



# Génération d'énergie pour les petits systèmes électroniques communicants

*Marianne Lossec, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed*

**SATIE UMR CNRS 8029**  
**Ecole Normale Supérieure de Cachan**  
**Antenne de Bretagne**

*Journée Meito, Lannion, le 30 Avril 2009*

## Des besoins et des ressources

Systèmes électriques ou électroniques portables

- ⇒ besoins en très forte croissance
- ⇒ contraintes d'autonomie et/ou de recharge



## Problématique

⇒ exploiter les ressources énergétiques présentes dans l'environnement humain :

Chaleur dégagée par le corps

Énergie mécanique issue des mouvements humains

Lumière reçue

Vibrations sonores

Ondes électromagnétiques...

⇒ convertir ces ressources (renouvelables) en électricité pour alimenter directement un appareil ou charger un accumulateur tampon

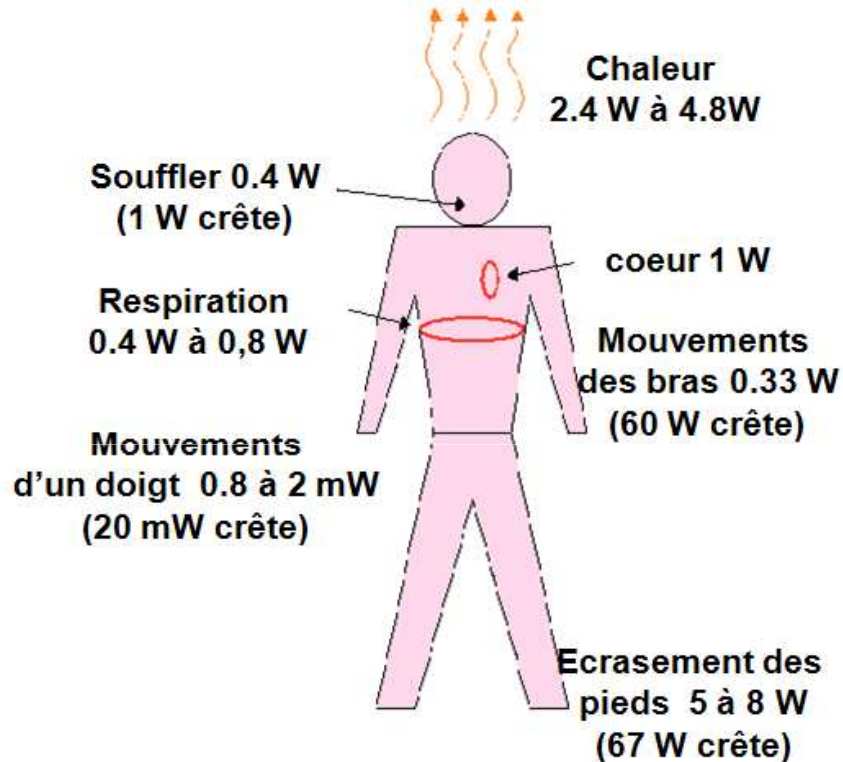
## Introduction

Ressources énergétiques humaines  
Autres ressources énergétiques  
Energie embarquée

## Les différents principes de conversion

Conversion thermoélectrique  
Conversion électromécanique  
Conversion photovoltaïque  
Conversion à partir d'ondes électromagnétiques  
Conversion à partir de carburants

## Générateur multisources



Starner, « Human-Powered Wearable Computing », 1996

Puissance récupérable au travers des activités d'une personne (puissance calorifique consommée):

- Nager:  $P_{cal}=500W$
- Courir (Marathon):  $P_{cal}=900W$

Mais rendement conversion énergie chimique en énergie mécanique environ de 22%

- Nager:  $P_{meca}=110W$
- Courir (Marathon):  $P_{meca}=200W$
- Faire du vélo:  $P_{meca}=75W$



15 mn de pédalage  
= 1 heure de lumière  
à 20W

## Emission de chaleur

La température du corps est régulée à environ 37°C

⇒ Si  $T_{\text{amb}} < T_{\text{peau}}$  : flux de chaleur vers l'extérieur

$$\frac{P}{S} = h.(T_{\text{peau}} - T_{\text{amb}}) \quad \text{W / m}^2$$

Ordre de grandeur :

dans l'air au repos :  $h \cong 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , ainsi pour un écart de 15°C (ambiance à 22°C), la peau nue dissipe 120 W/m<sup>2</sup> ou **12mW/cm<sup>2</sup>**

Les vêtements limitent la puissance dissipée en réduisant le coefficient d'échange

## Rayonnements électromagnétiques

### Lumière visible :

soleil jusqu'à **1 kW/m<sup>2</sup>** (100 000 lux)

éclairages artificiels : **2 à 10 W/m<sup>2</sup>**  
(200 à 1000 lux )

Activités « humaines » : champs  
électromagnétiques hautes fréquences

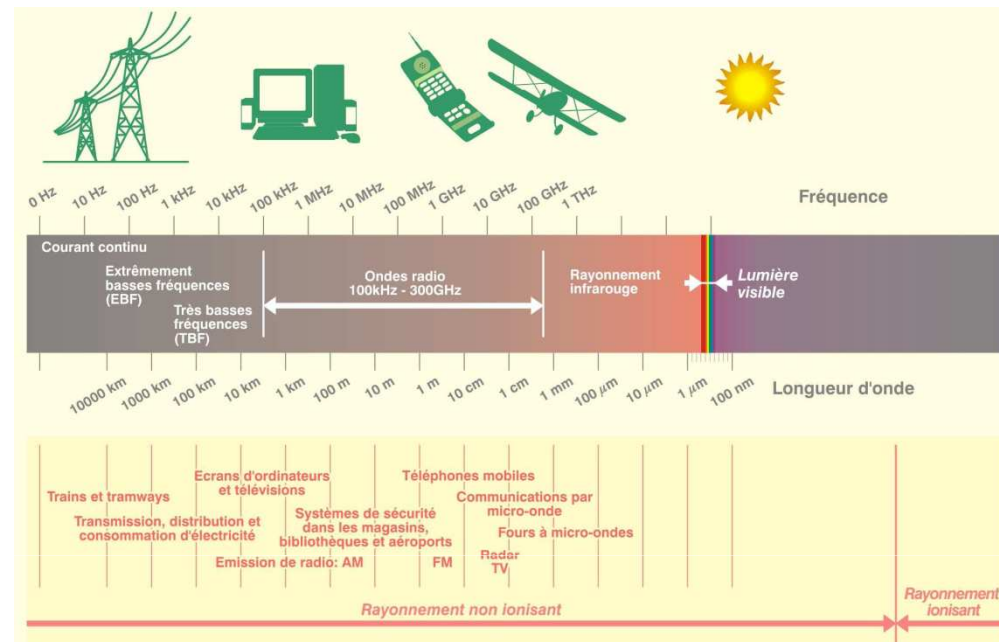
**Normes OMS (1999): 4,5 à 9 W/m<sup>2</sup>** (41 V/m et 58 V/m) à 900 et 1800 MHz, DAS (Débit d'Absorption Spécifique) de 0,08 W/kg pour le corps entier.

Coefficient de sécurité différents suivant les pays.

## Bruit: routes, machines....

Seuil d'audition : 1 pW/m<sup>2</sup>

Bruit de 100 dB : **10 mW/m<sup>2</sup>**



### Carburants « embarqués »

Avantage : densité d'énergie élevée, environ **10 Wh/gramme**, hors réservoir

Carburants liquides : facilité de conditionnement/stockage

### Electricité « embarqués »

Accumulateurs électrochimiques **60 à 150 Wh/kg**

Supercondensateurs **5 à 10 Wh/kg**

**Energie thermique** : la plus difficile à transformer en énergie électrique

**Machines thermodynamiques**

Rendement très faible pour de faibles écarts de température

$$\eta < \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \quad \left| \begin{array}{l} \\ T \text{ en Kelvin} \end{array} \right.$$

**Effet thermo-électrique** (effet Seebeck)  $E = \alpha \Delta T$

Rendement également très faible mais très peu encombrant, sans mouvement (silencieux)

Maximiser le rendement c'est maximiser le facteur de mérite ZT tel que  $Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \lambda}$

( $\lambda$  conductivité thermique,  $\rho$  résistivité électrique,  $\alpha$  coefficient de Seebeck)

Ex. :  $Z = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$  (Tellure de bismuth)

Avec  $\Delta T = 15^\circ\text{C} : \eta_{\text{Max}} = 0.4\% \Rightarrow P_{\text{max}} = 50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

