

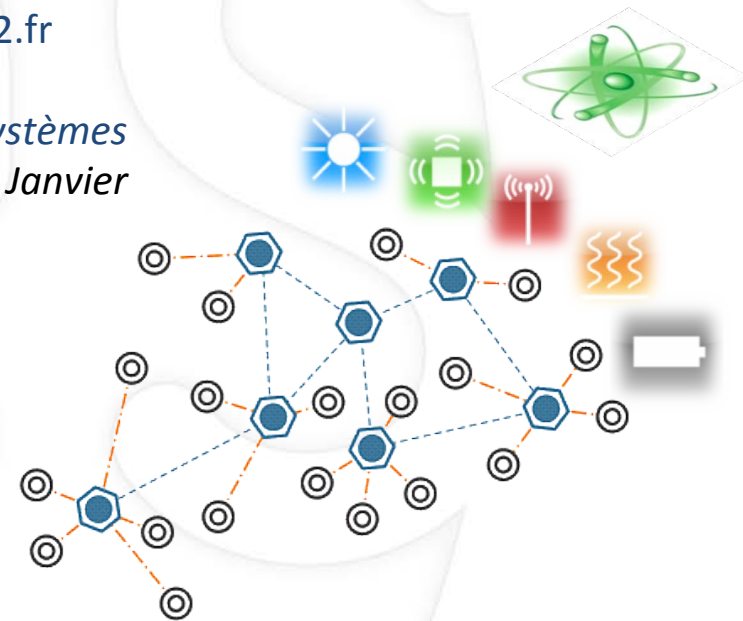
# ETAT DE L'ART DES MICRO-SOURCES D'ÉNERGIE POUR L'AUTONOMIE DES CAPTEURS SANS FIL

**Ricardo Garcia**

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

IES

*Dép. Capteurs Composants Systèmes  
Séminaire Technique jeudi 31 Janvier*



## Contexte

- Evolution des capteurs

## Réseaux de capteur sans fil

- Introduction
- La problématique

## Micro-sources d' énergie

- Lumière
- Vibration
- Thermique
- Ondes RF

## Conclusion

- L'information élément utile

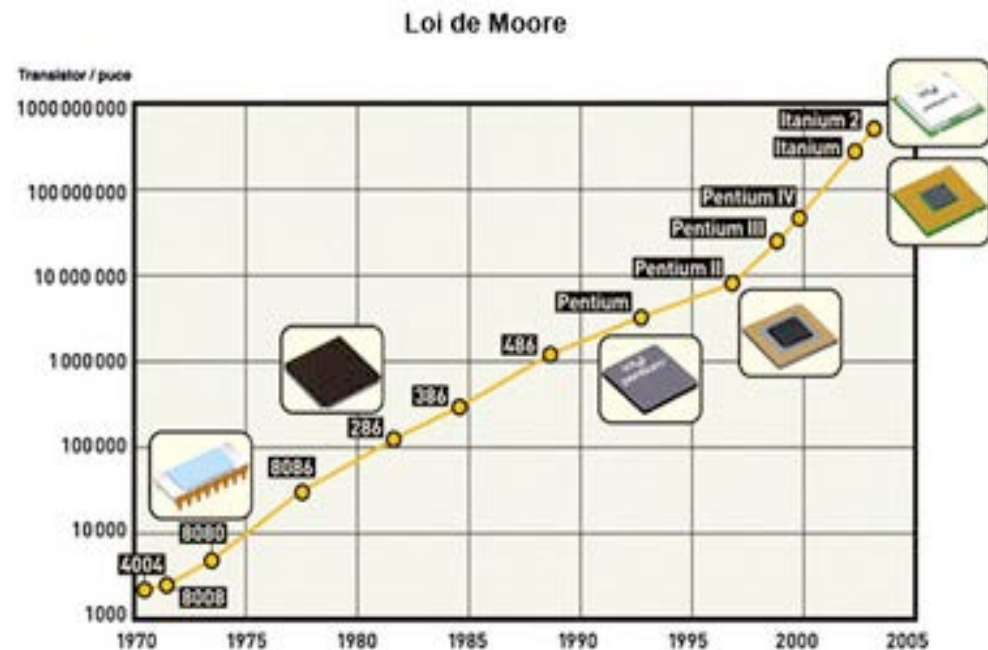


Le nombre de transistors par unité de surface quadruple tous les trois ans, et le coût des circuits est divisé par deux tous les 18 mois environ



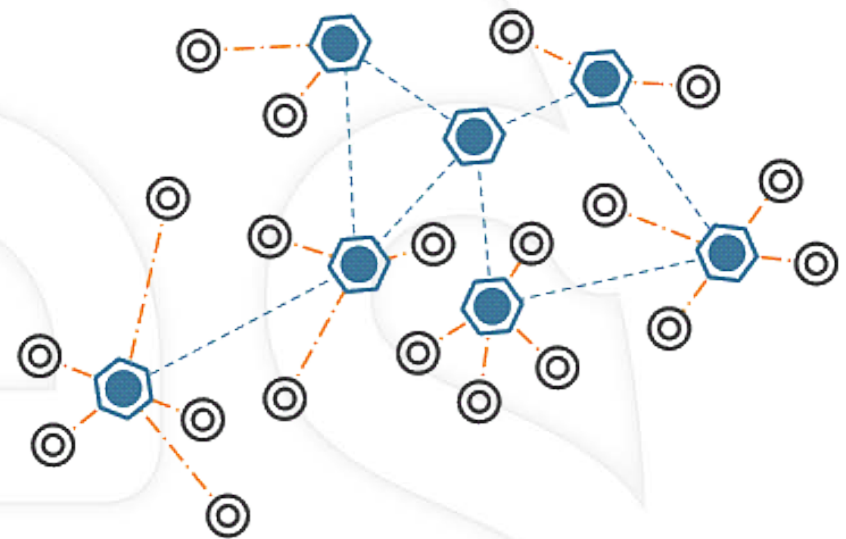
## Objectif:

*Consommer moins d'énergie  
Plus de prestations  
Plus de portabilité*



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

WSN



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 ?

