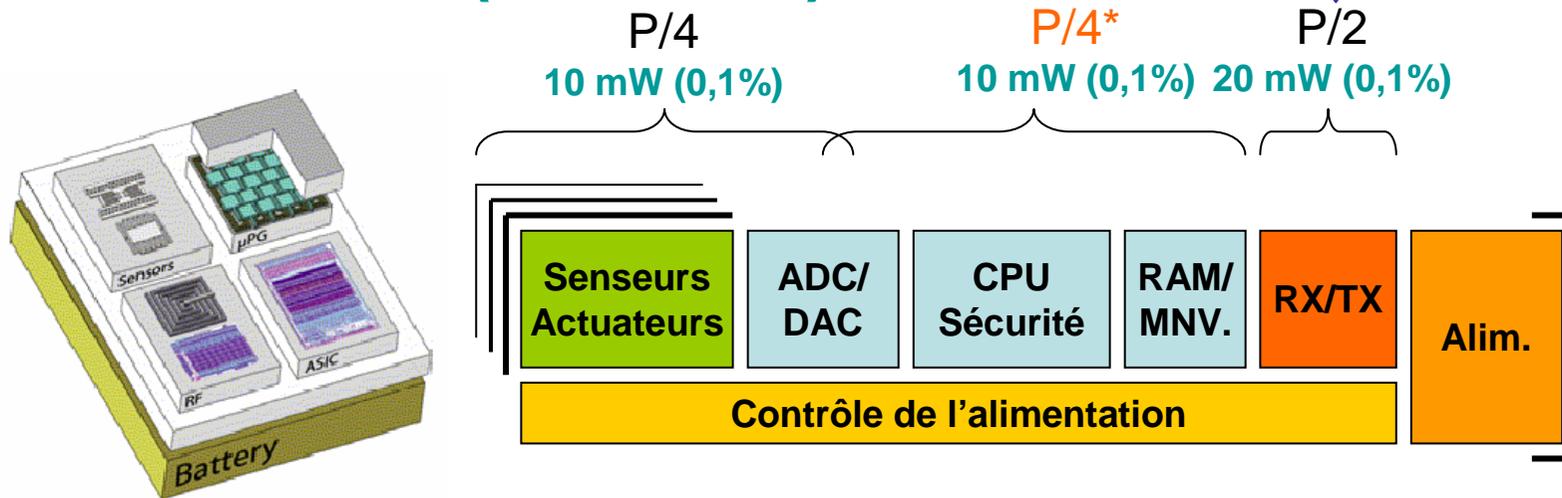


<http://www.cea.fr/var/plain/storage/original/application/c3f902285123fdcc618f5508953d5014.pdf>

# Bilan de consommation:

- 1 mWh/24h (3.6J /24h)

Accès réseau  
(radio, optique, filaire, acoustique, ...)



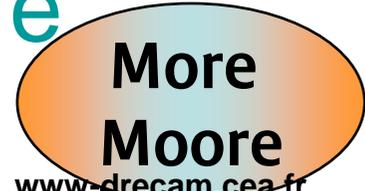
- Si taux d'activité de 1% :  $P_{\text{active}} = 4,2 \text{ mW}$
- Si taux d'activité de 0,1% :  $P_{\text{active}} = 42 \text{ mW}$