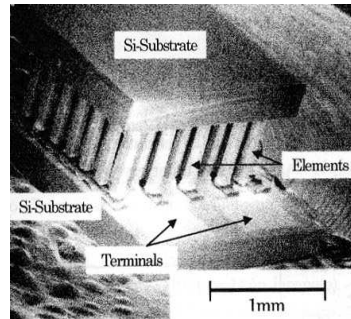
$\Delta T = 1^\circ\text{C} : \eta_{\text{Max}} = 0.02\% \Rightarrow P_{\text{max}} = 2.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



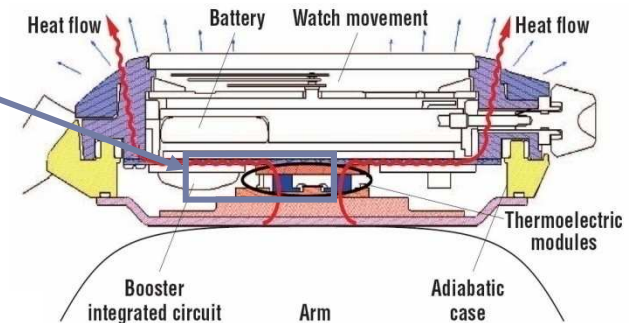
## Application: montres (consommations qq $\mu\text{W}$ )



**Seiko THERMIC  
1998**



**Cellules de tellurure de bismuth  
 $120\ \mu\text{m} \times 120\ \mu\text{m}$**



*J. Stockholm, « Génération Thermoélectrique », JEEA Cachan mars 2002.*

Générateur :  **$22\ \mu\text{W}$**  sous 0,3 V,  
un convertisseur électronique accroît la tension à 1,5 V



**Citizen CTY66-0341  
2001**

1242 thermo-couples  
Tension : 515 mV/K  
puissance de sortie  **$13,8\ \mu\text{W/K}$**



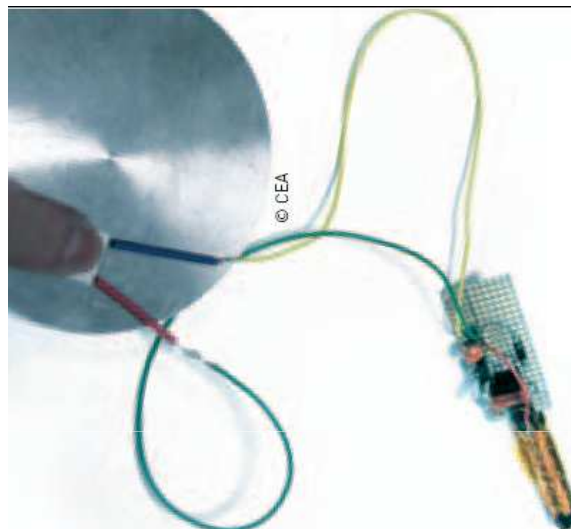
**Mesure du taux d'oxygène  
dans le sang**

$T_a = 22^\circ\text{C}$   
Tension:  
0.7V et 1.5V  
 $\Rightarrow$  **qq  $100\ \mu\text{W}$**

*V. Leonov, « Thermoelectric Generators on Living Beings », 2007*

### Technologies basés sur les nanomatériaux (CEA-Liten):

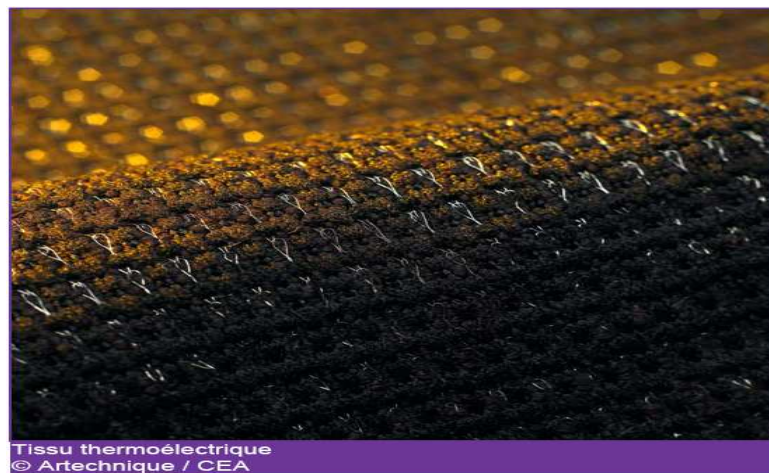
Interrupteur sans fil, commandé par la chaleur de la main:



Un démonstrateur pour un système ARVA a été réalisé

Vêtements « thermoélectriques »:

Technologie au stade de prototype, tissu composé de nylon dans lequel sont tissés des fils de deux alliages différents



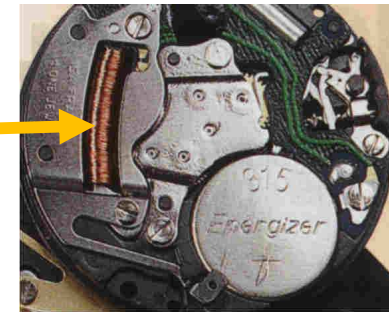
**Energie mécanique** : Facile à convertir en électricité, bons rendements possibles :

- générateurs électromagnétiques à aimants
- générateurs piézoélectriques

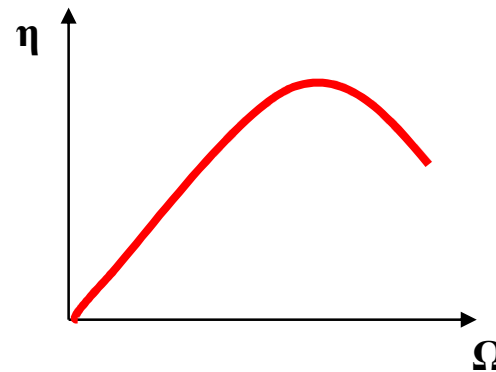
En grandes puissances : les rendements tendent vers 100%

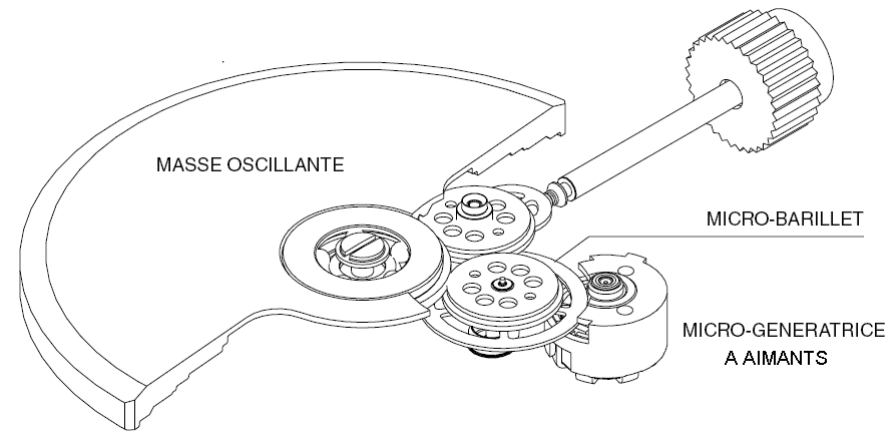
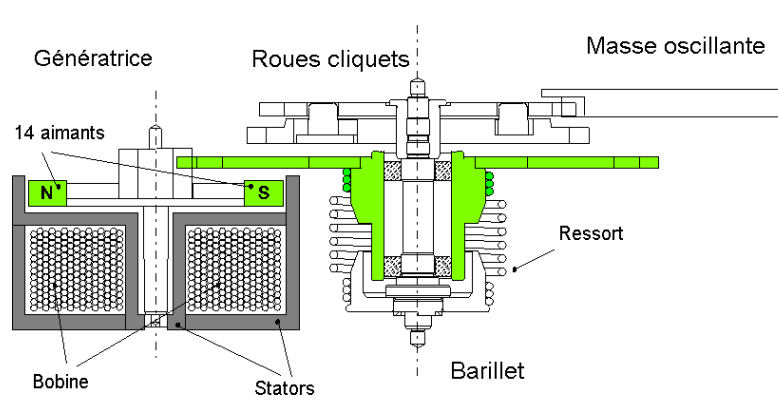
En petites puissances, ils diminuent...