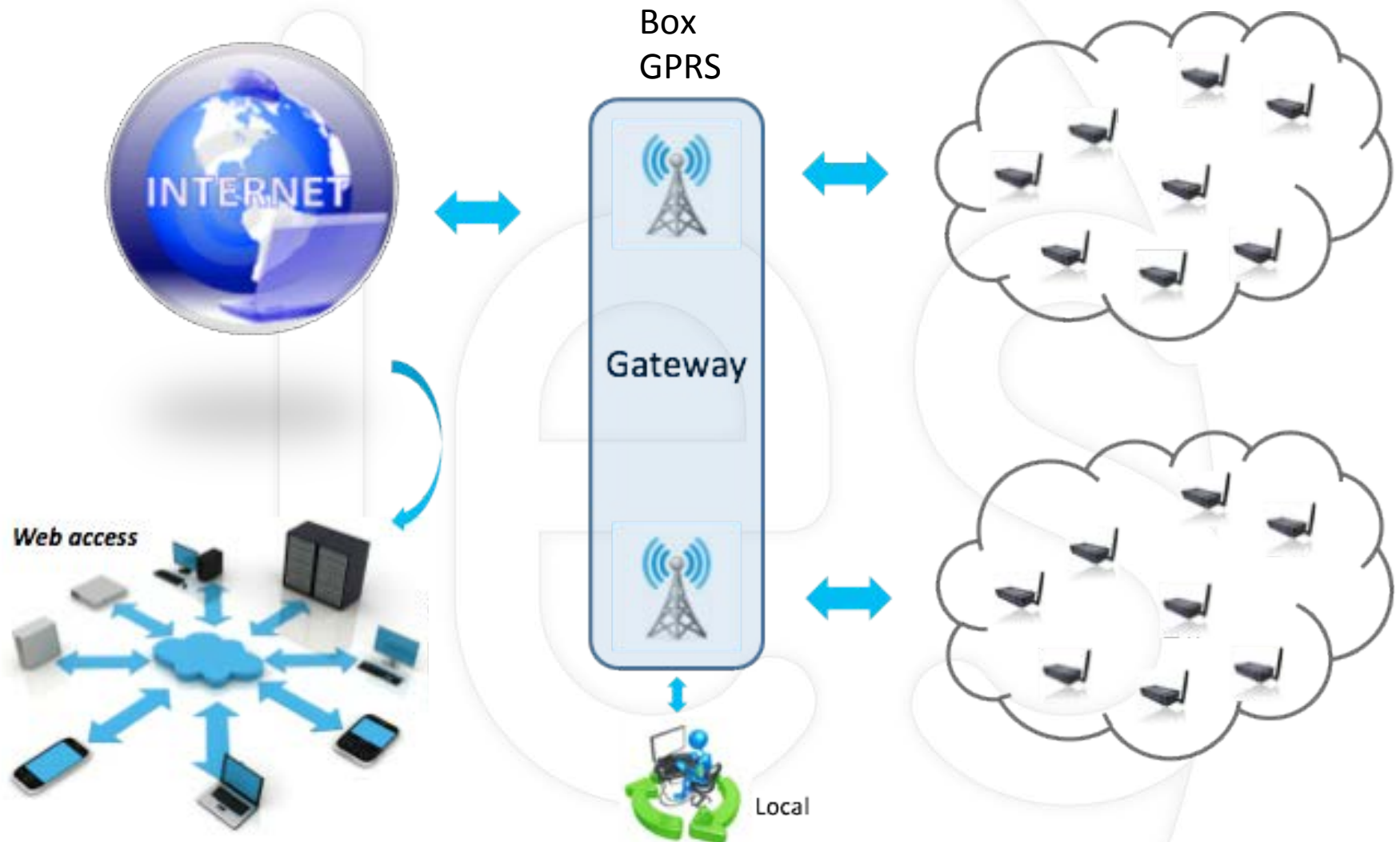
Acquérir des données et les transmettre à une station de traitement.

## Avantages

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

Pas d'infrastructure





## 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**

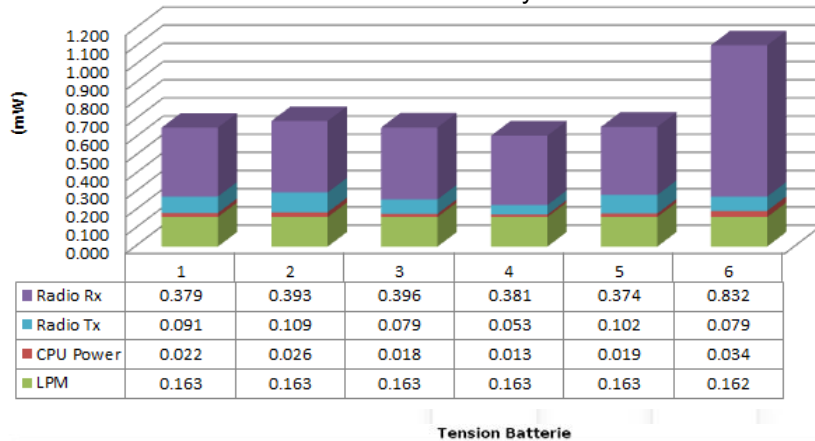
Densité batteries, techniques de conservation, récupération de énergie