\* Evolution suivant la loi de Moore

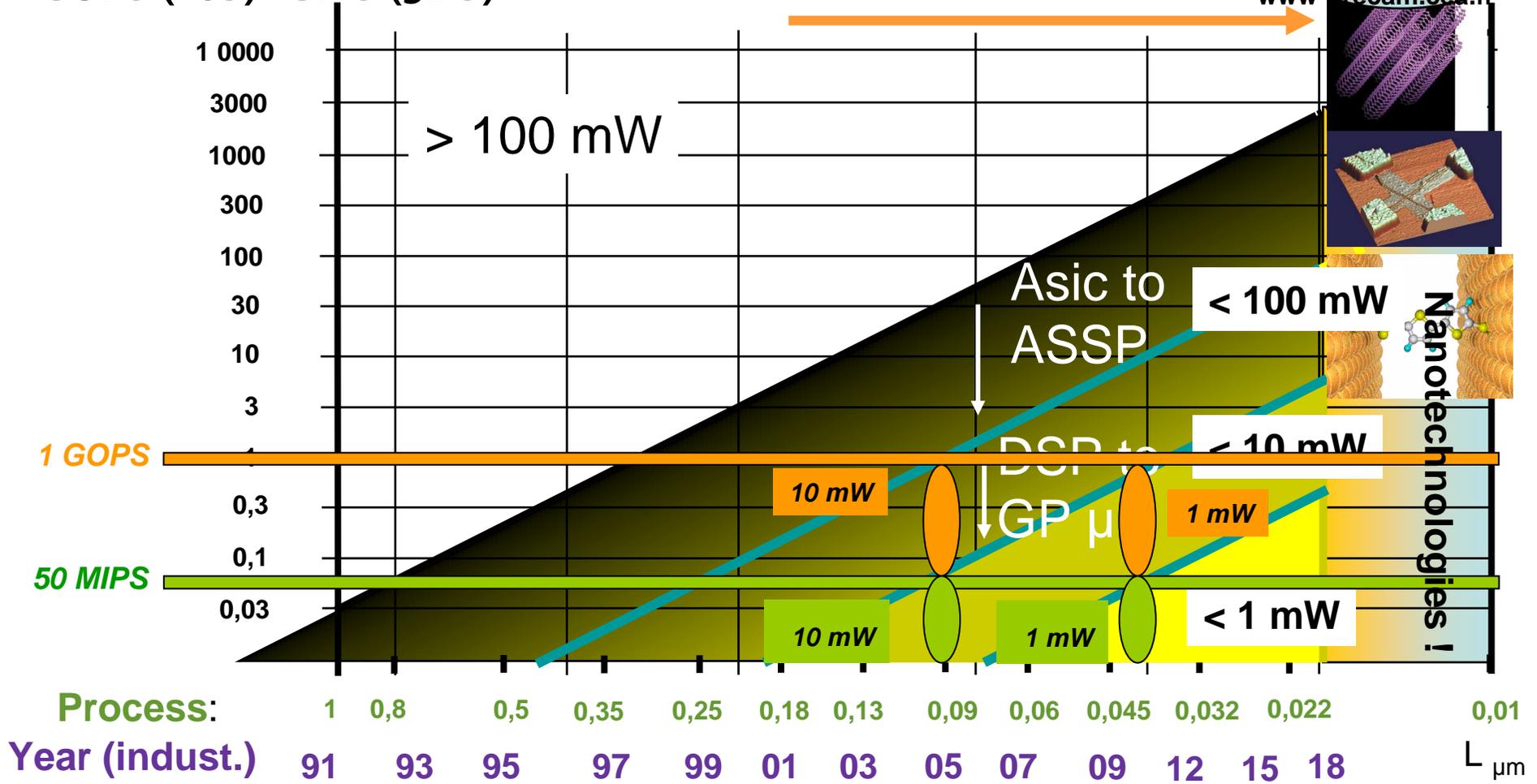
# Puissance de calcul – Loi de Moore

Performances Si  
 GOPS (16b) /GIPS (32 b)

Moore's law !



