



l'institut  
d'électronique

# ETAT DE L'ART DES MICRO-SOURCES D'ÉNERGIE POUR L'AUTONOMIE DES CAPTEURS SANS FIL

Ricardo Garcia

[rgarcia@ies.univ-montp2.fr](mailto:rgarcia@ies.univ-montp2.fr)

IES

Dép. Capteurs Composants Systèmes  
Séminaire Technique jeudi 31 Janvier

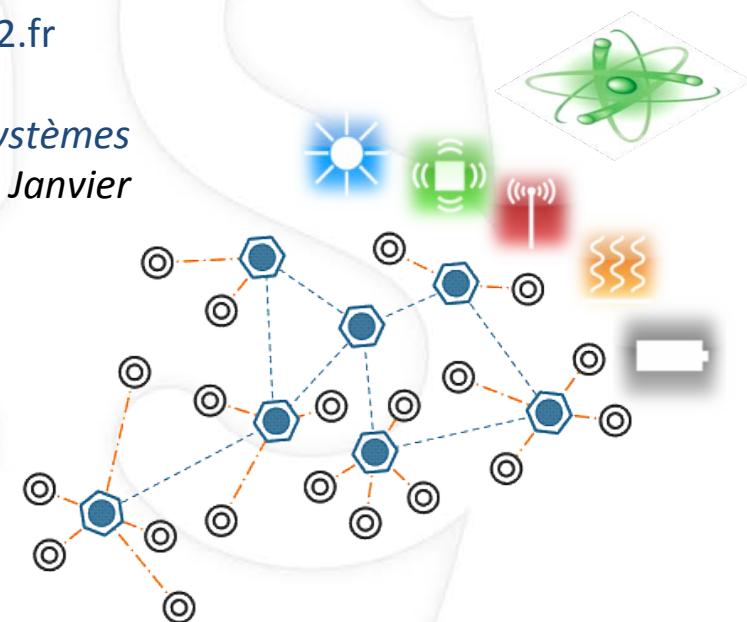


Languedoc  
Roussillon



IES | Institut d'Électronique du Sud

[www.ies.univ-montp2.fr](http://www.ies.univ-montp2.fr)



# Sommaire

## Contexte

- Evolution des capteurs

## Réseaux de capteur sans fil

- Introduction
- La problématique

## Micro-sources d' énergie

- Lumière
- Vibration
- Thermique
- Ondes RF

## Conclusion

# Contexte

Evolution des capteurs

- L'information élément utile



L'environnement  
Agriculture  
Industrie  
La personne  
Les bâtiments  
Mesure de flux  
Sécurité  
Analyse de l'air  
Santé.....

Les capteurs

# Contexte

Le nombre de transistors par unité de surface quadruple tous les trois ans, et le coût des circuits est divisé par deux tous les 18 mois environ

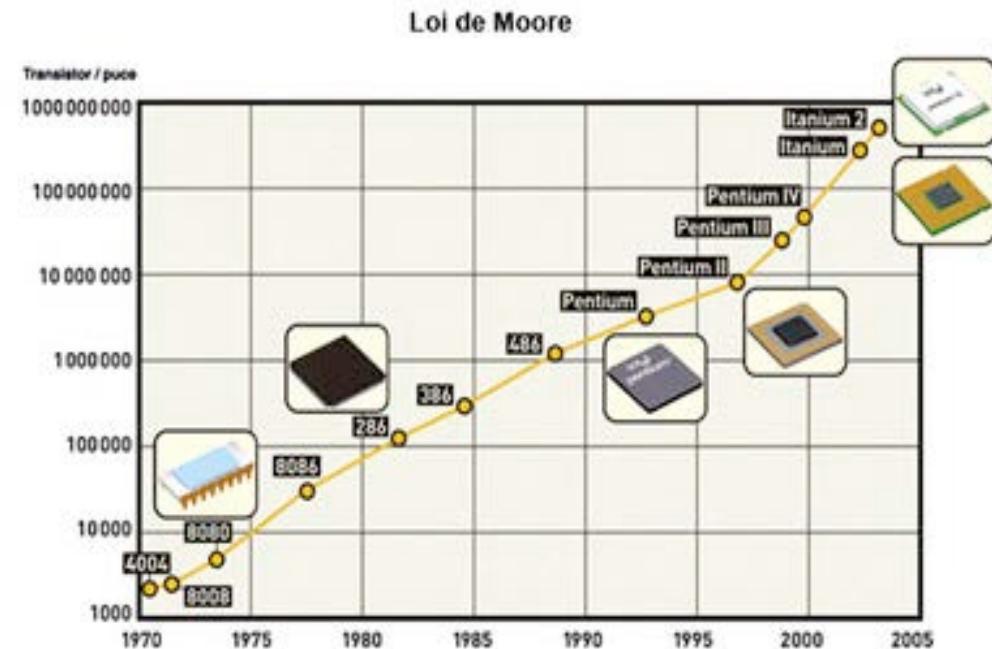


## Objectif:

*Consommer moins d'énergie*

*Plus de prestations*

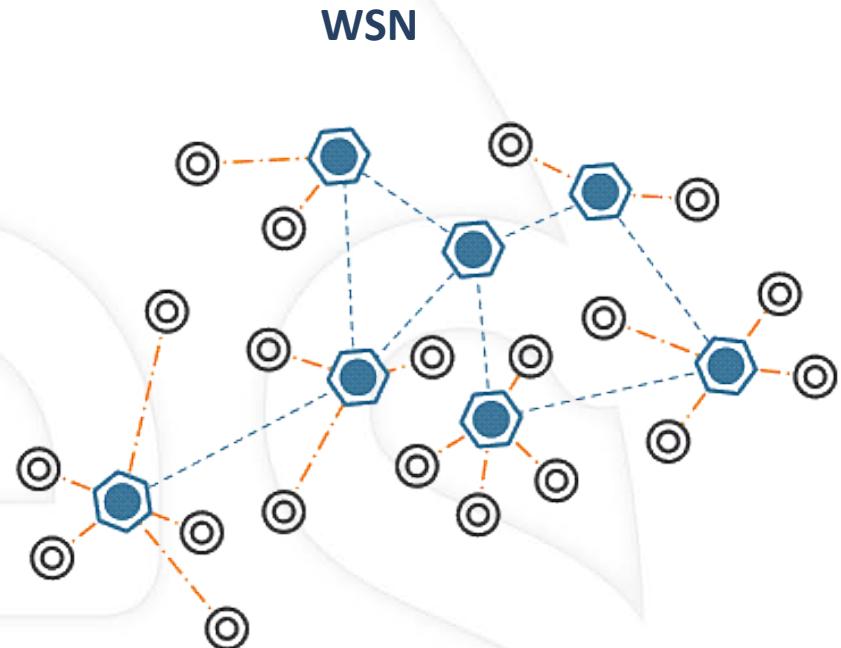
*Plus de portabilité*



En quelques décennies, les « puces » ont conquis la plupart de nos objets quotidiens.

# Les RCSF

Introduction



Microélectronique  
Technologies de communication sans fil  
Sujet de recherche

**Les capteurs sans fil sont amenés à se développer fortement**



## Qu'est-ce que c'est ?

Ensemble de capteurs sans fil formant un réseau dédié à une application.