Moteur de montre :  $100 \mu\text{W}$   $\eta < 10\%$



Petit moteur de qq W  $\eta > 50\%$



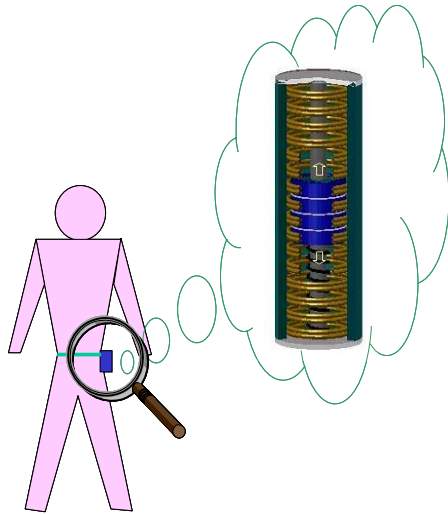
**Systeme Autoquartz (Société ETA)**Ordres de grandeurs:

- énergie accumulée dans le ressort: **100μJ**
- durée d'une décharge: **50ms**
- rendement de conversion: **30%**

$$\Rightarrow P_{\text{moy}} = 6\mu\text{W}$$

avec une fréquence de répétition de 0.2Hz



Générateur linéaire (Laboratoire SATIE)

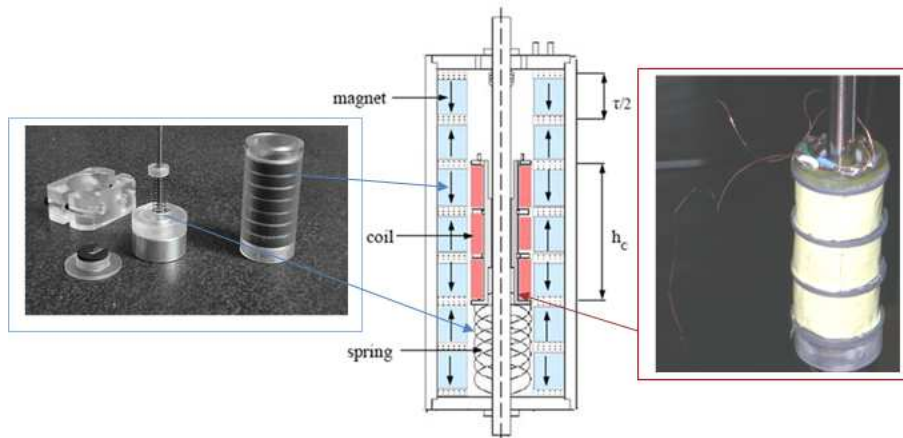
Mouvement de la hanche:

$$x(t) = X_M \cos(\omega_0 t)$$

avec  $X_M = 2 \cdot 10^{-2} \text{m}$  et  $f_0 = 2 \text{Hz}$

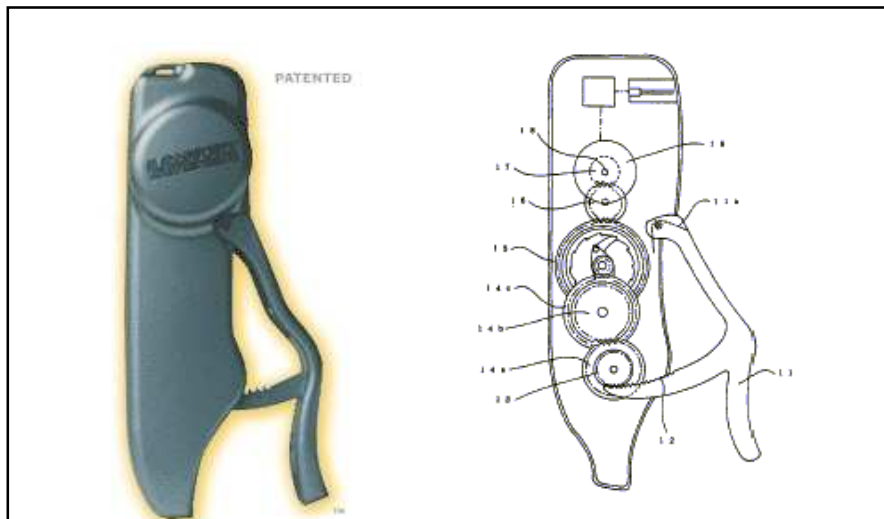
$$P_{\max} = \frac{m \cdot X_M \cdot \omega_0^3 \cdot L_{\max}}{2}$$

$$\Rightarrow P_{\max} \cong 10 \text{mW}$$

Genouillère (Canada)

$$P_{\text{moy}} = 5 \text{W}$$

$\Rightarrow$  1 minute de marche = 10 minutes de téléphone

Chargeurs divers, mouvements volontaires

**Chargeur à main « Alladin Power » (Nissho)**  
**1,6 W** pour 90 cycles par minute



**Chargeur à pied « Stepcharger » (Nissho)**  
 jusqu'à **6 W**



**Chargeur à manivelle**  
**Freepaly**  
 45 secondes de remontage  
 donnent 3 à 6 min d'appel

Chargeur souris verte (LSV Production)

À tirette et ressort de rappel, **1,5 W**, 110g



**Lampes rechargeables****Lampe "Lavrans Laading"**

Stockage dans un ressort  
2 à 3 minutes d'éclairage

**Nightstar flashlight**

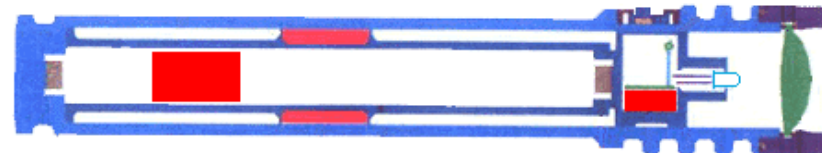
À secouer, stockage dans condensateur

30 secondes de secousses (à 3 Hz)

-> 5 minutes de lumière intense

puis 2 minutes de lumière plus faible

environ 390 g.



**Dynamos vélos:**

La puissance moyenne de pédalage étant de 75 W, on peut prélever quelques watts pour l'éclairage sans créer une surcharge de travail excessive...

À condition que le rendement soit bon !

**Conventionnelles** : entraînement par friction sur la jante ou le flanc du pneu



3 à 4,5 W sous 6V efficaces (alternatifs),

Génératrice à aimant bas de gamme  
Pas cher, rendement médiocre 15 à 30%

De 15 à 25 W mécaniques supplémentaire !

Puissance maximale obtenue à partir de 15 km/h

**Rendement amélioré:**

Lightspin

Génératrice à aimants hautes performances  
Régulateur électronique à découpage  
Plus cher, excellent rendement > 90%  
Puissance maximale obtenue à partir de 7,5 km/h  
Accumulateur intégré : 45 mn d'autonomie.

**Entraînement direct**

Moyeu Dynamo SHIMANO  
6V 3W (50 €)



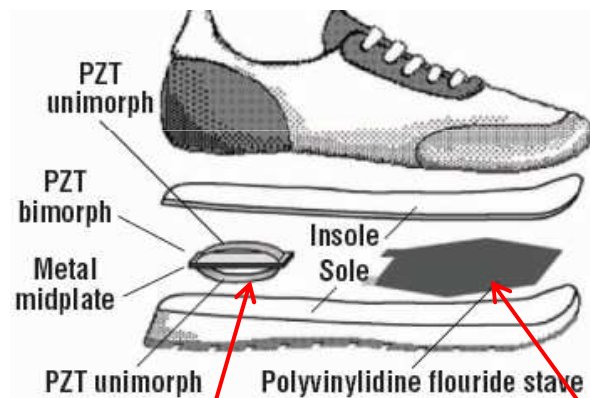
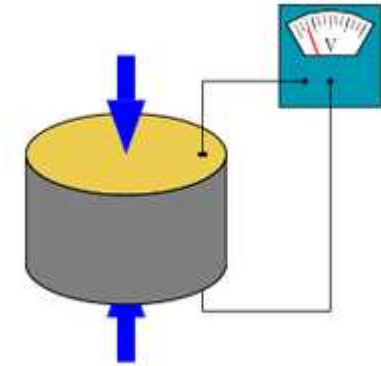
Moyeu NABEN DYNAMO 6V 3W.  
Haut rendement à faible vitesse (150 €)



Bien adapté aux efforts élevés

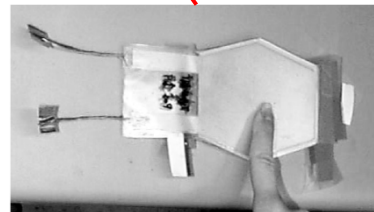
Matériau actuellement les mieux adaptés :

- céramiques, par ex. zircotitanate de plomb (PZT), déformations de l'ordre de 0,1 %, coût relativement faible
- polymères, par ex. polyvinylidène difluoré (PVDF), adaptés aux grandes déformations et aux hautes fréquences



Chaussures piezoélectrique avec convertisseur électronique, élément de stockage et émetteur radio 300MHz

Rendement global : **17%**



Talon:  $P_{\text{moy}} = 8.3\text{mW}$

Doigts de pied:  $P_{\text{moy}} = 1.3\text{mW}$

J.A.Paradiso, M.Feldmeier, 1999, [www.media.mit.edu](http://www.media.mit.edu)

