

# Produire de l'énergie pour les appareils électroniques portables grâce aux ressources disponibles dans l'environnement humain

**Bernard MULTON, Sylvie TURRI, Marie RUELLAN**

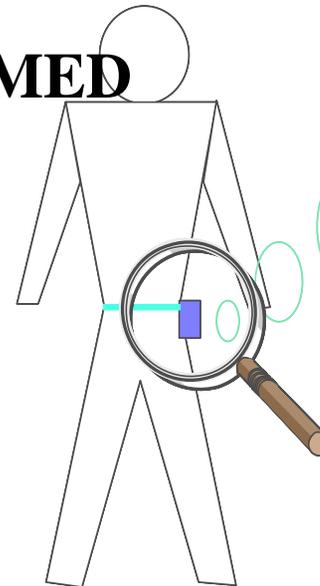
**Dominique MILLER, Hamid BEN AHMED**

*Ecole Normale Supérieure de Cachan*

*Antenne de Bretagne*

**SATIE UMR CNRS 8029**

<http://www.satie.ens-cachan.fr>



## Des besoins et des ressources

### Systèmes électriques ou électroniques portables

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



*Abioco, cœur artificiel*



### 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

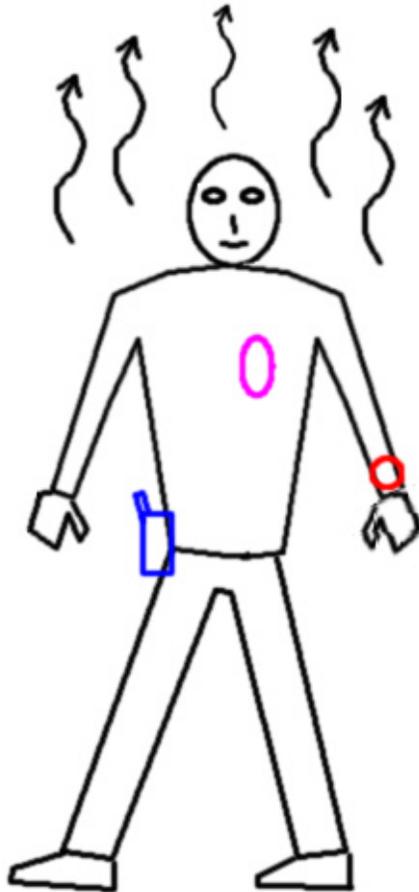
## Plan

- Ressources du corps humain
- Autres ressources
- Principes de conversion en énergie électrique et applications
  - thermo-électrique
  - électromagnétique
  - piézoélectrique
  - photovoltaïque
  - à partir de combustibles...
- Analyse détaillée de la conversion d'énergie dans un dispositif à manivelle, à ressort et à conversion électromagnétique.
- Conception d'un générateur électromécanique fonctionnant à partir de la marche

## « Ressources » énergétiques humaines

Chaleur métabolique :

**80 W** au repos à **plus d'1 kW** en activité intense



**Un cycliste entraîné peut atteindre  
350 W mécanique** en crête

Mais faible rendement de conversion mécanique :  
pour 200 W mécaniques,  
plus de 800 W de chaleur et de la fatigue...

## Conversion d'énergie chimique - mécanique

Le vecteur d'énergie intracellulaire est l'ATP (adénosine triphosphate)

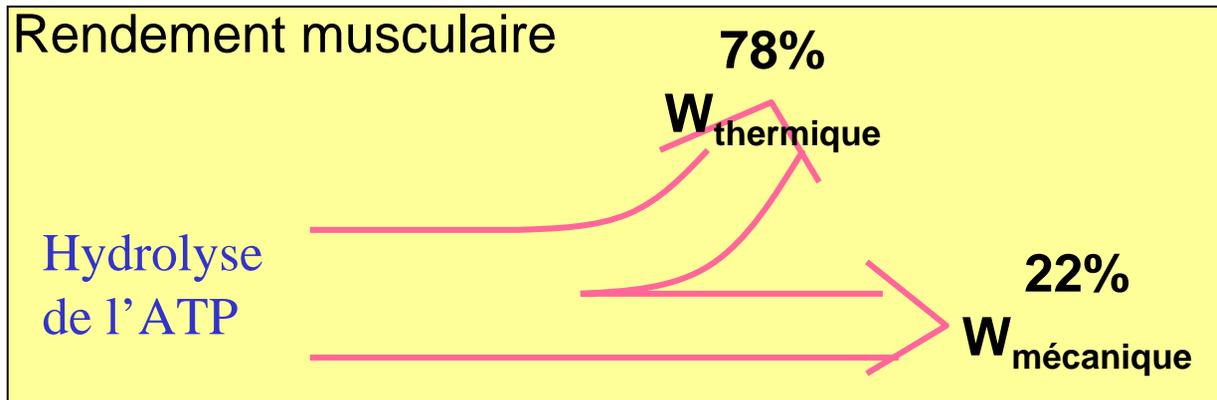
Production d'ATP à partir de « substrats métaboliques » :