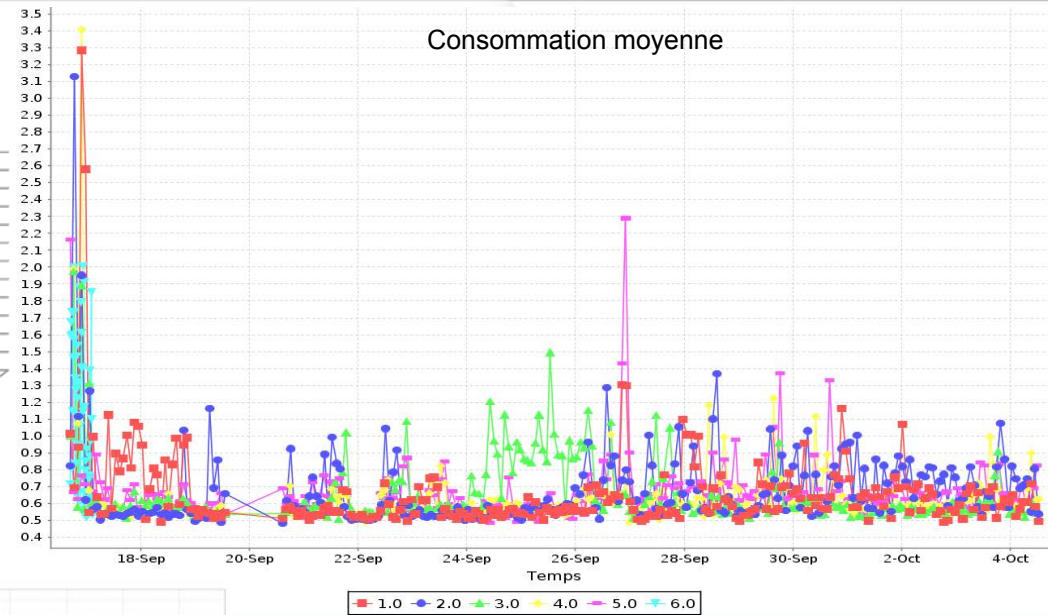
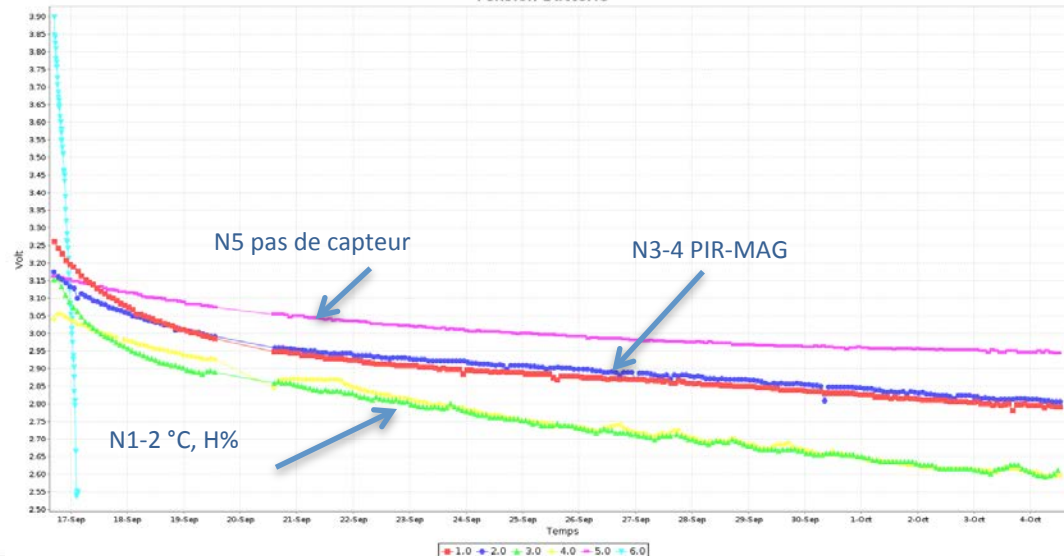


### CAS EXPÉRIMENTAL (Texas Inst. 430)

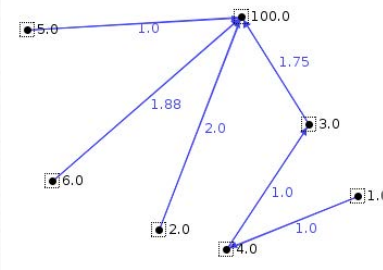
Consommation moyenne



Tension Batterie



### Topologie à (t)



### Fact. Influent sur E

- Environnement
- Type de mesure
- Pertes de paquet
- Collision
- CLK  $\mu$ P
- Protocole
- Sécurité
- Echantillonnage
- Temps de réveil
- Duty-cycling
- Retransmission