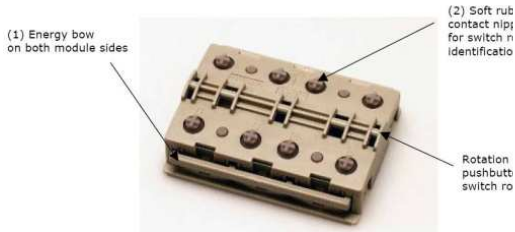
## Emetteur à bouton poussoir



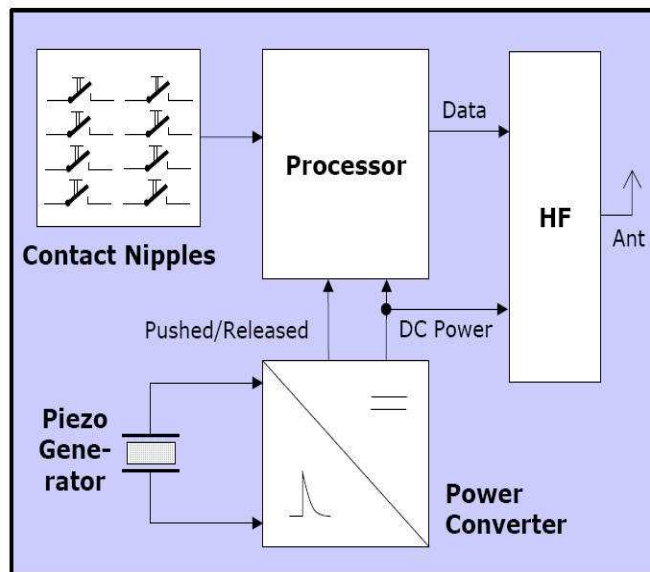
Impulsion de 15N  $\Rightarrow$  **1 mJ** pour V=3V  
 $\Rightarrow$  transmission à 15m

J.A.Paradiso, M.Feldmeier, 1999, [www.media.mit.edu](http://www.media.mit.edu)

## Télécommande sans pile (PTM100)



Impulsion de 8N  
 $\Rightarrow$  **100  $\mu$ J** pour V=3.3V

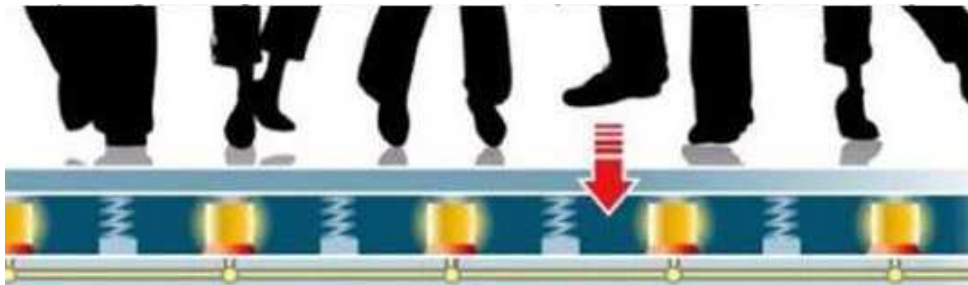


## Interrupteur sans fil (PTM100)

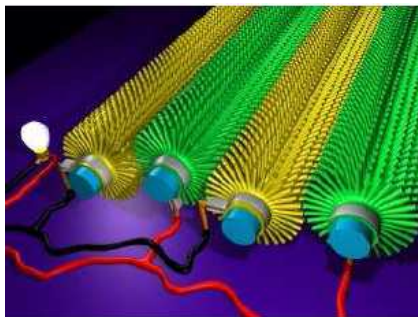
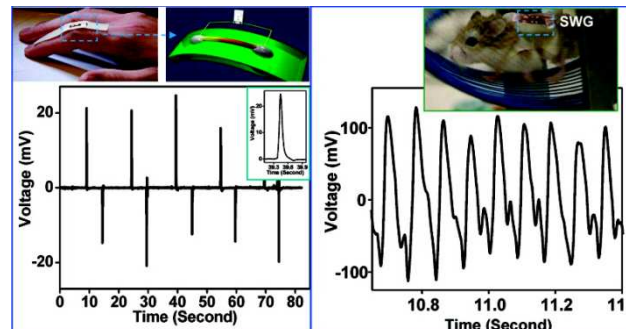


Pastille PZT, diamètre 5 mm  
 Épaisseur 15 mm

[www.enocean.com](http://www.enocean.com)

**Discothèque (Rotterdam et Londres):**Une personne  $\Rightarrow P=20\text{mW}$ **Sac à dos (Université de Technologie du Michigan):** $V_{\text{marche}}=3\text{-}4\text{km/h} \Rightarrow P=45\text{mW}$ **Nanofils d'oxyde de zinc (Université de Georgie):**

Diamètre et la longueur des fils: de 1/5000 à 1/25ème fois le diamètre d'un cheveu humain

 $P=8\mu\text{W}/\text{cm}^2$  $P < \text{nW}$ 

$\Rightarrow$  Difficile de récupérer une énergie impulsionnelle, haute tension, avec un bon rendement. Mais laboratoire LGEF: amélioration des rendements de 400%.

**Silicium amorphe 72 x 32 mm (2300 mm<sup>2</sup>)**

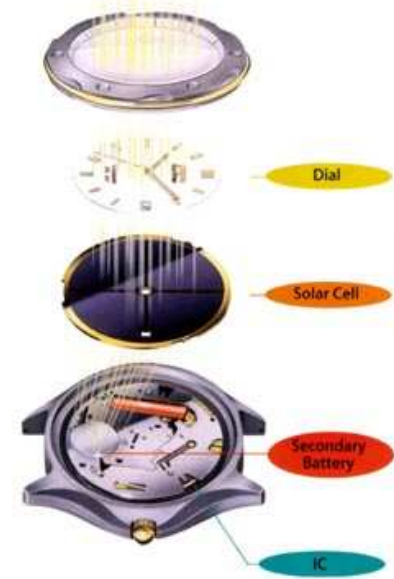
Eclaircement :	<b>200 lux</b>	<b>1000 lux</b>	<b>200 W/m<sup>2</sup></b>	<b>1000 W/m<sup>2</sup></b>
	28μA / 2V	140μA / 2.5V	3.7mA / 3.2V	14mA / 3.5V
Puissance :	56 μW	350 μW	12 mW	49 mW
Rendement :	<b>1,2 %</b>			<b>2 %</b>

**Calculatrice** (photo Solems)

Photopile de 3 à 4 cm<sup>2</sup>  
 Fonctionnement direct sans accu  
 qq μA sous 1.5V  
 Seuil d'éclaircement env. 50 lux

**Montres**

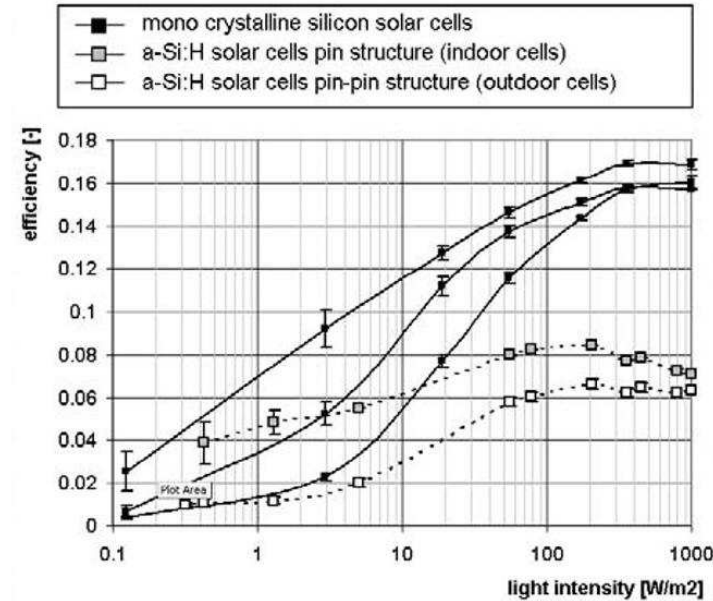
Accumulateur nécessaire  
 6 mois d'autonomie possible



A. LABOURET, « Cellules solaires quelle autonomie en énergie portable ? », JEEA, Cachan mars 2002

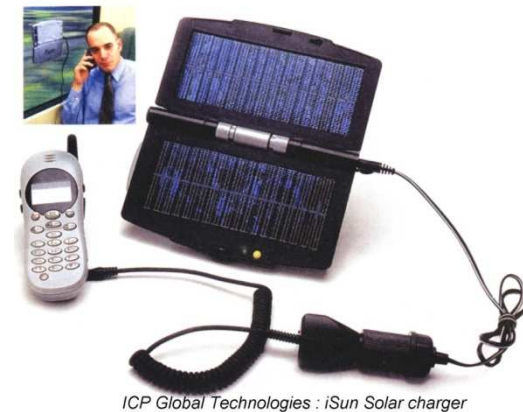
**Silicium cristallin** : meilleurs rendements (> 10%) donc moins encombrants ou plus puissants, mais plus cher