créatine phosphate, glucides, lipides, protéines

Conversion glucose  $\rightarrow$  ATP



Hydrolyse de l'ATP = contraction des muscles = conversion chimique – mécanique



La dégradation du glucose consomme :

**1 litre d'O<sub>2</sub> pour 5,05 kcal (21 kJ ou 5,8 Wh)**

Graisses, lipides (triglycérides) :

1 litre d'O<sub>2</sub> pour 4,7 kcal

Moyenne des substrats énergétiques : **1 litre d'O<sub>2</sub> pour 4,8 kcal ou 20 kJ**

# Conversion d'énergie chimique - mécanique

Cas de la conversion glucide -> ATP

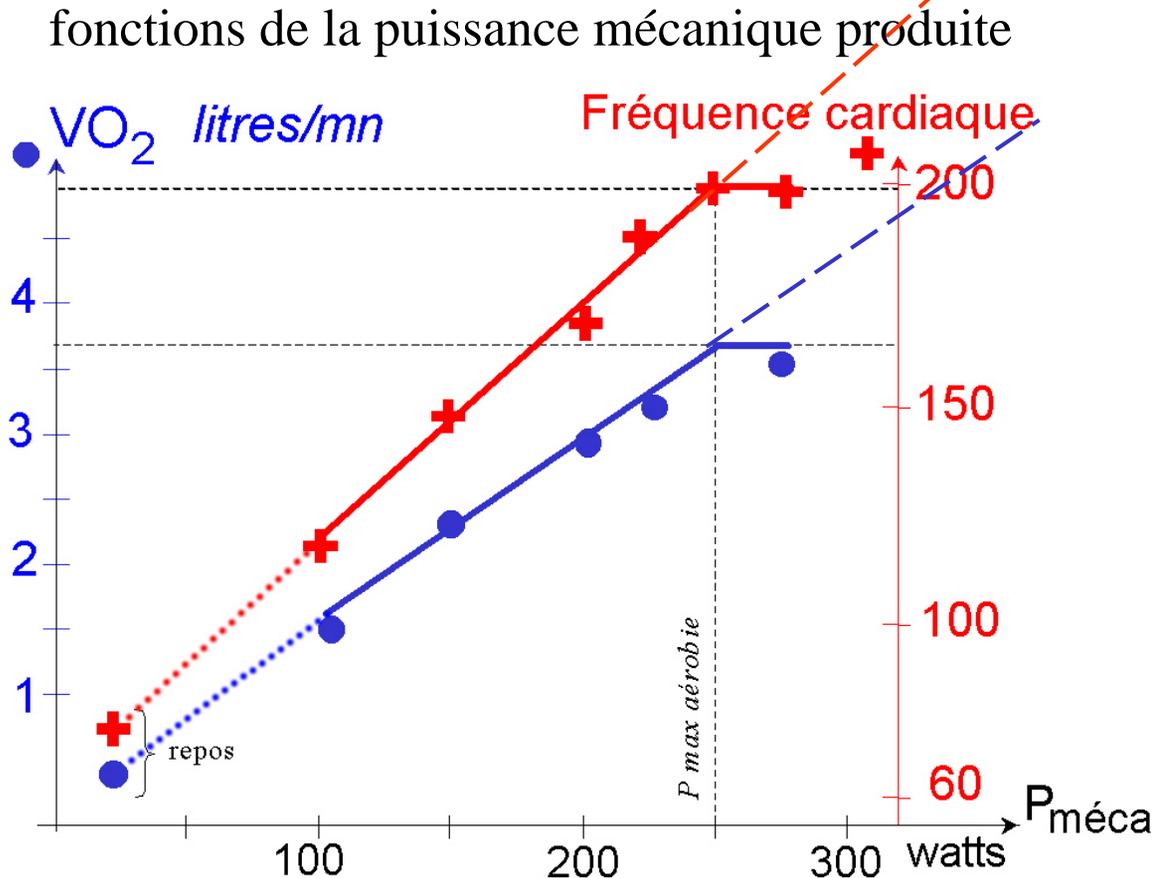
Relations

Consommation d'oxygène ( $VO_2$ )

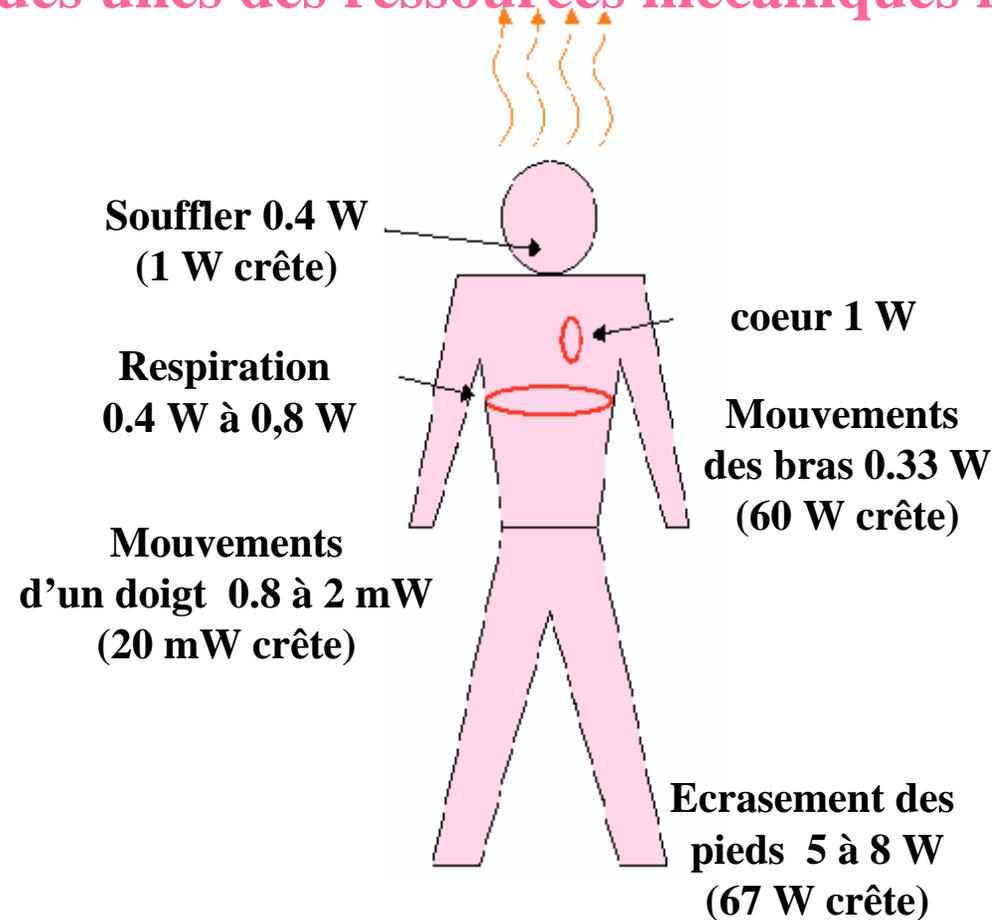
Fréquence cardiaque

Accroissement de  
1 litre  $O_2$ /min  
 $\cong$  20 kJ/mn soit 330 watts  
et, avec 22% de rendement,  
70 watts mécaniques

Un moyen de mesurer la puissance...