www-drecom.cea.fr



< 100 mW

Asic to ASSP

< 10 mW

1 mW

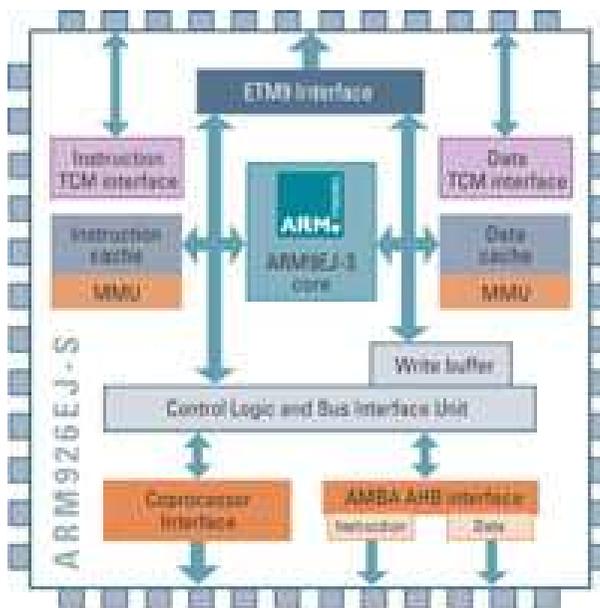
< 1 mW

Nanotechnologies I

Process:  
 Year (indust.)  
 21 mars 2007

# Exemple: ARM926EJ-S Jazelle-enhanced macrocell

Processor	Area mm <sup>2</sup>	Power Consumption mW/MHz	Frequency (Worst Case)	Cache Size
90nm				
ARM926EJ	1.1	0.2	336	8K/8K
ARM926EJ	1.5	0.2	336	16K/16K



## ARM926EJ-S

- 32/16-bit RISC architecture (ARMv5TEJ)
- 32-bit ARM instruction set for maximum performance and flexibility
- 16-bit **Thumb** instruction set for increased code density
- DSP instruction extensions and single cycle MAC
- ARM Jazelle technology
- ....

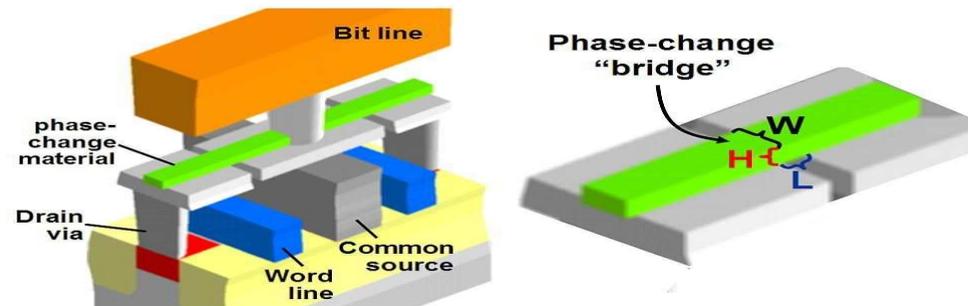
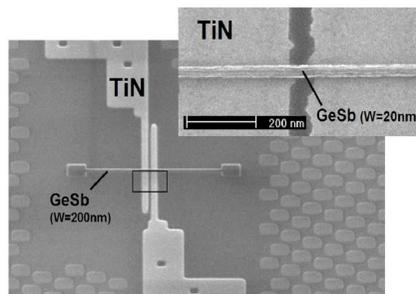
45 nm	0,4 mm <sup>2</sup>	0,02 mW/MIPS
-------	---------------------	--------------

<http://www.arm.com>

21 mars 2007

# Mémoires non volatiles:

- Mémoires de type « **flash** »: tensions « élevées », Nb de cycle d'écriture limité, temps d'écriture important
- Mémoires utilisant des matériaux « magnétiques »: **MRAM** et **FeRAM**, très bonnes propriétés électriques (Nb cycles, temps E/L, ..) mais consommations un peu élevées (MRAM)
- Mémoires à changement de phase (cristallin/amorphe): **PRAM**, mémoires encore limitées en temps d'écriture mais progrès récents (IBM, IEDM 2007):



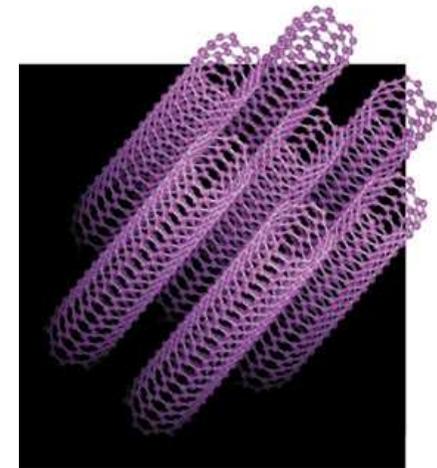
## Phase-Change Bridge Memory from the IBM/Qimonda/Macronix PCRAM:

- Phase-change material, doped germanium antimonide (GeSb).
- Reset current of less than 100  $\mu\text{A}$  and rapid change between states, good data retention and cycle life, and relative temperature insensitivity.
- 20-nm to 200-nm-wide bridge of GeSb
- 60 nm<sup>2</sup> cell size (qq MHz !)