**Mais** rendements moins bon en faible éclairage



E. ALSEMA – Dresde2006

Applications portables :

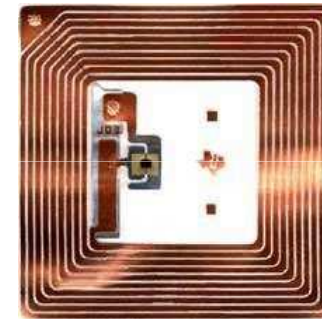
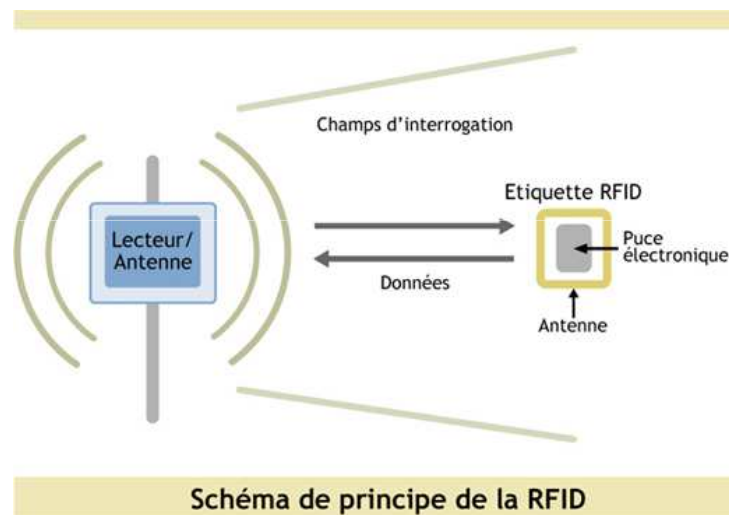


**Nécessité:** système de récupération d'énergie (antenne) ait une grande surface ou qu'il soit très proche de l'émetteur

Si champ électrique =  $1\text{V/m}$   $\Rightarrow$   $P=0,26\mu\text{W/cm}^2$

Si champ électrique =  $10\text{V/m}$   $\Rightarrow$   $P=26\mu\text{W/cm}^2$

**RFID:** récupération de données à distance

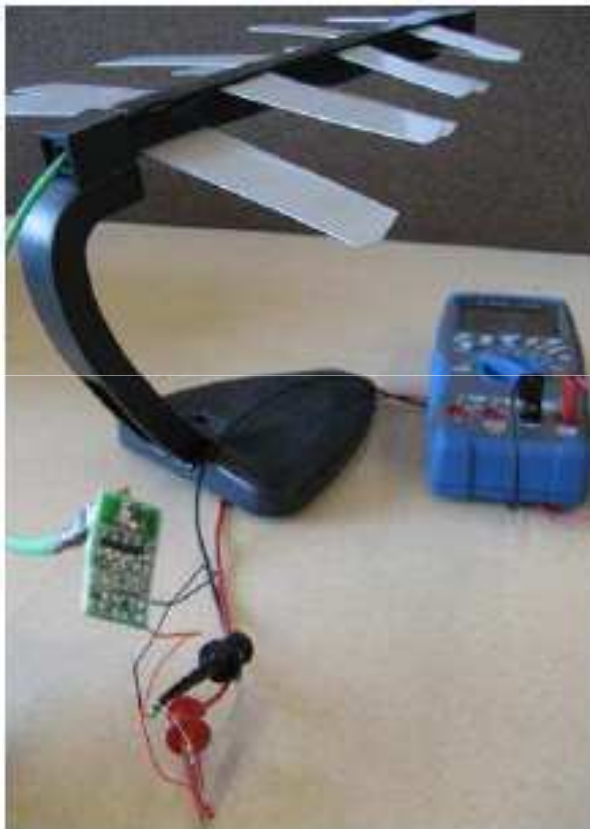


<http://www.treviso-consulting.com>

Quatre bandes de fréquences sont réservées à la RFID :

- BF : 125 kHz, 134,2 kHz  $\Rightarrow$  distance qq cm
- HF : 13,56 MHz
- UHF : 869 à 950 MHz
- SHF : 2,45 GHz  $\Rightarrow$  distance qq m

**Application:** récupération des ondes TV (Intel Seattle) pour alimenter un capteur de température avec affichage LCD



- Système de récupération à **4.1km** de l'antenne d'émission
- Puissance de l'antenne d'émission: **960kW** à 674-680MHz

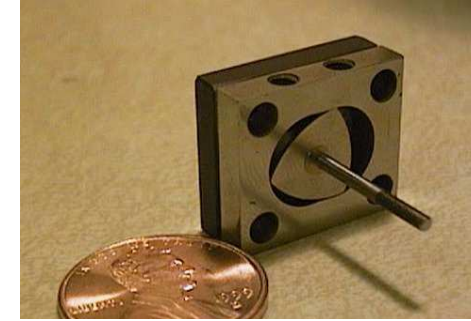
⇒ Puissance récupérée : **P=60μW**

**Micro-moteurs thermiques:** (combustion externe : Stirling ou interne : explosion)

Moteur Wankel de Berkeley

Diamètre de 3mm

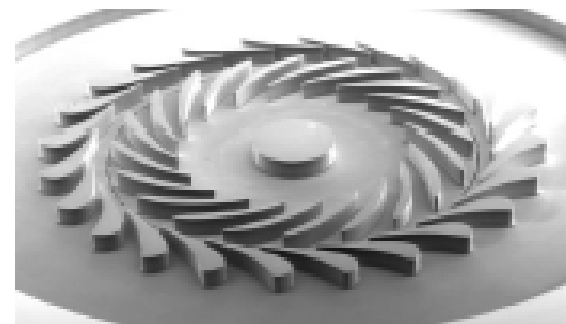
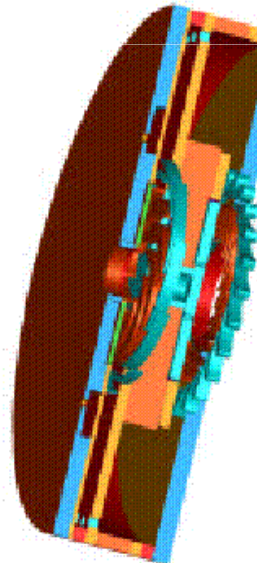
**P=4W** à 10000trs/min



Microturbine MIT

Diamètre de 20mm

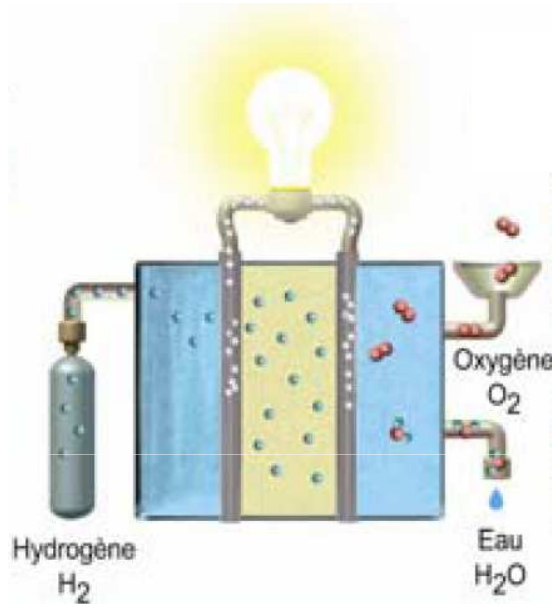
**P=20W** à  $2 \cdot 10^6$ trs/min



*J.DELAMARE, O.CUGAT, « Micro sources d'énergie thermo-mécaniques », JEEA, Cachan mars 2002*



**Piles à combustibles:** réaction chimique d'oxydo-réduction



Deux filières, différentes par le combustible utilisé à l'anode:

- Les piles PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) :

**Hydrogène** + oxygène  $\longrightarrow$  électricité (+ eau + chaleur)

- Les piles DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) :

**Méthanol** + oxygène  $\longrightarrow$  électricité (+eau+ CO<sub>2</sub> + chaleur)

Possibilités de bon rendement électrique : plus de 50%

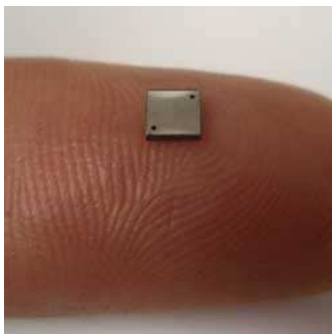
Compromis rendement – énergie massique

**Mini-piles à combustibles:**Chargeur Mobion (MTI MicroFuel Cells)

Technologie DMFC,  $P=62\text{mW}/\text{cm}^2$ ,  $E=1.8\text{kWh}/\text{kg}$   
 $\Rightarrow$  Permet de recharger 10 fois son téléphone