## Evaluation de quelques unes des ressources mécaniques humaines



Travail du cœur :  
1 J/battement,  
à 1 pulsation/s  
=> 1 watt mécanique

*Human-Powered Wearable Computing - Starner 1996*

## Puissance mécanique lors d'exercices physiques

Vélo :

en promenade :  $P_{\text{méca}} = 75 \text{ W}$   Puissance  
en crête (côte) :  $P_{\text{méca\_Max}} = 350 \text{ W}$  « facilement »  
convertible



15 mn de pédalage  
= 1 heure de lumière (11 W)

Natation :

en moyenne  $P_{\text{cal}} = 580 \text{ W}$ ,  $P_{\text{méca}} = 110 \text{ W}$

Marathon :

en moyenne  $P_{\text{cal}} = 1100 \text{ W}$ ,  $P_{\text{méca}} = 220 \text{ W}$

## 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 dissipe 120 W/m<sup>2</sup> ou **12mW/cm<sup>2</sup>**

Les vêtements limitent la puissance dissipée

en augmentant la température « ambiante »

Une partie de la chaleur du corps est échangée par la respiration

et par transpiration (évaporation)

## Autres ressources énergétiques

### - Rayonnements électromagnétiques

Lumière visible :

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

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

10 000 lux sous lampe

Activités « humaines » :

ondes herziennes (radio, TV, téléphones...)

limites d'exposition (avec un coeff de sécurité de 4) :

**1 W/m<sup>2</sup>** à 900 MHz (20 V/m) et **2,2 W/m<sup>2</sup>** à 1,8 GHz (30 V/m)

champs basses fréquences (à proximité des systèmes 50 Hz)

### - Vibrations mécaniques ambiantes (bruit)

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

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

## Energie embarquée

### - Carburants « embarqués » (renouvelables ou non)

Avantage : densité d'énergie élevée,

environ **10 Wh/gramme**, hors réservoir

carburants liquides : facilité de conditionnement/stockage

### - Air comprimé « embarqué »

Sous 200 bars, avec réservoir composite < 10 Wh/kg

### - Electricité « embarquée »

Accumulateurs électrochimiques 20 à 150 Wh/kg

Supercondensateurs 5 à 10 Wh/kg

# **PRINCIPES, MOYENS ET APPLICATIONS de transformation des ressources primaires :**

- chaleur et mouvements du corps humain**
- ressources ambiantes**
- carburants embarqués**

## Récupération de la chaleur métabolique

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

- machines thermodynamiques :  
rendement très faible pour de faibles écarts de température

- effet thermo-électrique (effet Seebeck) thermocouple

$$U = \alpha \cdot \Delta T \quad \text{par ex. } \alpha = 200 \mu\text{V/K}$$

rendement également faible mais très peu encombrant,  
sans mouvement (silencieux, fiable...)

**Rendement maximal :**

( $\lambda$  conductibilité thermique,  $\rho$  résistivité électrique,  $\alpha$  coef. Thermoélectrique)

$$\eta_{\text{Max}} = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \lambda} \frac{\Delta T}{2}$$

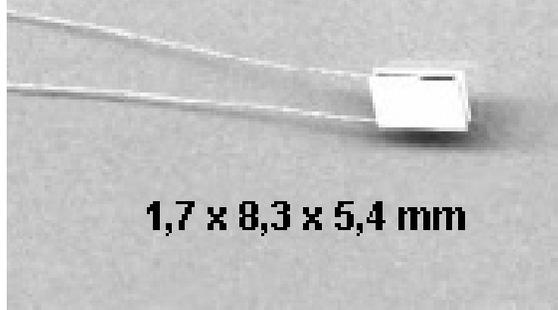
$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \lambda} \quad \text{Ex. : } Z = 3,3 \text{ mK}^{-1} \text{ (Tellure de bismuth)}$$

Avec  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  :  $\eta_{\text{Max}} = 2,5\%$ , pour  $1 \text{ cm}^2$  de peau :  $30 \mu\text{W}$  maxi

## Exemples de transducteur thermoélectrique

EnOcean GmbH, 2002.