Intelligences décentralisées qui travaillent de façon collective **d'une manière autonome**

## A quoi ça sert ?

Acquérir des données et les transmettre à une station de traitement.

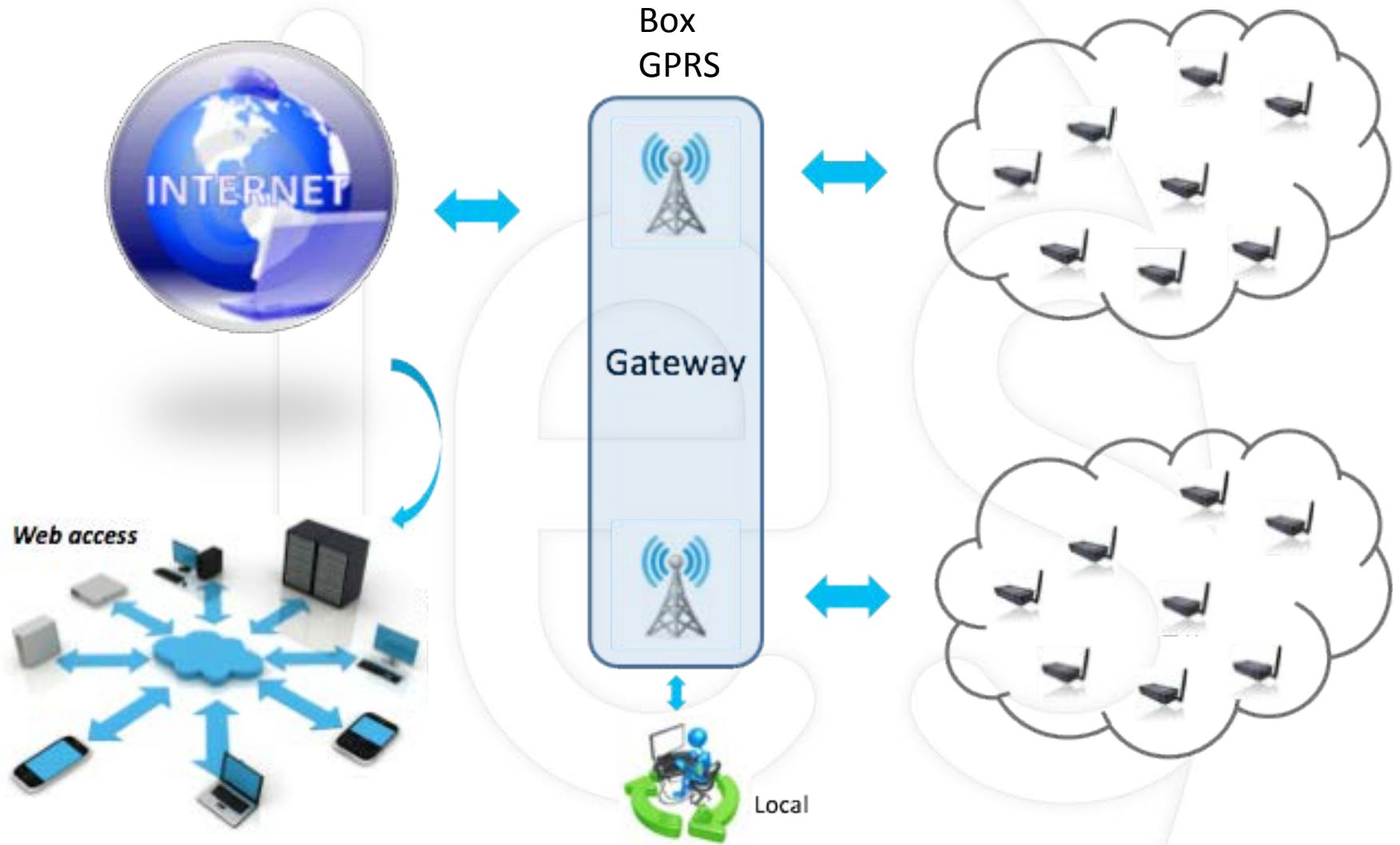
## Avantages

La facilité du déploiement, l'ubiquité de l'information et le coût réduit d'installation

Pas d'infrastructure

# Les RCSF

Architectures



## Principal Problème !! Le manque d'autonomie

Maintenance des batteries  
Limitation à la mobilité  
Recyclage des piles



TIC croissance exponentielle consommation des batteries

Le but :

**Réduire les opérations d' installation et de maintenance**

Densité batteries, techniques de conservation, récupération de énergie

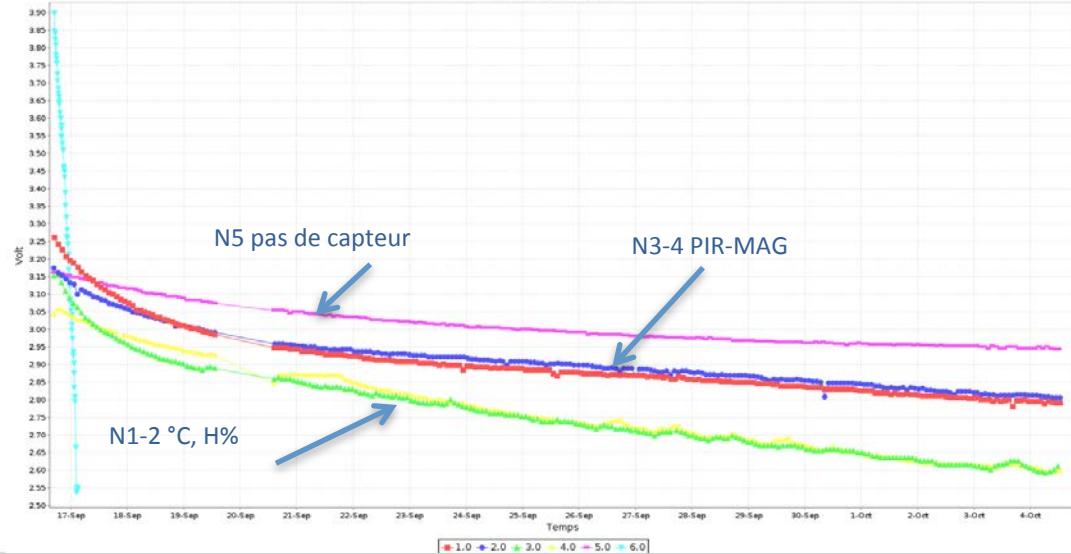
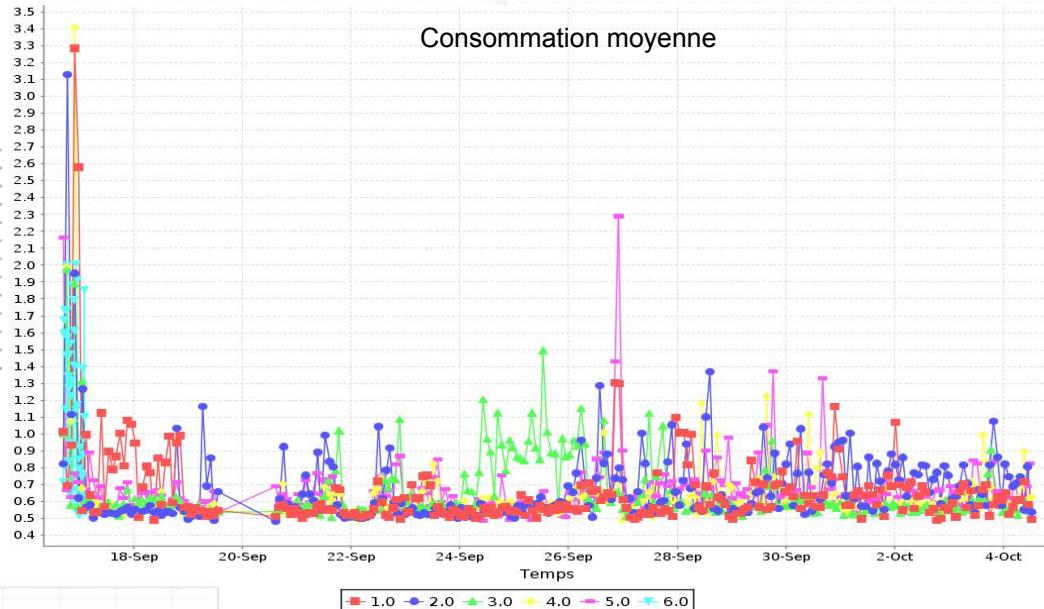
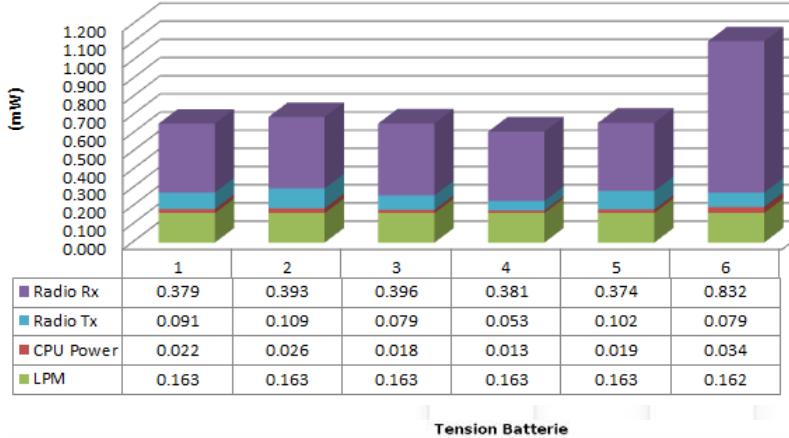