Pile pour hélicoptère de 20cm (Allemagne)

Technologie PEMFC  
 $P=12\text{ W}$  pour  $m=30\text{ g}$  soit  $400\text{W}/\text{kg}$

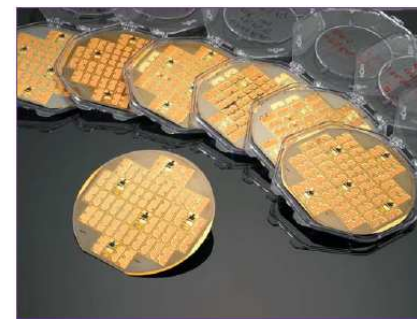
Université de l'Illinois: filière méthanol

Taille:  $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 1\text{mm}$   
 $V=0.7\text{V}$ ,  $I=0.1\text{mA}$  pendant 30h

$\Rightarrow P=8\text{mW}/\text{cm}^3$

**Micro-piles à combustibles:**

CEA: filière hydrogène, technologie des couches minces



$P=150\text{-}400\text{mW}/\text{cm}^2$

Objectif:  $1\text{W}/\text{cm}^2$

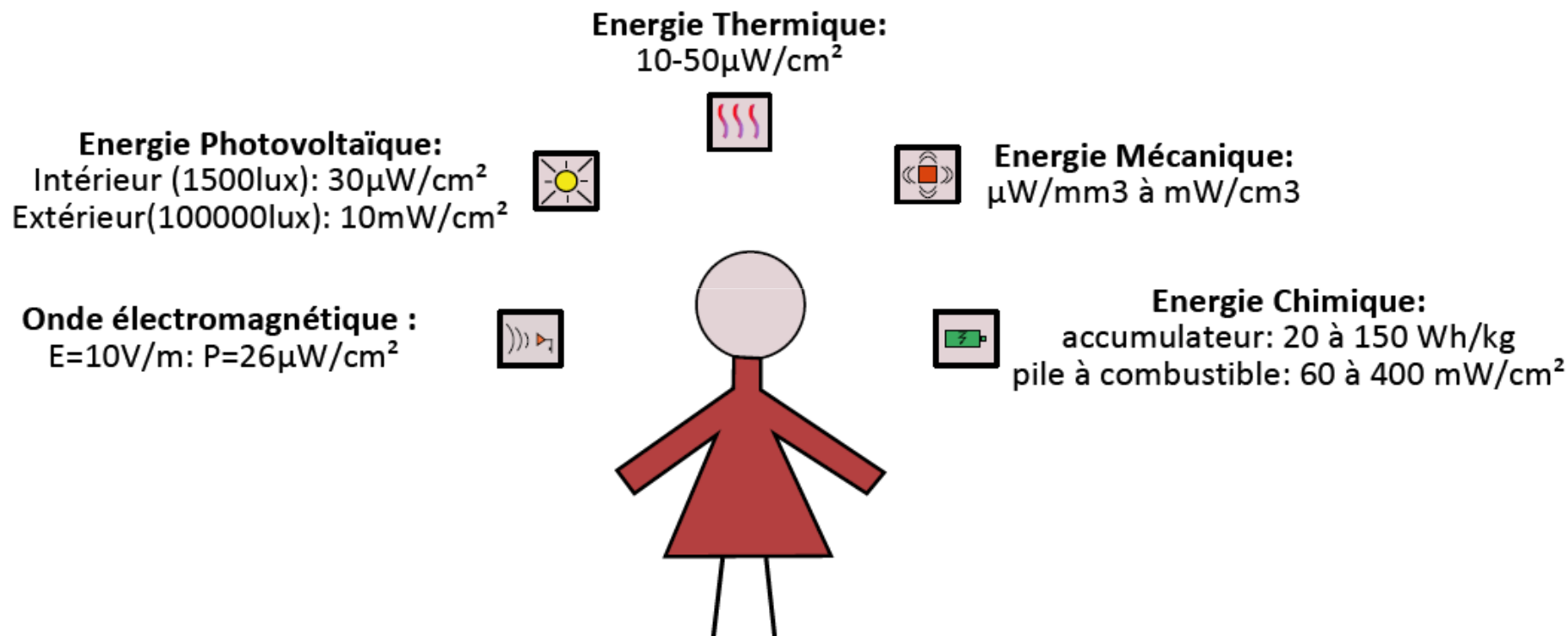
### Généralement indispensable

- si une continuité de la fourniture d'énergie est requise et que la source est fluctuante
- pour assister la source d'énergie (si pic de consommation...)

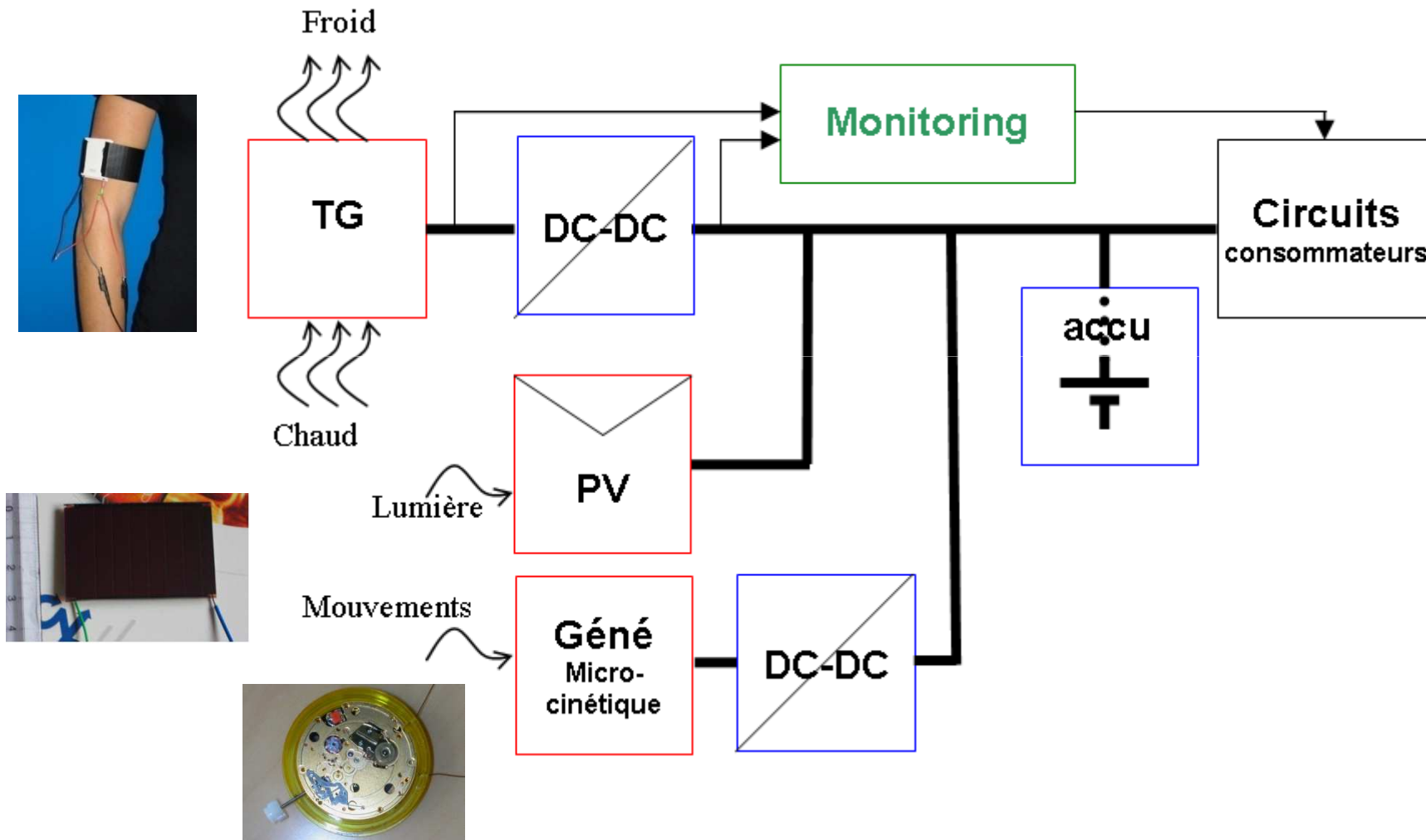
En fait, le stockage permet les découplages: - **production - consommation**  
- **énergie - puissance**