# Fonctions capteurs/actuateurs: exemple de détecteurs de composés volatiles ou liquides

A base de nanotubes de carbone mono-parois (SWNTC)

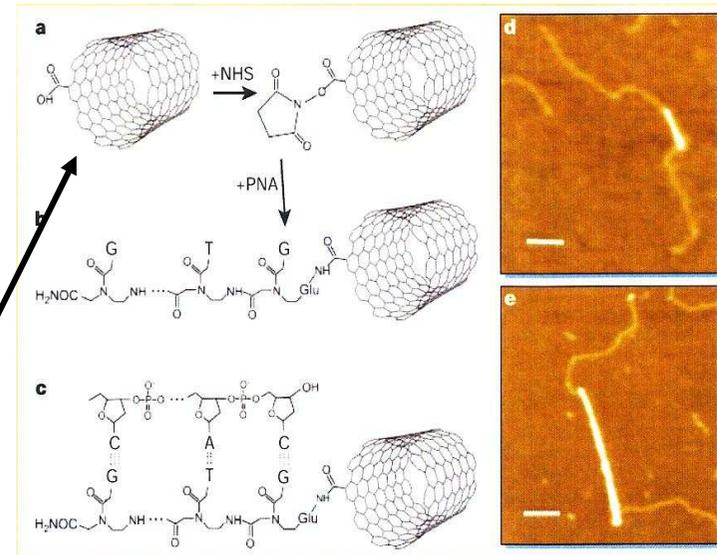
- **Nano capteur :**
  - Capteur dont au moins une dimension de la surface sensible est de l'ordre du nanomètre
  - Nanotube de carbone mono paroi : une feuille de graphène enroulée, de diamètre environ 10 nm longueur 100µm
- **Moléculaire :**
  - Permet la détection de molécules
    - Gazeuses
    - Biologiques
- **Mise en réseau de différents capteurs:**
  - Détection de composés complexes
  - Détection de gaz difficiles à détecter simplement
  - ...



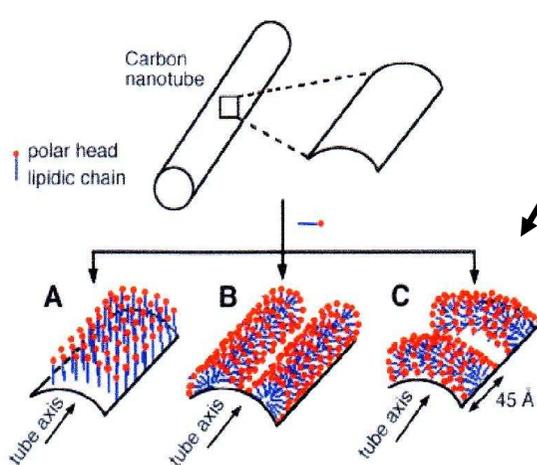
# Fonctionnalisation

Le substrat est rendu actif par greffage de groupements fonctionnels par liaisons :

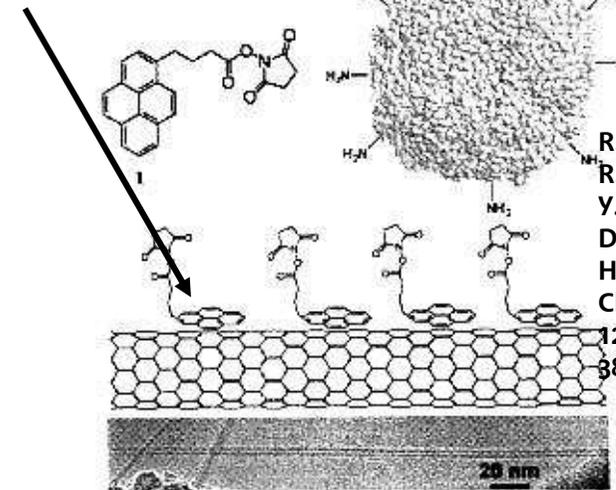
- Covalentes (chimisorption)
- Non covalentes (physisorption, p-stacking)



K.A. Williams,  
P. T. M.  
Veenhuizen,  
B. G. de la  
Torre,  
R. Eritja,  
C. Dekker  
Nature 420,  
761 (2002)