# Les RCSF

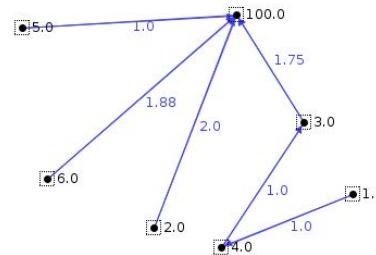
## Etude sur la consommation dynamique

### CAS EXPÉRIMENTAL (Texas Inst. 430)

Consommation moyenne



### Topologie à (t)



### Fact. Influents sur E

- Environnement
- Type de mesure
- Pertes de paquet
- Collision
- CLK µP
- Protocole
- Sécurité
- Echantillonnage
- Temps de réveil
- Duty-cycling
- Retransmission

# Les RCSF

Conservation d' énergie

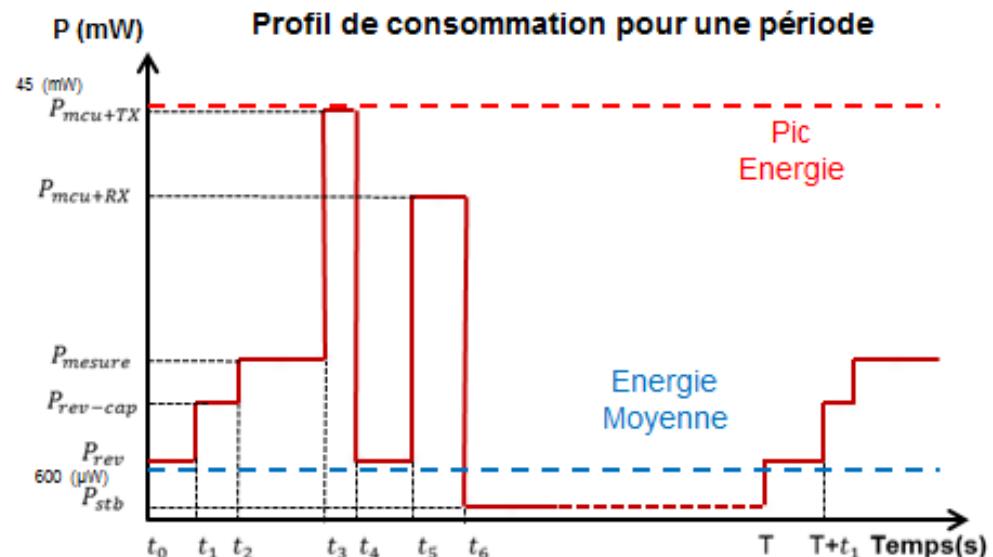
## Comparaison des microcontrôleurs

Status	MSP430F1611	Atmega163	Atmega128
V min	1.8V	2.7V	2.7V
Standby	5.1 $\mu$ A	19.0 $\mu$ A	27.0 $\mu$ A
MCU Idle	54.5 $\mu$ A	3.2 mA	3.2 mA
MCU Active	1.8 mA	8.0 mA	8.0 mA
MCU + Radio RX	21.8 mA	15.1 mA	23.3 mA
MCU + Radio TX	19.5 mA	25.4 mA	21.0 mA
MCU + Flash Read	4.1 mA	9.4 mA	9.4 mA
MCU + Flash Write	15.1 mA	21.6 mA	21.6 mA
MCU Wakeup	6 $\mu$ s	180 $\mu$ s	180 $\mu$ s
Radio Wakeup	580 $\mu$ s	1800 $\mu$ s	860 $\mu$ s