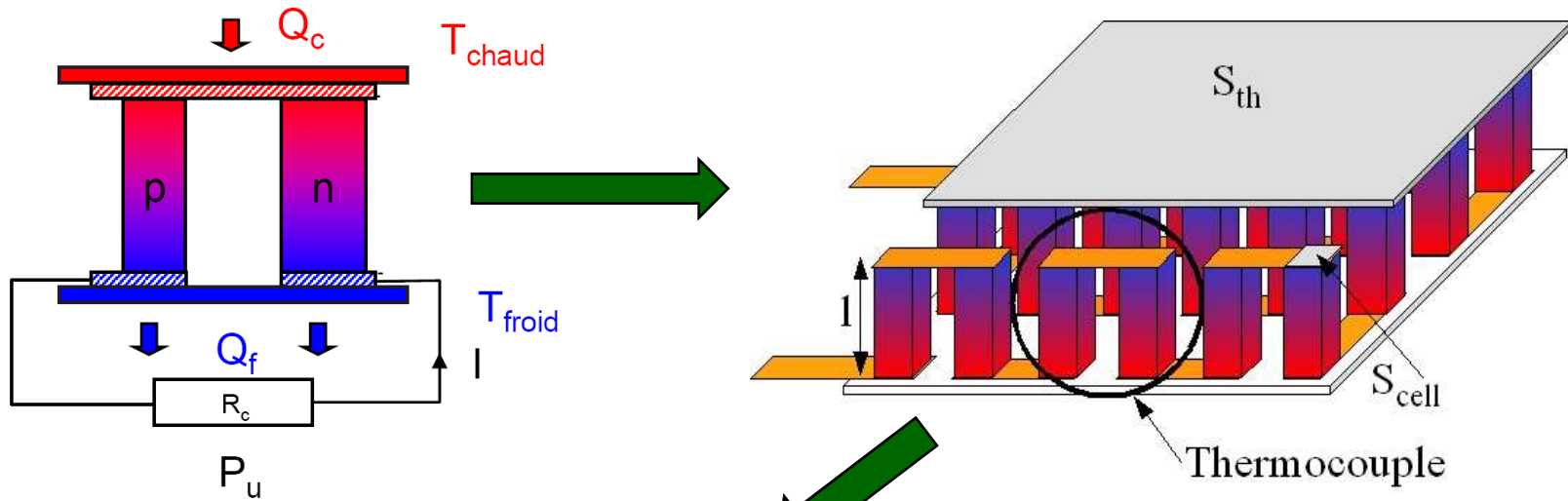
### Comparaison :

- super-condensateurs : qq Wh/kg
- accumulateurs électrochimiques : 60 -> 150 Wh/kg (NiMH -> lithium polymère)
- volants d'inertie (rasoirs) Wh/kg
- ressort mécanique : 0,2 Wh/kg
- graisses : 10 kWh/kg, avec 22% de rendement métabolique :  $2,2 \text{ kWh}_{\text{méca}}/\text{kg}$
- carburants liquides : environ 10 kWh/kg (masse du réservoir négligeable)
- hydrogène : hors réservoir 30 kWh/kg, avec réservoir < 3 kWh/kg



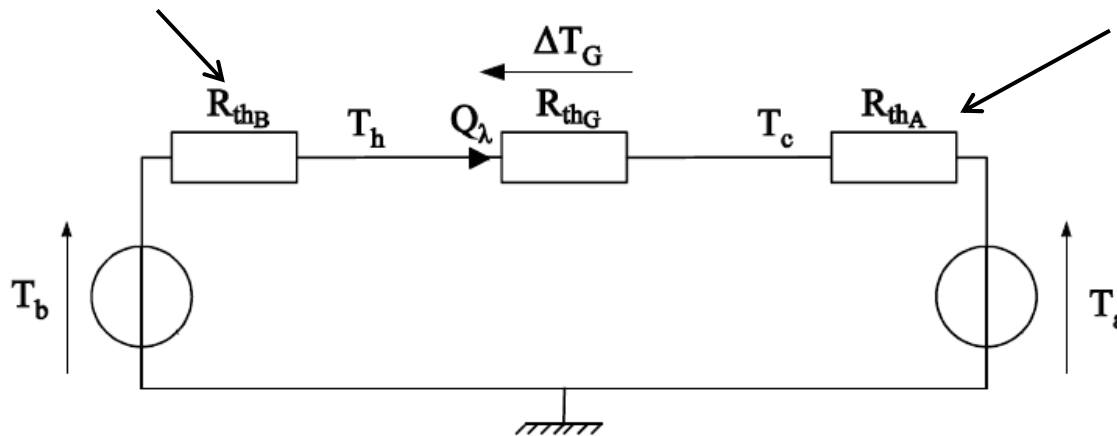
**Architecture du système de génération multisources:** (Travaux CNRS Satie ENS Cachan, équipe CAIRN Lannion)





**Modélisation thermique:** simplifiée aux faibles  $\Delta T$  (pas de couplages thermoélectriques)

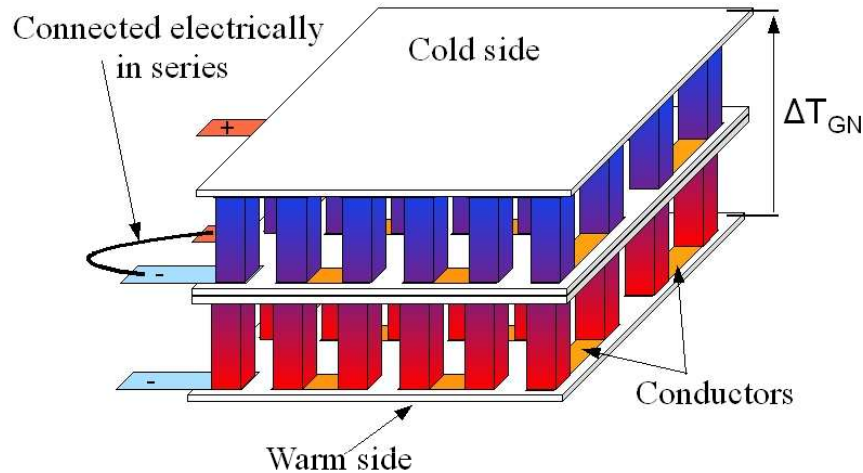
Effet de conduction



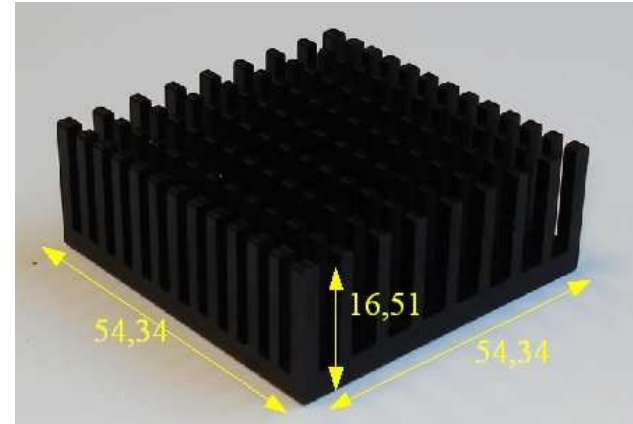
Effet de convection et rayonnement

$$\Delta T_G = R_{thG} \frac{T_b - T_a}{R_{thG} + R_{thB} + R_{thA}}$$

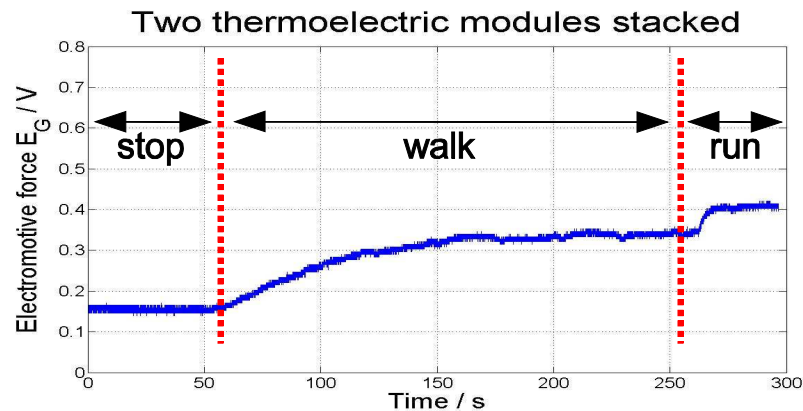
**Empilement de modules :  $R_{thG} \uparrow$**