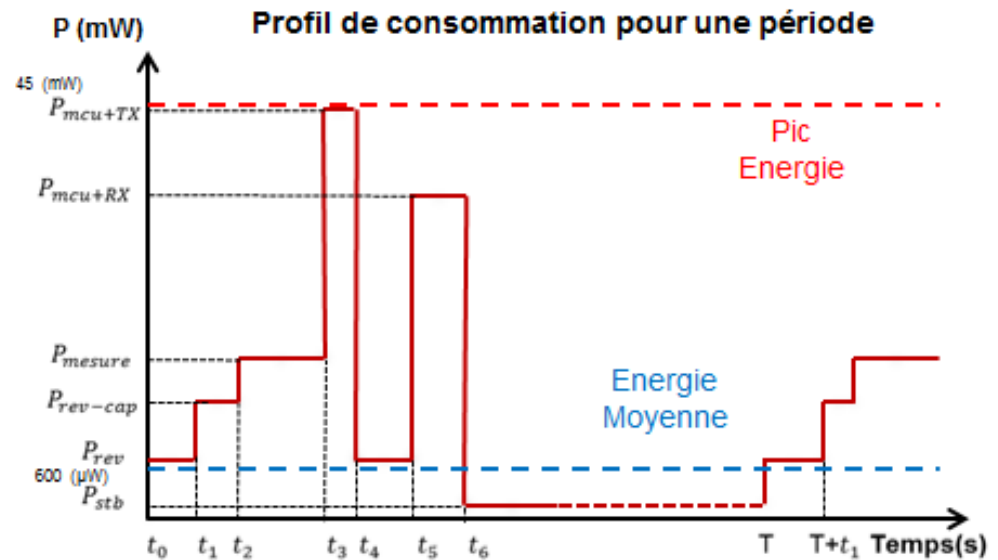
## Comparaison des microcontrôleurs

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

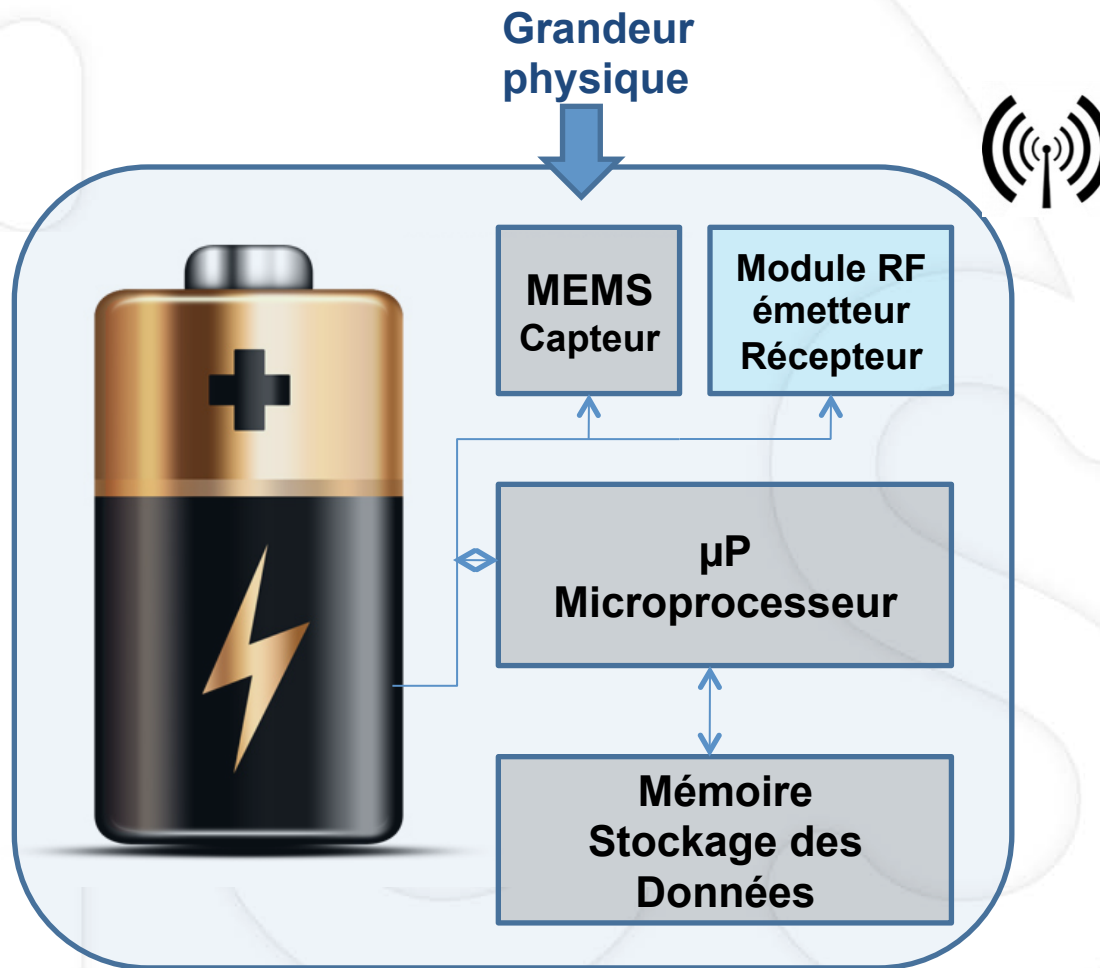
**Sleep**  
**Wakeup** minimiser ce temps  
**Active**  
**Radio**

## Techniques du Duty-cycling

Le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie

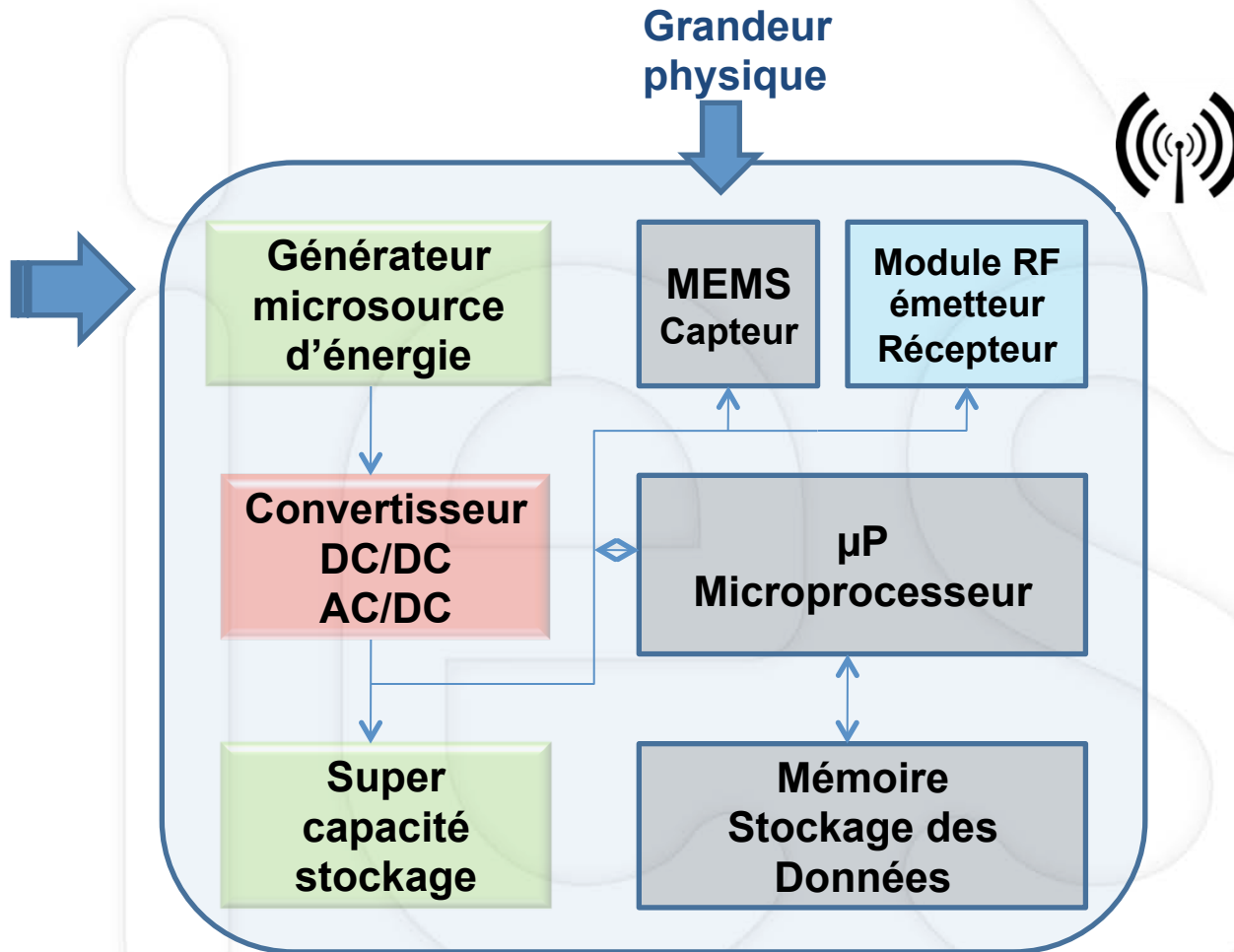


Système de stockage nécessaire !!