Sleep  
Wakeup minimiser ce temps  
Active  
Radio

## Techniques du Duty-cycling

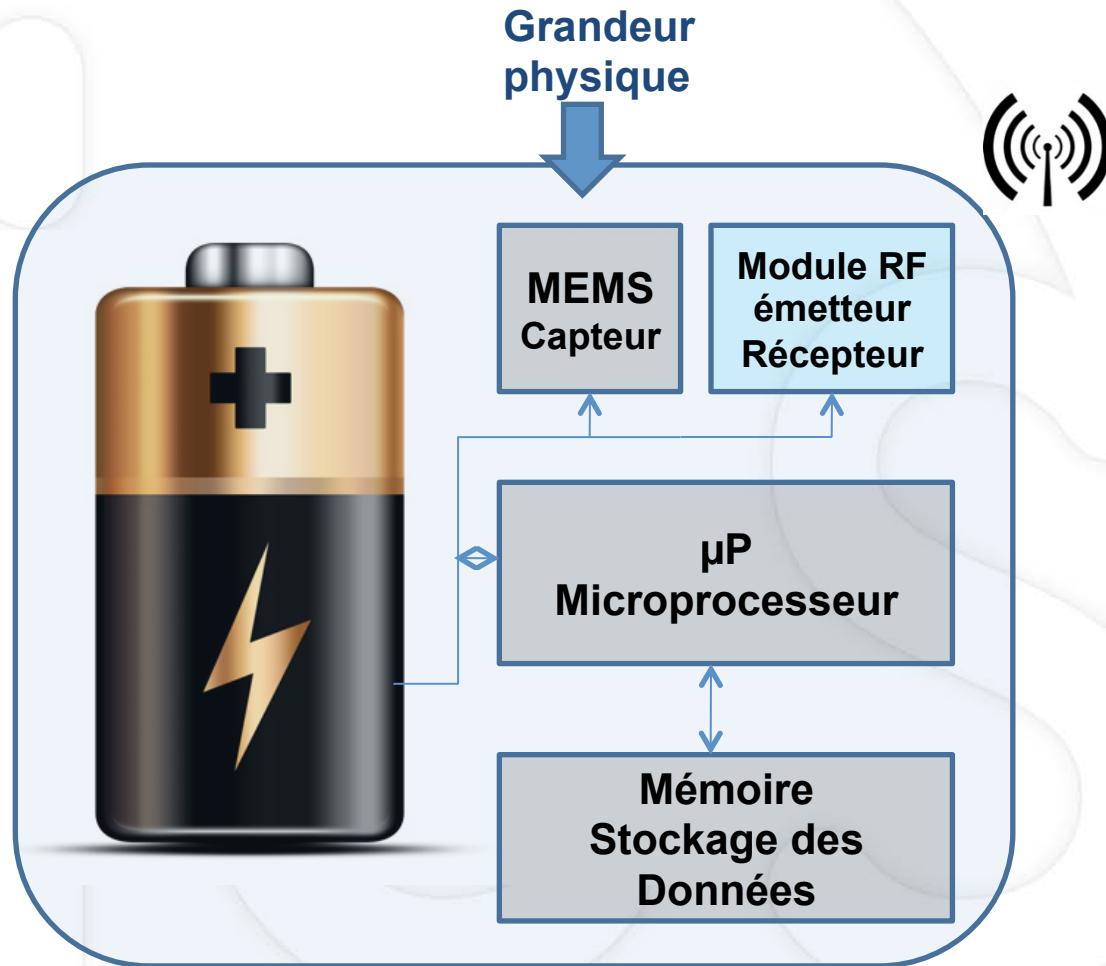
Le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie



Système de stockage nécessaire !!

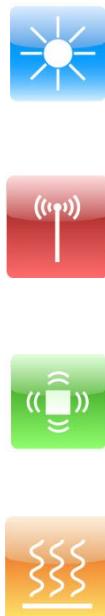
# Micro-source d'énergie

Etat de l'art

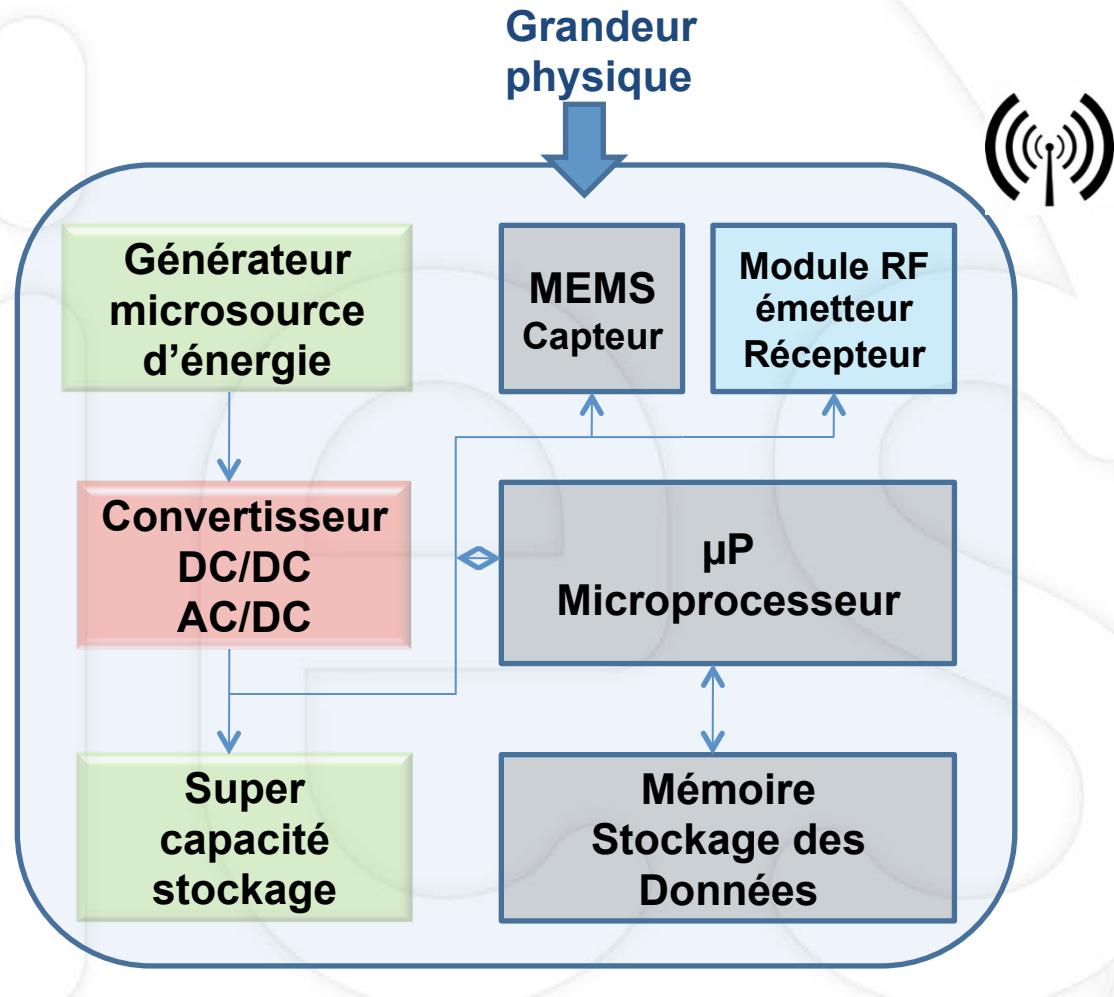


# Micro-source d'énergie

Etat de l'art



**sources d'énergie ambiante**  
continues ou intermittentes



# Micro-source d'énergie

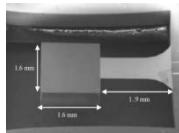
Etat de l' art

## Sources d'énergie disponibles

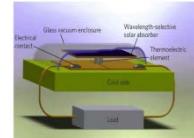
Source d'énergie	Caractéristique	Efficacité	Densité
Lumière	Extérieur	6~24%	~6-20 mW/cm <sup>2</sup>
	Intérieur fenêtre		~1-2 mW/cm <sup>2</sup>
	Intérieur fluo		~10-60 µW/cm <sup>2</sup>
Thermique	Humain	~0.1%	60 µW/cm <sup>2</sup>
	Industriel	~3%	~1-10 mW/cm <sup>2</sup>
Vibration	~Hz—humain	25~50%	~4 µW/cm
	~kHz—machines		10mW/cm <sup>2</sup>
	Acoustiques @100 dB		10mW/m <sup>2</sup>
RF	GSM 900 MHz	~50%	0.1 µW/cm <sup>2</sup>
	WiFi		0.001 µW/cm <sup>2</sup>