**Ajout d'un dissipateur:  $R_{thA} \downarrow$**

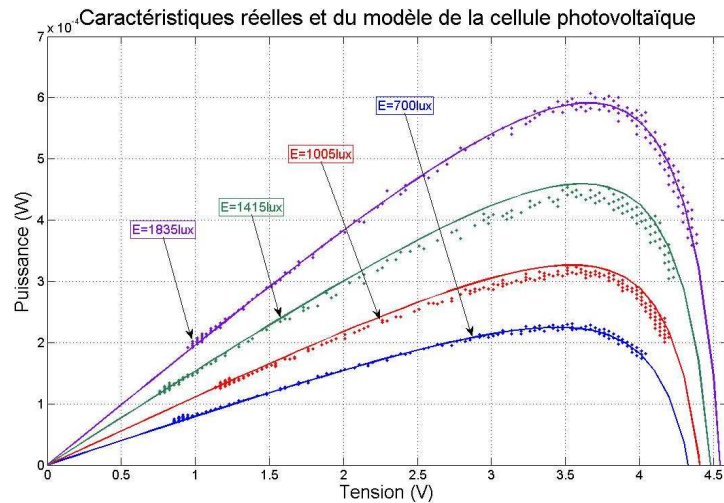
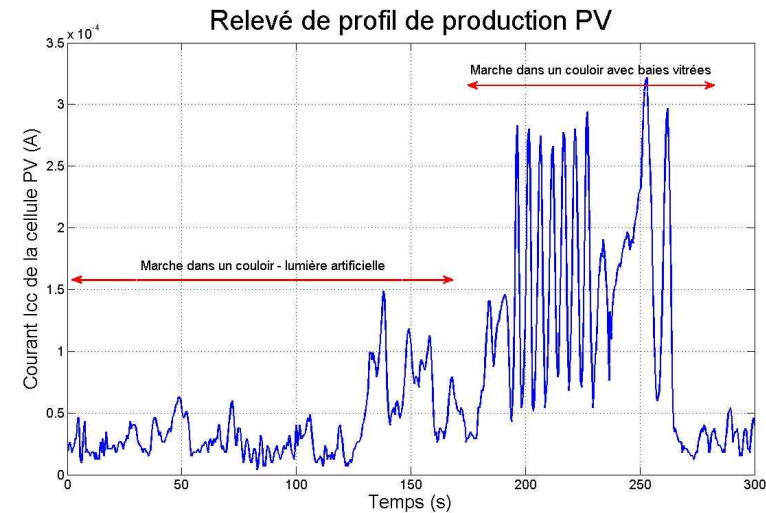
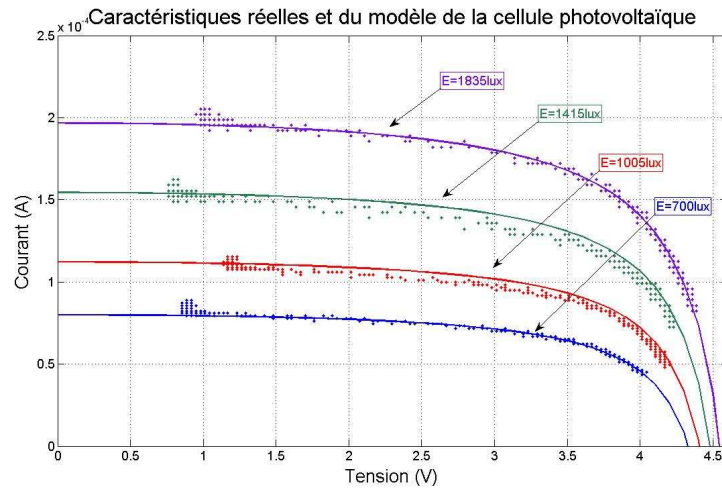


**Personne en mouvement:  $R_{thA} \downarrow$**



$E_G = 340\text{mV} \Rightarrow P_{eM} = 720\mu\text{W}$   
 soit  $24 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$

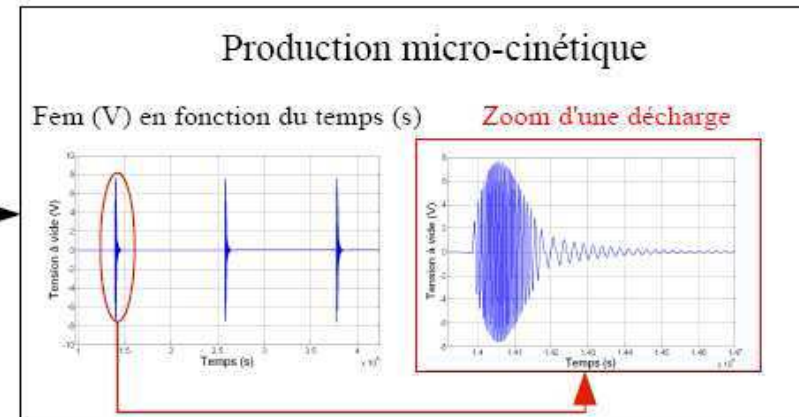
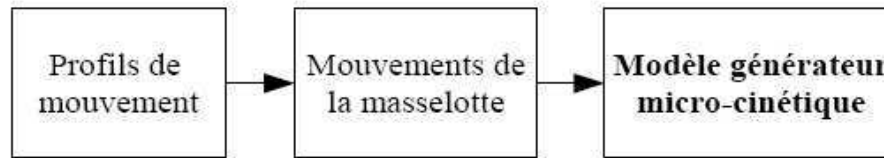
## Modèle d'une cellule photovoltaïque (aSi SOLEMS) pour des éclairagements en intérieur et variables



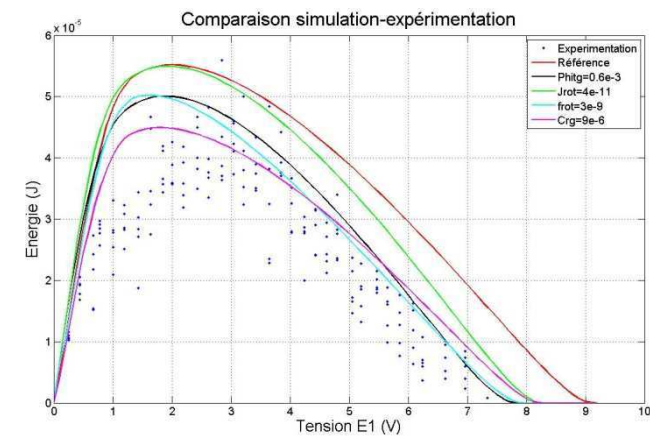
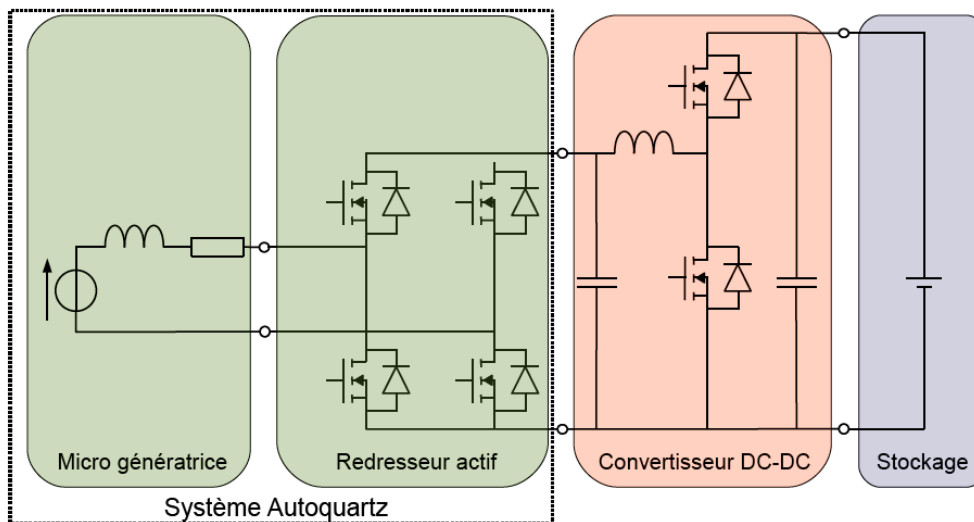
- éclairage de 1500lux  
 $\Rightarrow P_{pv} = 500 \mu W$  soit  $32 \mu W \cdot cm^{-2}$
- éclairage de 3600lux  
 $\Rightarrow P_{pv} = 1 mW$  soit  $65 \mu W \cdot cm^{-2}$



## Modèle électromécanique:



## Optimisation du transfert d'énergie:



Nombreuses ressources dans l'environnement humain limitées mais suffisantes pour de nombreuses applications et généralement renouvelables !

Nombreuses solutions de conversion existantes mais le « marché » n'a pas encore opéré sa sélection...

Recherches à faire pour développer des générateurs plus efficaces et mieux intégrés

Nécessité absolue de minimiser encore plus la consommation des appareils portatifs

Nécessité de faire de la gestion active et intelligente de l'énergie

**Merci pour votre attention**