C. Richard,  
F. Balavoine,  
P. Schultz,  
T.W.Ebbesen  
and  
C.Miokowski  
Science 300 ,  
775 (2003)



R.S.Berman  
R. J.Chen,  
Y. Zhang,  
D. Wang,  
H. Dai J. Am.  
Chem. Soc.  
123(16) 3838-  
3839 (2001)

# Radio et antennes

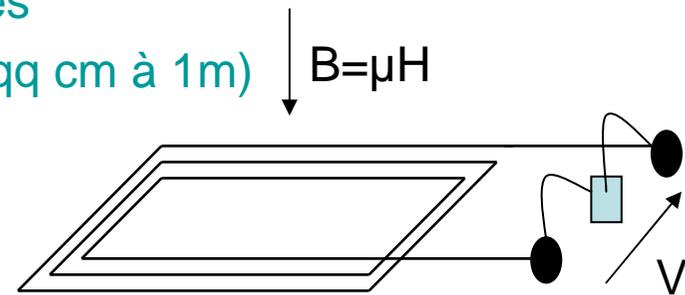
- **Système RFID passifs: 132 kHz à UHF (800-900MHz):**

- 132 KHz (RuBee) à 13,56 MHz (14433, ... ),...

- Composante magnétique majoritaire, champ proche ( $d \ll L_{\text{onde}}$ )
- Couplage magnétique, antennes spirales
- Décroissance  $\vec{B}$  en  $1/d^3$  (énergie  $1/d^6$ ) (qq cm à 1m)
- Faibles débits de transmission

- UHF

- Composantes électrique majoritaire, champ lointain
- Couplage électromagnétique (antenne dipôle), **Méta matériaux !**
- -> qq mètres (<10 m)
- Décroissance  $\vec{E}$  en  $1/d$  (énergie  $1/d^2$ )
- Débits transmission élevés, ...<10 m



$$V = B \cdot S \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$$

**S:** surface antenne « développée »

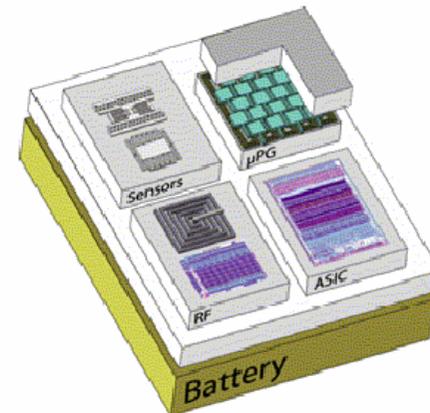
**f:** fréquence de la porteuse

(à champ identique  $S_{132 \text{ KHz}}$  doit être 100 fois supérieure à  $S_{13,56 \text{ MHz}}$ )



# Radio et antennes

- **Systemes RFID actifs** ou semi-actifs (avec batterie ou source d'énergie locale):
  - 125 KHz à 6 GHz !!!
  - $\leq 13,56$  MHz: champ proche, couplage magnétique
  - $\gg 13,56$  MHz (**UHF**, 2.4 GHz, 5-6 GHz, UWB): champ lointain, couplage électromagnétique, radio active ou passive (modulation par rétro-réflexion)
  - Possibilités de mises en réseau
  - Mesures physiques locales, ...
  - Détection d'évènements