## Effets Physiques concernés

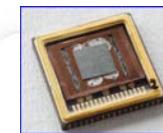
Effet Piézoélectrique  
 Effet Electromagnétique  
 Effet Electrostatique  
 Energie Cinétique  
 Effet Thermoélectrique  
 Effet Pyroélectrique  
 Effet Photoélectrique  
 Effet Thermo-photovoltaïque



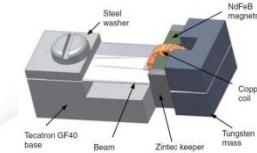
Générateur piézoélectrique  
 $P_{max} = 0,6 \mu\text{W}$  @ 0,25 g et 200 Hz  
 S. Basrour et al., 2011



Générateur thermoélectrique solaire  
 $P = 60 \text{ mW/cm}^2$  @  $\Delta T = 200 \text{ K}$  ( $\eta = 5\%$ )  
 (MIT & Boston College, 2011) D. Kraemer



Générateur électrostatique  
 $P = 6 \mu\text{W}$  1.4 G with 40 Hz  
 (Y. Feng, Matsumoto et al., PowerMEMS 2011)



Générateur électromagnétique  
 $P = 45 \mu\text{W}$  @ 0,60 g et 50 Hz  
 Volume : 0,15 cm<sup>3</sup> (300 µW/cm<sup>3</sup>)  
 Beeby et. al., 2006



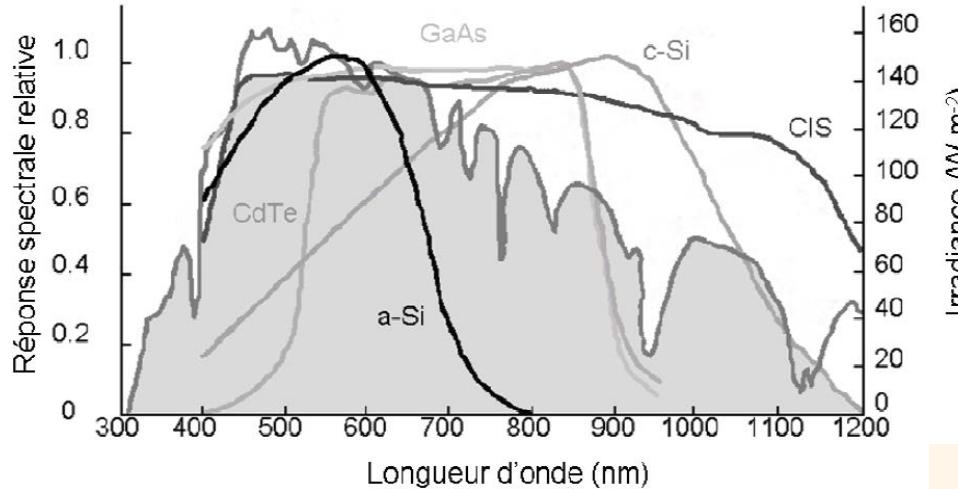
Éclairement	Puissance (100 lux = 100 lumen/m <sup>2</sup> = 1 W/m <sup>2</sup> )
Grand soleil 100 000 lux	1000 W/m <sup>2</sup>
Couvert haut	400 à 500 W/m <sup>2</sup>
Ciel nuageux	200 à 50 W/m <sup>2</sup>
Pluie	50 W/m <sup>2</sup>
Intérieur	3 W/m <sup>2</sup>
Intérieur vers une fenêtre	4 à 20 W/m <sup>2</sup>
Standard	500 lux
Bureau	200 lux mini
Lieux de circulation	40 à 100 lux
Travail de précision	1000 lux
Bloc opératoire	8 000 à 15 000 lux
Ampoule de 60 W	5 mW/cm <sup>2</sup> à 10 cm 0,567 mW/cm <sup>2</sup> à 3 cm

Ordres de grandeur de la puissance reçue par unité de surface [DUP2011] [MUL2010]

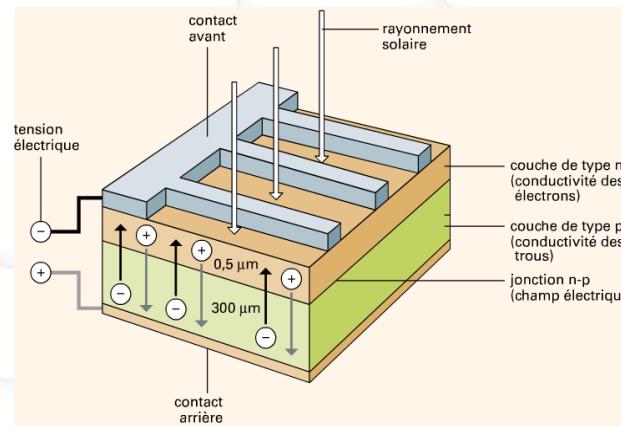
Dimensionner la surface pour l' application



Les cellules photovoltaïques captent le flux lumineux (**photons**) et la transforment en électricité.



Diode électroluminescente ou LED blanche : répartition spectrale d'énergie



$$I_{ph} = S\phi_{photon}$$



Matériel	$\eta$ éclairement normal	$\eta$ faible clairement	$\eta$ labo	
Cellule en Si monocristallin	très bon (15-20%)	150Wc/m <sup>2</sup>	faible	20-25%
Cellule en Si polycristallin	bon (12-15%)	100Wc/m <sup>2</sup>	faible	environ 20%
Cellule en Si amorphe (a-Si)	moyen 6-8%	35-60 Wc/m <sup>2</sup>	bon	13 %



Film photovoltaïque de Wysips



Semi-conducteurs organiques

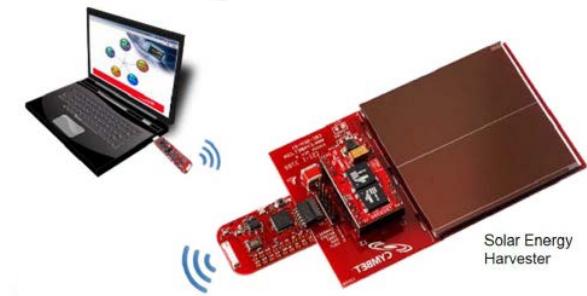
Type	Niveau de développement
<b>1<sup>ère</sup> génération</b>	
Silicium monocristallin	Production industrielle
Silicium polycristallin	Production industrielle
<b>2<sup>e</sup> génération</b>	
Silicium amorph	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince	Production industrielle
CGIS	Production industrielle
CdTe	Prêt pour la production
<b>3<sup>e</sup> génération</b>	
Cellule organique	Au stade de la recherche
Cellule de Grätzel (colorant)	Au stade de la recherche
Cellules multi-jonctions	Au stade de la recherche, production exclusivement pour applications spatiales