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

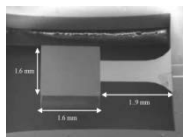


## Sources d'énergie disponibles

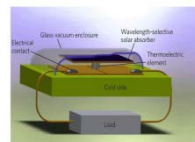
Source d'énergie	Caractéristique	Efficacité	Densité
Lumière	Extérieur	6~24%	~6-20 mW/cm <sup>2</sup>
	Intérieur fenêtre		~1-2 mW/cm <sup>2</sup>
	Intérieur fluo		~10-60 $\mu$ W/cm <sup>2</sup>
Thermique	Humain	~0.1%	60 $\mu$ W/cm <sup>2</sup>
	Industriel	~3%	~1-10 mW/cm <sup>2</sup>
Vibration	~Hz–humain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

## Effets Physiques concernés

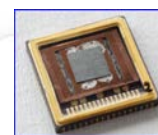
Effet Piézoélectrique  
Effet Electromagnétique  
Effet Electrostatique  
Energie Cinétique  
Effet Thermoélectrique  
Effet Pyroélectrique  
Effet Photoélectrique  
Effet Thermo-photovoltaïque



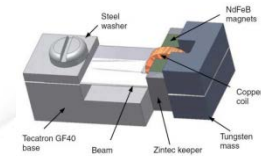
Générateur piézoélectrique  
P<sub>max</sub> = 0,6  $\mu$ W @ 0,25 g et 200 Hz  
S. Basrour et al., 2011



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



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



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

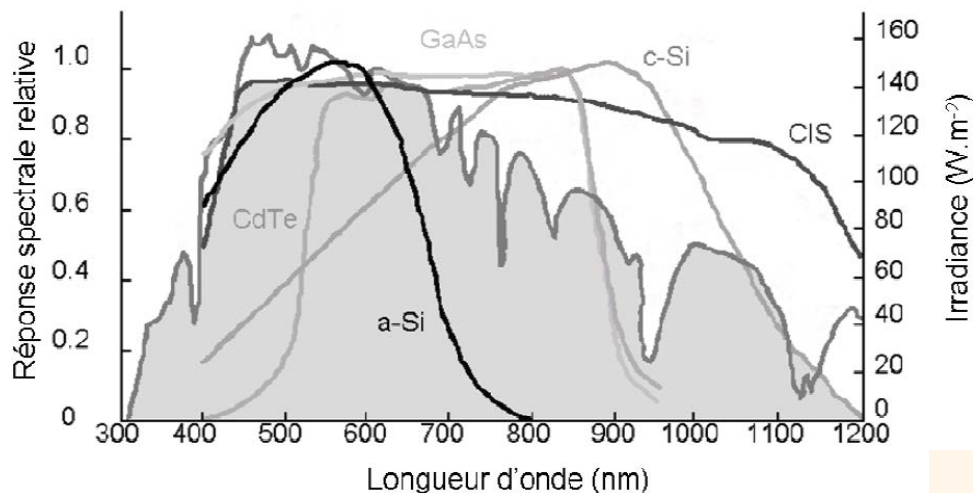
Éclairément	Puissance (100 lux = 100 lumen/m <sup>2</sup> = 1 W/m <sup>2</sup> )
Grand soleil 100 000 lux	1000 W/m <sup>2</sup>
Couvert haut	400 à 500 W/m <sup>2</sup>
Ciel nuageux	200 à 50 W/m <sup>2</sup>
Pluie	50 W/m <sup>2</sup>
Intérieur	3 W/m <sup>2</sup>
Intérieur vers une fenêtre	4 à 20 W/m <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]

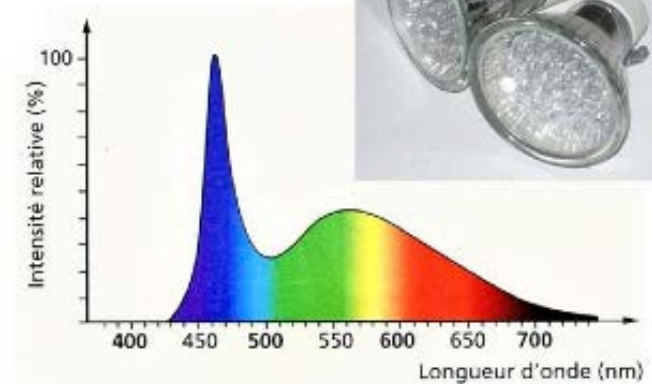
Dimensionner la surface pour l' application



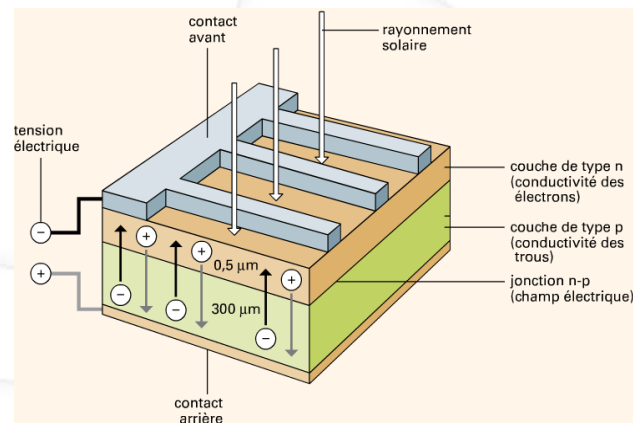
Les cellules photovoltaïques captent le flux lumineux (**photons**) et la transforment en électricité.