$$A_{tt} = 20 \cdot \log(4 \cdot \pi \cdot d \cdot F / C)$$

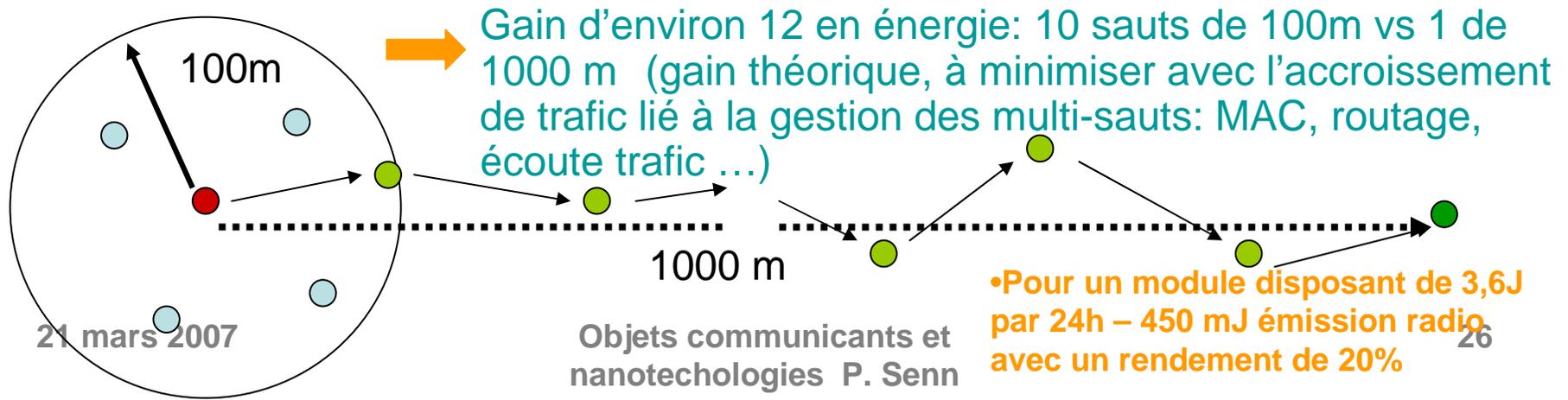
F: 1 GHz  
 C:  $3 \cdot 10^8$  m/S  
 d: distance entre antennes)

# Radio - Contraintes

- Modèle de propagation simplifié: atténuation en  $d^2$  (1 GHz), sans fading:

Puissance émission 0dBm (1 mW) en sortie antenne:

- Atténuation pour 100m: 72dB (espace libre) (1000m : 92dB)
- Facteur de bruit (NF) « low cost » du récepteur: 15dB
- BER =  $1 \times 10^{-6}$  (Eb/No = 13 dB)
  - 1000 m: env. 125 kb/S (8 nJ/b soit 40nJ/b avec Rdt de 20%) soit env. 130 b/S en moyenne par module\*
  - 100 m: env. 16 Mb/S (62 pJ/b – 330 pJ/b) soit env. 16 kb/S par module\*



# Modem Radio - suite

## **BE (UHF) puissance d'émission 0dBm (1 mW):**

- Emission modulée (Rdt. 20 %): Conso.  $P_{\text{ampli RF}}$  : 5 mW
- **Réception: LNA BE, SAW, ..** 5 mW
- Interfaces radio, synthétiseur, 10 mW

## **UWB (1-3 GHz), - 41dBm/MHz :**

- **Emission (Rdt > 80 %)** < 0,1 mW\*
- Réception (LNA LB, corrélateurs, ..) > 25 mW\*\*
- Interfaces radio, 5 mW

\* A 47 pJ/pulse 3-5GHz All-Digital Transmitter in 90 nm CMOS, MIT, ISSCC07

\*\*A 2,5 nJ/b (100 kbS) 0,65V 3-5GHz Subbanded UWB Receiver in 90 nm CMOS, MIT, ISSCC07

## Intérêt de l'UWB vis-à-vis du BE:

- **Balises mobiles** d'émission (si **récepteurs fixes alimentés**)
- Propagation en milieu difficile (loi d'att. diff.  $1/d^2$  )
- Robustesse des systèmes LB vs BE
- Saturation des fréquences BE

# 4. Perspectives et conclusions

- **Traitement numérique:** La réduction des dimensions (loi de Moore) permettra encore de réduire la consommation d'un **facteur 100** (mW/MIPS) par rapport au **90nm (22 nm)**:
  - Amélioration des performances de mises en réseau, augmentation du traitement canal pour augmenter le débit utile à  $P_{\text{radio}}$  identique (favoriser **Moore vs Shannon**)
  - Amélioration sécurité, fiabilité, robustesse des systèmes
  - **Enrichissement des applications, intelligence répartie, « coopération d'objets », optimiser l'énergie locale et globale, ...**
  - Nécessité de choisir des **architectures génériques** (cœur RISC, mémoires, bus, ...) + **fonctions programmables** pour les parties opératives spécifiques (**points PRAM ?**) pour **réduire les coûts de fabrication**.
- **Traitement analogique:** Impact négatif de la réduction des dimensions (et des tensions): vers des technologies  $> 0,1\mu\text{m}$  avec MEMs (SAW, BAW, ...)
- **Packaging:** SiP\* plutôt que SoC\*\*