Montre solaire Citizen



Téléphone photovoltaïque SAMSUNG



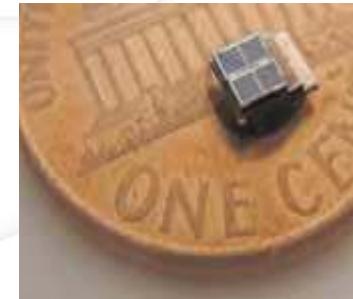
Module de développement TI



EnOcean



Nœud solaire Heliomote



Prototype de SmartDust



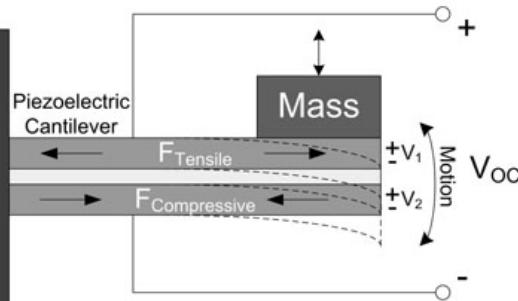
Picocube



## Source disponible:

Moteur, Ventilation, Force / Déformation, etc..

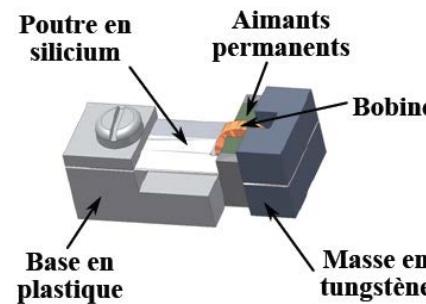
### Piézoélectricité



Apparition d'un champ électrique lorsque le matériaux est soumis à une déformation mécanique

**V<sub>OC</sub> ∝ deformation**

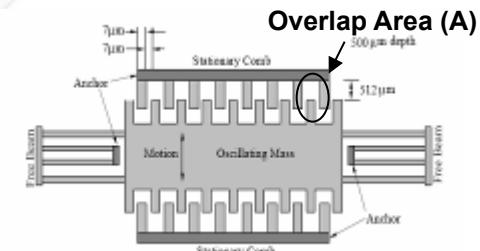
### Electromagnétisme



Les vibrations font déplacer la bobine dans le champ de l'aimant

$$V_{oc} = NBl \frac{dy}{dt}$$

### Electrostatique



Condensateur pré-chargé varier la capacité = varier le courant

$$Q = CV$$



## Principes de conversion électromécanique

Ressource mécanique

Adaptation mécanique

Transducteur électromécanique

Convertisseur électrique

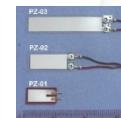
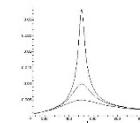
L'énergie mécanique  
disponible

l'énergie mécanique  
absorbée par le transducteur

L'énergie électrique produite par  
la conversion électromécanique

L'énergie électrique utile

Energie mécanique pas  
utilisé



Pertes électriques et  
mécaniques de conversion



Pertes de  
conversion AC/DC



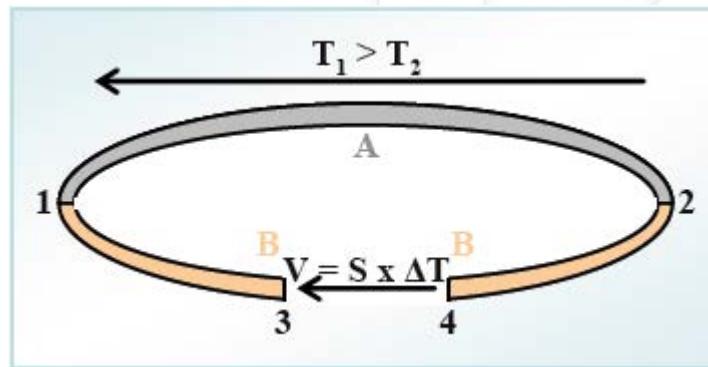
	Piézoélectricité	Electromagnétisme	Electrostatique
Source de tension nécessaire	Non	Non	Oui
Echelle	Peu miniaturisable	Très peu miniaturisable	Très miniaturisable
Puissance volumique (théorique)	335µW/cm <sup>3</sup>	340µW/cm <sup>3</sup>	100µW/cm <sup>3</sup>



Publication	Matériaux piézoélectrique	Volume (cm <sup>3</sup> )	masse (g)	Accélération des vibrations (m.s <sup>-2</sup> )	Fréquence des vibrations (Hz)	Puissance (μW)	Densité de puissance (μW.cm <sup>-3</sup> )	Figure de mérite Mitchenson (%)
<b>Générateurs macroscopiques</b>								
WHI2001	PZT	0,125	0,8	2,3	80,1	2,1	17	0,24
ROU2004	PZT-140μm	0,77	8,5	2,5	120	210	273	1,31
ROU2004	PZT-280μm	0,775	9,2	2,5	120	380	490	2,35
SOD2004	PZT-250μm	39	-	9,8	113	500	3	0,00
JEO2008	PMN-ZT-250μm	poutre_0.73	-	0,1	120	500	-	-
SHU2009	PZN-PT-265μm	4,95	0,4	9,81	110	1000	200	0,15
KOR2011	PZT	10,8	5	888	50	625	58	0,00
ZHU2011	PZT-70μm	13,912	3,59	3,9	67	240	17	0,04
GON2009	PZT	0,57	-	-	25	113	-	-
KOK2009	PZT-160μm	0,027	-	50	400	42	-	0,34
FER2005	PZT-500μm	0,1875	82	8,829	41	0,27	1	0,01
LEF2006	PZT-300μm	37,26	-	0,045N	57	300	8	
ZHU2009	PZT-280μm	1,4	16,7	2,2563	87	370	370	1,59
REN2010	PMN-PT	poutre_0.078	0,5	100	60	4160	-	-
DAI2009	PZT-1mm	2,23	-	9,81	51	1055	472	0,96

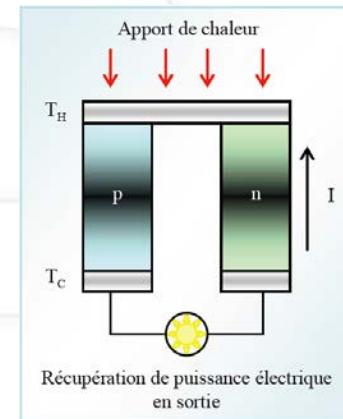


Une différence de potentiel apparaît à la jonction de deux conducteurs de natures différentes soumis à une différence de température.