Diode électroluminescente ou LED blanche :  
répartition spectrale d'énergie



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

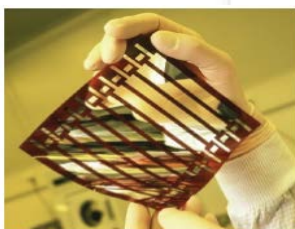




Matériel	$\eta$ éclairement normal		$\eta$ faible claiement	$\eta$ labo
Cellule en Si monocristallin	très bon (15-20%)	150Wc/m <sup>2</sup>	faible	20-25%
Cellule en Si polycristallin	bon (12-15%)	100Wc/m <sup>2</sup>	faible	environ 20%
Cellule en Si amorphe (a-Si)	moyen 6-8%	35-60 Wc/m <sup>2</sup>	bon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

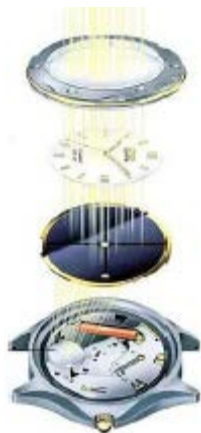


Film photovoltaïque de Wysips



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**



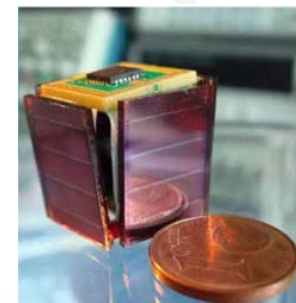
**EnOcean**



**Nœud solaire Helimote**



**Prototype de SmartDust**

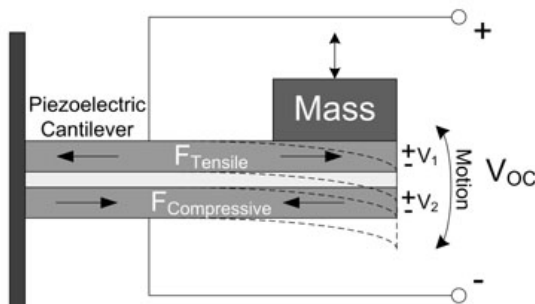


**Picocube**

## Source disponible:

Moteur, Ventilation, Force / Déformation, etc..

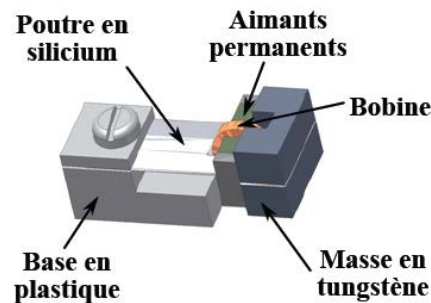
### Piézoélectricité



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

$$V \propto \text{deformation}$$

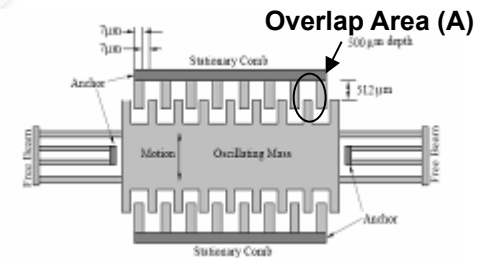
### Electromagnétisme



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 électronique

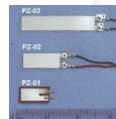
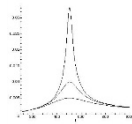
L'énergie mécanique  
disponible

l'énergie mécanique  
absorbée par le transducteur

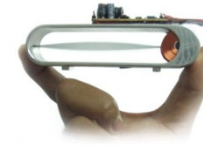
L'énergie électrique produite par  
la conversion électromécanique

L'énergie électrique utile

Energie mécanique pas  
utilisé



Pertes électriques et  
mécaniques de conversion



Pertes de  
conversion AC/DC



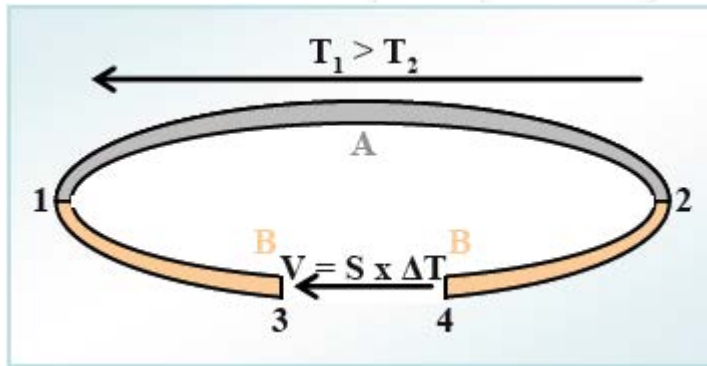
	Piézoélectricité	Electromagnétisme	Electrostatique
Source de tension nécessaire	Non	Non	Oui
Echelle	Peu miniaturisable	Très peu miniaturisable	Très miniaturisable
Puissance volumique (théorique)	335μW/cm <sup>3</sup>	340μW/cm <sup>3</sup>	100μW/cm <sup>3</sup>



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 Mitheson (%)
Générateurs macroscopiques								
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

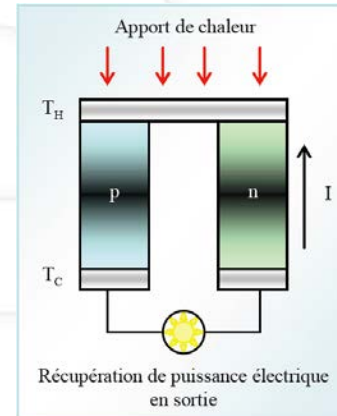


Une différence de potentiel apparaît à la jonction de deux conducteurs de natures différentes soumis à une différence de température.

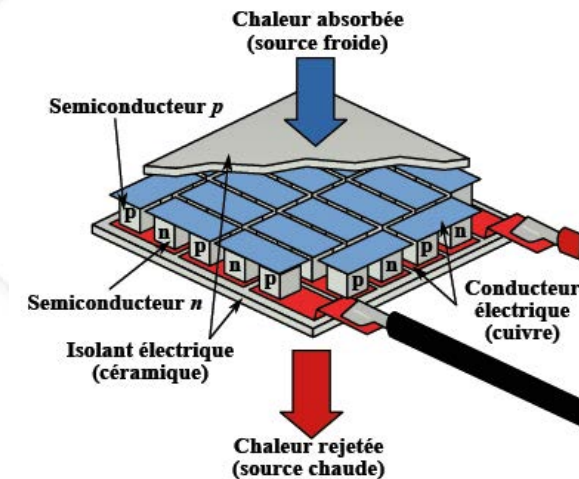


Cette différence de potentiel est définie par l'équation

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



Mode générateur



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

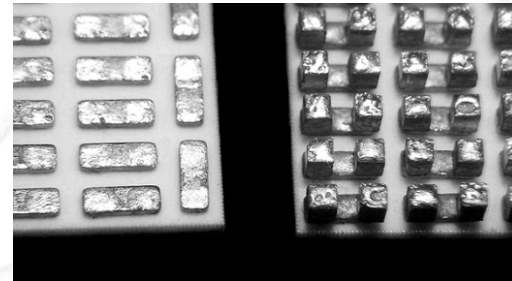
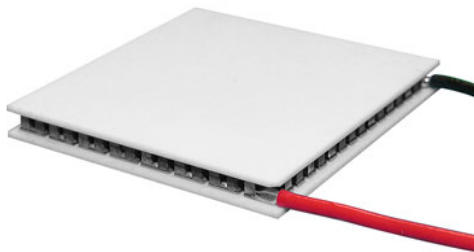
### Source disponible:

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



#### Module *MicroPelt* :

- . Dimensions : 8 mm<sup>2</sup> et 14 mm<sup>2</sup> x 1.1 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  
Q<sub>in</sub>=0.75 W)
- . 13.5 mW pour ΔT de 30 K (5.75 mA à 2.3V charge adaptée  
Q<sub>in</sub>=2.25 W)
- . R<sub>TEG</sub> = 12.5 K.W<sup>-1</sup>



Succession de jonctions PN



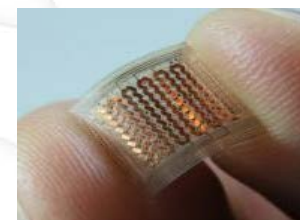
Références	Gradient de Température	Densité d'Énergie disponible	Remarque
[THE2010]		6 $\mu\text{W}/\text{C}$	
[BOI2011]	Corps humain/Air ambiant	13,6 $\text{mW}/\text{cm}^2$	
[STO1997]	10°C	15 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	
[ROU2004]		15 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	0,1-3%
[VAN2008] IMEC		25 – 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$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

## Focus

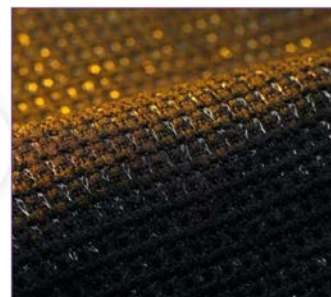
Augmenté la conductivité électrique  
Faible conductivité thermique



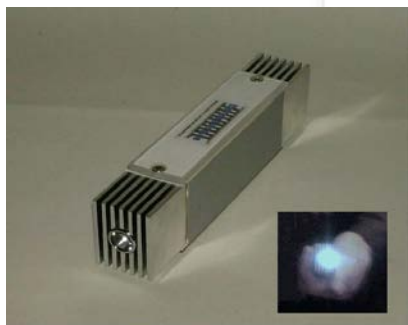
société Perpetua



GreenTEG  
10°C 150  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



Power Felt nouveau thermoélectrique



lampe de poche thermoélectrique



**Micropelt's**



## Source disponible

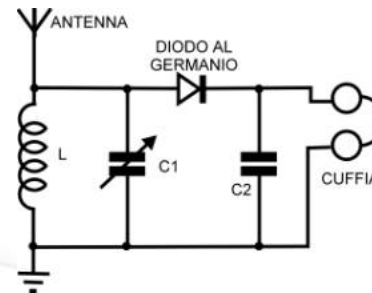
Radio AM/FM  $\approx 100$  MHz  
TNT  $\approx 450 - 860$  MHz

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**

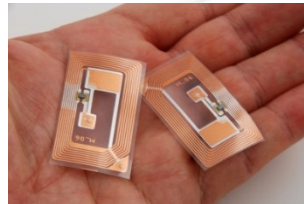
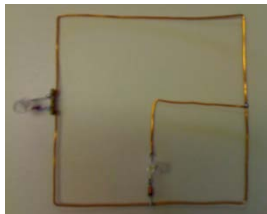
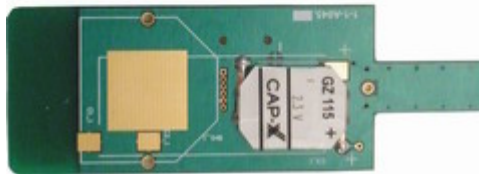
Dans les zones de réception (en 900 et 1800 MHz)

**0,1 à 0,5 V/m**

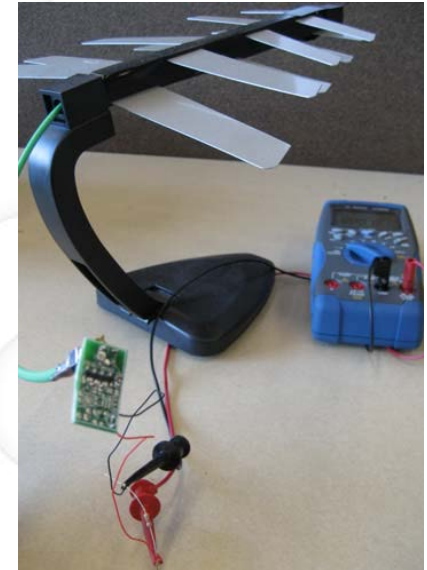
(à 20 cm d'une borne wifi 50 mW)

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 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

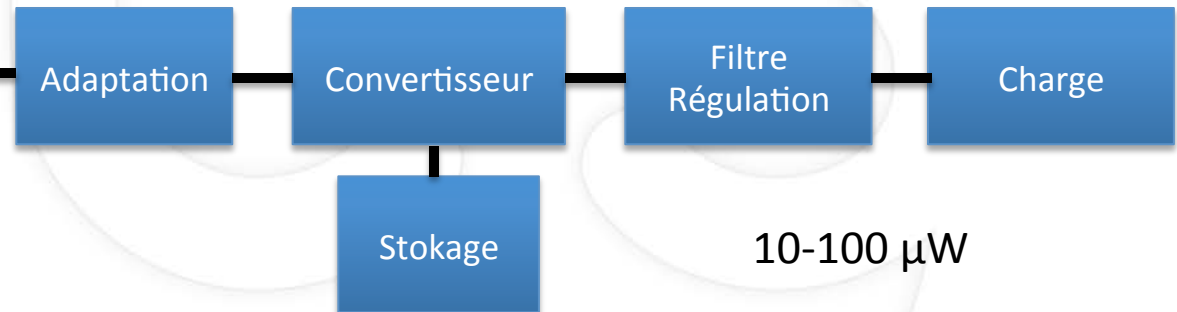




INTEL scavenged  $60\mu\text{W}$ , from a TV tower at a distance of 4.1km. 674-680 MHz (5 dBi)