**Au-delà du 22 nm: électronique « grande surface », sur polymère ?  
Uniquement si les coûts des technologies Si explosent et si  $P_{\text{dissip}}$   
réduit! Au-delà (<10 nm): électronique moléculaire !**

# Perspectives et conclusions

- **Nouvelles mémoires embarquées non volatiles:** utilisation de **nouvelles générations de MNV** (FeRAM ou MRAM) pour les sauvegardes de contexte et « démarrages instantanés », avec l'arrivée d'un challenger: **PRAM**. Ultérieurement: **mémoires moléculaires** (transition de spin), cf Azzedine BOUSSEKSOU, Directeur de Recherche CNRS, Responsable de l'Equipe " Propriétés Physiques Moléculaires " du LCC/CNRS, Toulouse UPR8241
- **Alimentations:** élément le plus bloquant actuellement. amélioration des cellules photovoltaïques (Rdt 60% !): 20 à 30 mWh/24h par cm<sup>2</sup> - **μPaC** (Ethanol), Rdts. > 50 % ? – Récupération d'énergie: plus MEMs que nanotechnologies; **mais annonce des nanofils de ZnO pour la "nano-piezotronique"**
- **Stockage énergie:** Nouvelles batteries + performance (**MEMS Li-ion**), **supercondensateurs (nano tubes !)**
- **Capteurs/actuateurs:**
  - Micro systèmes (température, pression, accélération, direction, ...): technologies MEMs critiques et stratégiques (SiP plutôt que SoC), Low power ASIC (a 110 μW Interface ASIC for 3-Axis Micro-Accelerometer, ISSCC07), **nano-piezotronique**
  - **Nano systèmes** (détecteurs de molécules, ...)

# Perspectives et conclusions

- **Nécessité de « standards » de communication ouverts:**
  - IEEE (802.15.4a, ...)
  - **Radios coopératives:** coopération entre objets communicants mais également coopération entre systèmes BE et LB, radios cognitives, ...
- **Applications:**
  1. Montée en puissance des applications **santé** (surveillance, maintien à domicile , ...): **effet de levier** sur le secteur pour baisser les coûts des modules
  2. Contrôle de l'**environnement:** risques naturels, économies d'énergie, .... Profitera de la baisse des coûts, **forte augmentation des volumes**
  3. **Explosion des applications** (personnelles, domiciles, transport, entreprise, ..): nécessité de créer des lieux de rencontres multidisciplinaires
- **Technologies:**
  - **Technologies hétérogènes** (Si, polymère, ...)
  - Généralisation des **MEM's**, puis des objets « **nano** »
  - **Le compromis énergie-communication** reste un point dur sauf rupture majeure !

# MINATEC IDEAs Laboratory ®: Une expérience unique de plateau d'innovation multipartenaires

## Missions:

- ... **Imaginer** les produits et services du futur intégrant les micro et nanotechnologies.
- ... **Créer** une dynamique fertile grâce à la pluridisciplinarité des approches « techno push » et « usage pull ».
- ... **Intégrer** les ruptures induites par ces technologies et les intérêts des utilisateurs pour mieux répondre aux attentes du marché.



21 mars 2007

Objets communicants et nanotechnologies P. Senn

<http://www.ideas-laboratory.com>

# Vers des changements de société plus profonds?

## Développement des usages des TIC:

- **Des attentes ambivalentes** , voire paradoxales, vis à vis des nouvelles technologies et des usages de TIC:
  - Demande de protection mais peur du contrôle
  - Demande de traçabilité mais crainte d'être surveillé (Big Brother)
  - Demande de connexion continue mais crainte de la dépendance
  - TIC : Intrusion/invasion versus simplicité, ouverture, rapidité,...
  - ...
- **Ces paradoxes** font exister ensemble des phénomènes auparavant contradictoires, opposés, distincts
- **Ils sont des symptômes de changements en cours** dans nos manières de vivre en société: vers une vraie société de la connaissance ? (cf. **Philippe Mallein**, Conseiller Scientifique Innovation et Usages, CNRS, CEA-Leti, Grenoble Université)