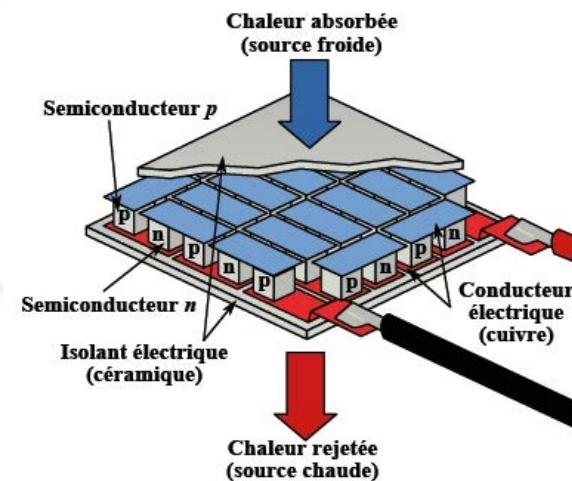


Cette différence de potentiel est définie par l'équation

$$V = (S_A - S_B) \cdot (T_1 - T_2) = S_{AB} \cdot \Delta T$$



Mode générateur





Récupération de l'énergie électrique grâce à des gradients de température

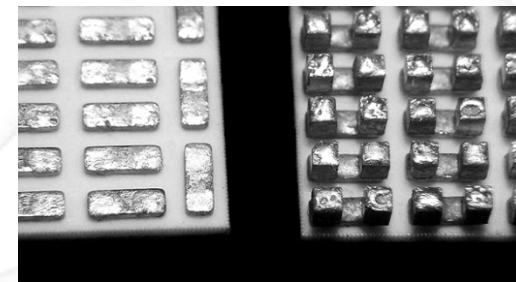
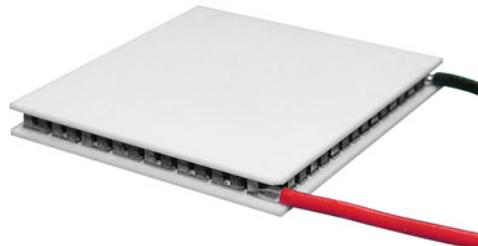
### Source disponible:

Conduites d'eau ou d'air, radiateurs, entre fenêtre et air ambients, etc..



#### Module *Micropelt* :

- . Dimensions : 8 mm<sup>2</sup> et 14 mm<sup>2</sup>x1.1 mm
- . 540 jonctions de Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, (140 mV.K<sup>-1</sup>)
- . 1.5 mW pour ΔT de 10 K (2 mA à 0.75 V charge adaptée Qin=0.75 W)
- . 13.5 mW pour ΔT de 30 K (5.75 mA à 2.3V charge adaptée Qin=2.25 W)
- . R<sub>TEG</sub> =12.5 K.W<sup>-1</sup>



Succession de jonctions PN



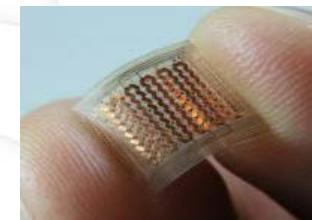
Références	Gradient de Température	Densité d'Énergie disponible	Remarque
[THE2010]		6 µW/C	
[BOI2011]	Corps humain/Air ambiant	13,6 mW/cm <sup>2</sup>	
[STO1997]	10°C	15 µW/cm <sup>2</sup>	
[ROU2004]		15 µW/cm <sup>2</sup>	0,1-3%
[VAN2008] IMEC		25 – 30 µW/cm <sup>2</sup>	
[RAJ2008]	Corps humain	25 µW/cm <sup>2</sup>	
[DUG2004]	5K	30 µW	0,2 cm <sup>3</sup>
THERMO LIFE	10K	135µW	D=9.3mm/ h=1.4mm
[WHA2003]			surface de 0,5 cm <sup>2</sup>
[BRE2002]	5°C	40 µW	épaisseur quelques millimètres
[BEN2001]			
[DUP2011]	5°C	40 µW/cm <sup>2</sup>	
[BOI2011]	1°C	50 µW/cm <sup>2</sup>	
[THE 2010]	5°C	60 µW/cm <sup>2</sup>	0.2 cm <sup>2</sup>
[GYS2005]	22°C	100 µW	
NEXTREME THERMAL	0.8K	140 µW	
[RAJ2008]	Industrie	1 – 10 mW	
MICROPELT	10K	2,8 mW	
[FOR 2008]		225 mW/cm <sup>2</sup>	5 mm*15 mm

## Focus

Augmenté la conductivité électrique  
Faible conductivité thermique



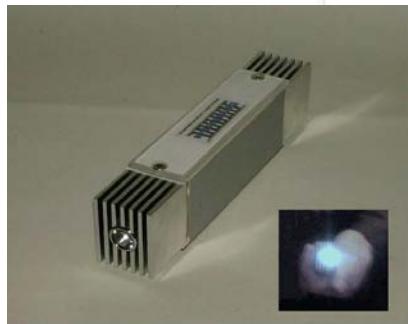
société Perpetua



GreenTEG  
10°C 150 µW/cm<sup>2</sup>



Power Felt nouveau thermoélectrique



lampe de poche thermoélectrique



Micropelt's





## Source disponible

Radio AM/FM  $\approx 100$  MHz

TNT  $\approx 450 - 860$  MHz

GSM 915 MHz

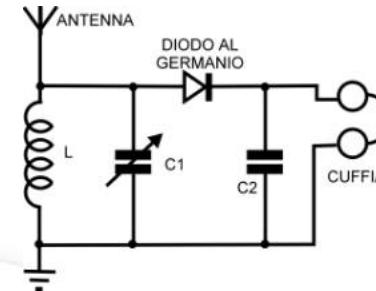
3G 1800 MHz

UMT 2100 MHz

Wi-Fi(b-g) 2400 MHz

Bluetooth 2400 MHz

WIMAX 3500 MHz



### Observations Univ. Liège

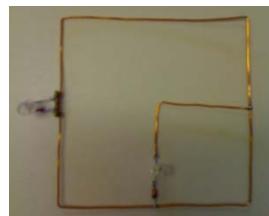
3 V/m à 10 V/m

Dans les zones de réception (en 900 et 1800 MHz)

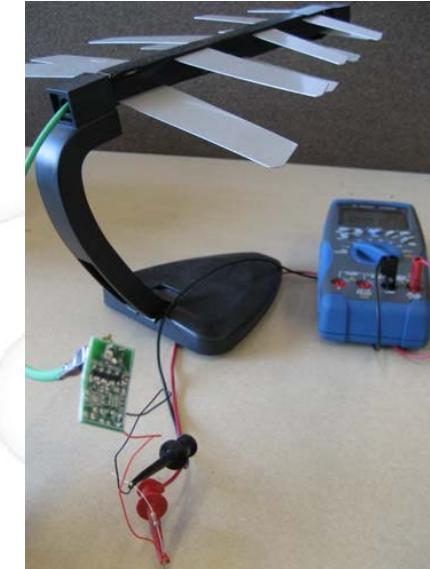
0,1 à 0,5 V/m

(à 20 cm d'une borne wifi 50 mW)

Bande utilisée	Référence	Densité de puissance
1,8-1,9GHz	[BOU2010]	35,5 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
GSM	[RAJ2008]	0,1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
WIFI	[RAJ2008]	1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



INTEL scavenged 60 $\mu$ W, from a TV tower at a distance of 4.1km. 674-680 MHz (5 dBm)