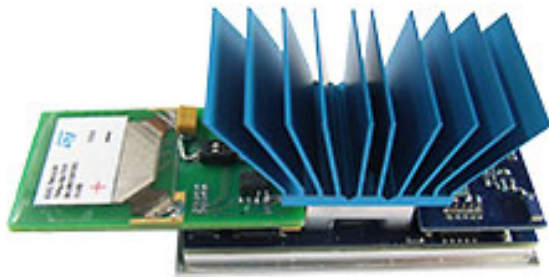


Principe de conversion

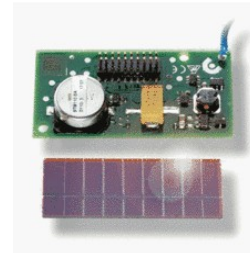
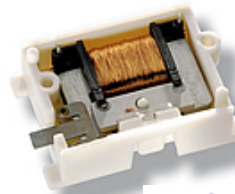


$10\text{-}100\ \mu\text{W}$





**micr°pelt**



**RCA Airnergy**

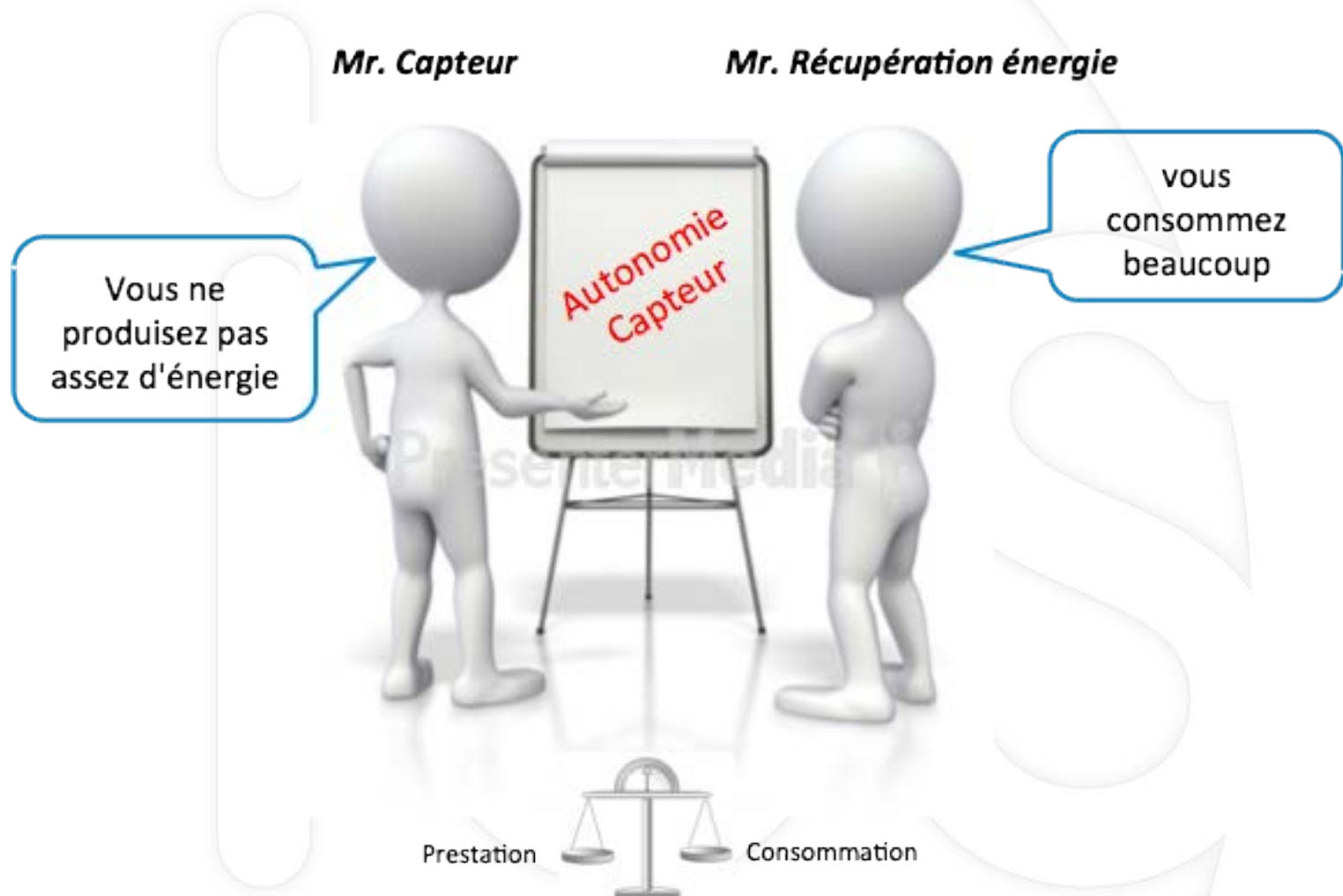


**Indian NMECTechnology**



**Helimote**

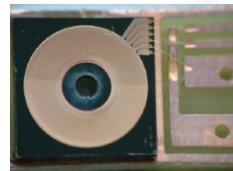
# Microsource d'énergie



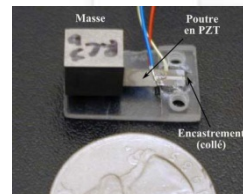
**Autonomie** (Récupération d'énergie ambiante)

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

Micropelt



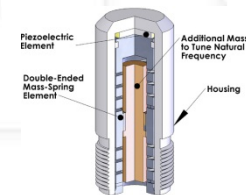
Roundy



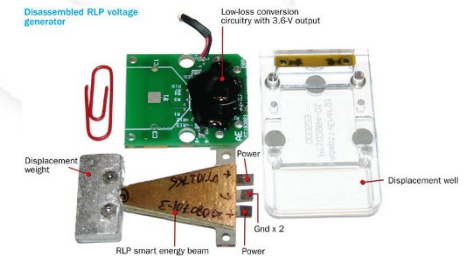
EnOcean



Adaptative



Richard Murray



**Améliorer l'efficacité des transducteur et convertisseurs**  
**Trouver de nouvelles façons de récupérer l'énergie environnementale**  
**Focus: Système de génération multisource**

- 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**