## Principe de conversion

Adaptation

Convertisseur

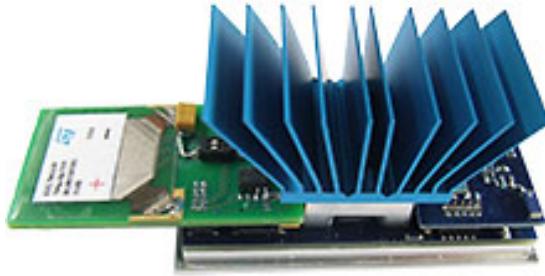
Filtre  
Régulation

Charge

Stokage

10-100  $\mu$ W

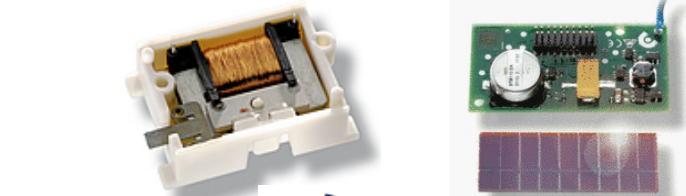
# Microsource d'énergie



**micropelt**



Indian NMECTechnology



Green. Smart. Wireless.  
**enocean®**



 **intesens**  
TELEDIAGNOSTIC SOLUTIONS



 **perpetuum**

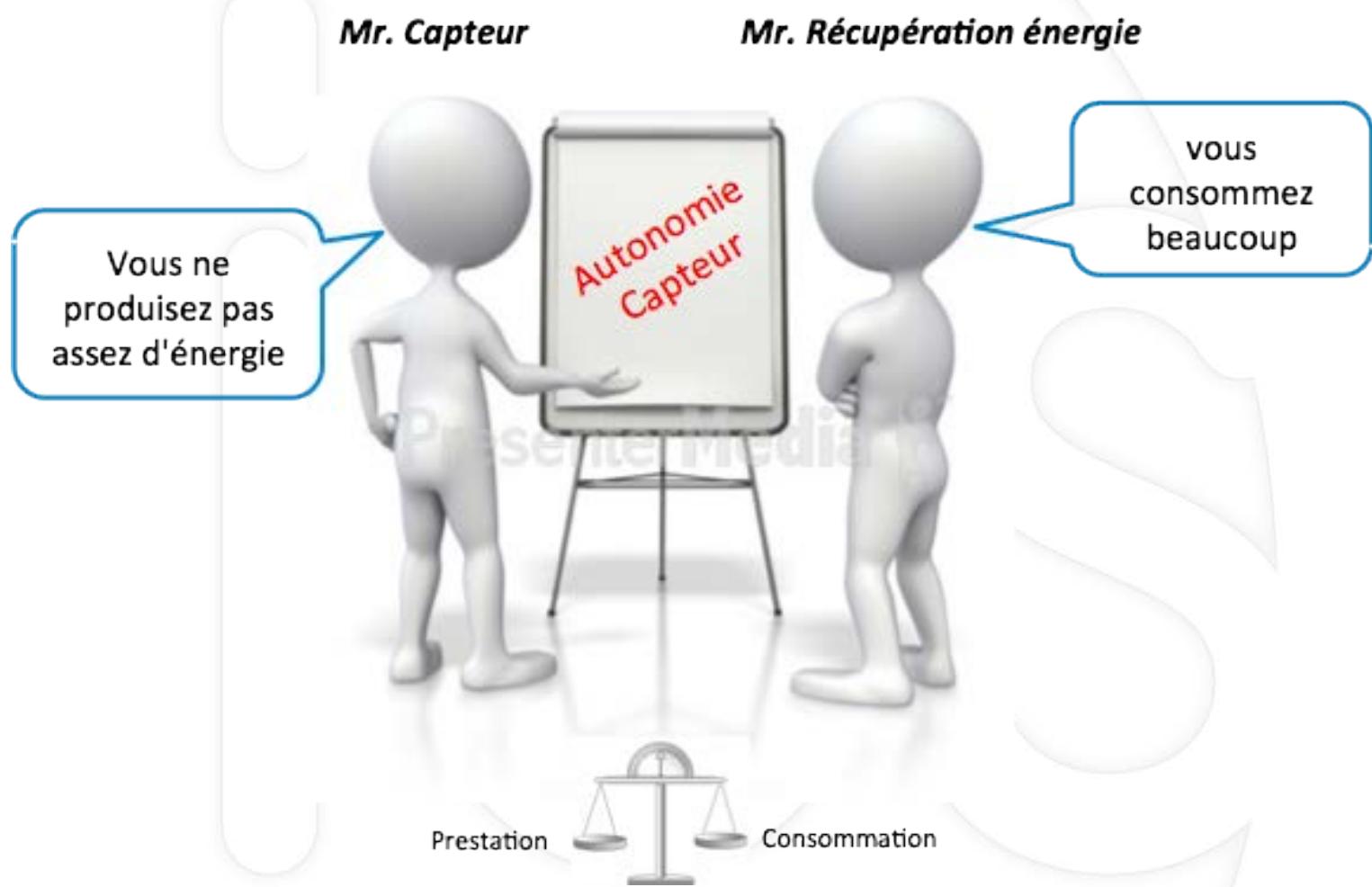


**RCA Airnergy**



**Heliomote**

# Microsource d'énergie

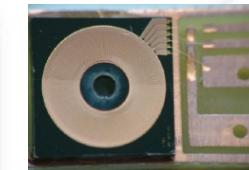


# SYNTHÈSES

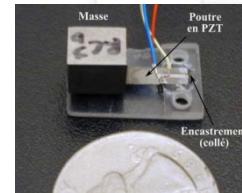
**Autonomie (Récupération d'énergie ambiante)**

**Sources** (photovoltaïque, électromagnétique, thermoélectrique, mécanique, etc..)

Micropelt



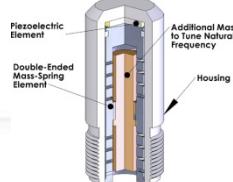
Roundy



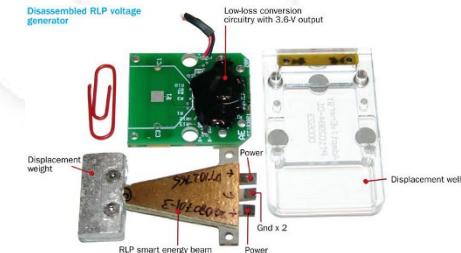
EnOcean



Richard Murray



Adaptative



**Améliorer l'efficacité des transducteur et convertisseurs**

**Trouver de nouvelles façons de récupérer l'énergie environnementale**

**Focus: Système de génération multisource**

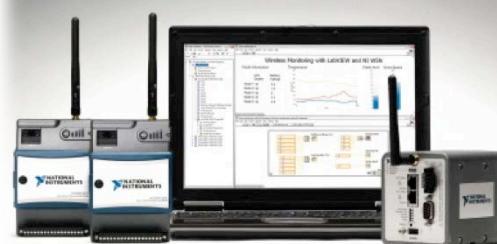
# CONCLUSION

- Densité d'énergie (Source intermittente)
- Conversion d'énergie
- Croissant des MEMS/NEMS Microsystème électromécanique
- Système multi-sources (S'adapter à différents environnements)
- Dans un futur très proche , tout système électronique sur une même puce

Hier



Aujourd'hui



Demain



**SIP** (system in package) **SOC** (system on chip)



l'institut  
d'électronique

# Merci de votre attention



IES | Institut d'Électronique du Sud

[www.ies.univ-montp2.fr](http://www.ies.univ-montp2.fr)