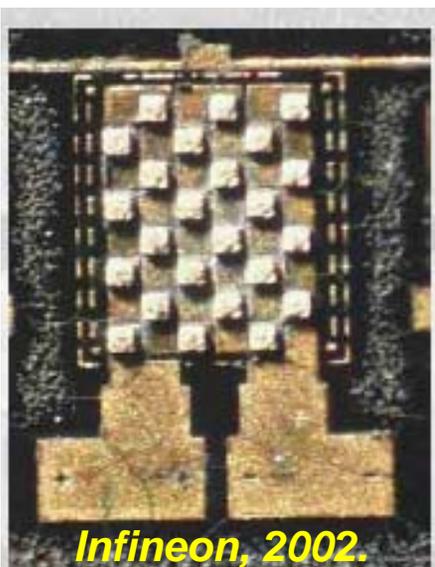
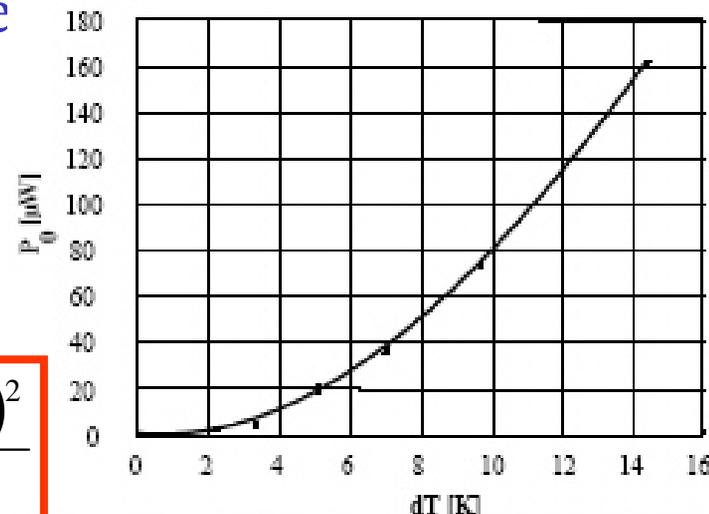
[www.enocean.com](http://www.enocean.com)



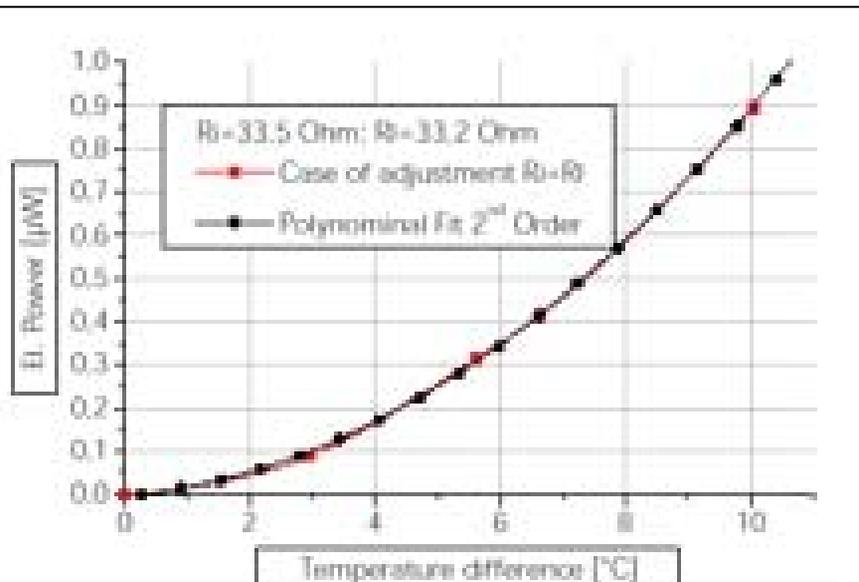
1,7 x 8,3 x 5,4 mm

$$P = \frac{(\alpha \cdot \Delta T)^2}{R_L \cdot \left(1 + \frac{R_i}{R_L}\right)}$$

$$P_{\text{Max}} (R_L = R_i) = \frac{(\alpha \cdot \Delta T)^2}{2 \cdot R_i}$$



Infineon, 2002.

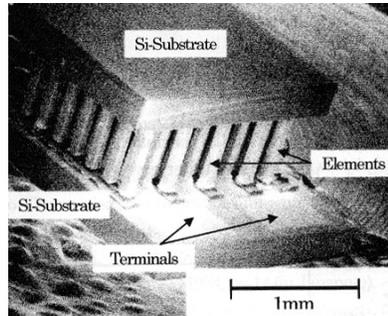


## Application : montres (consommation qq $\mu\text{W}$ et $\Delta T$ qq $^{\circ}\text{C}$ )

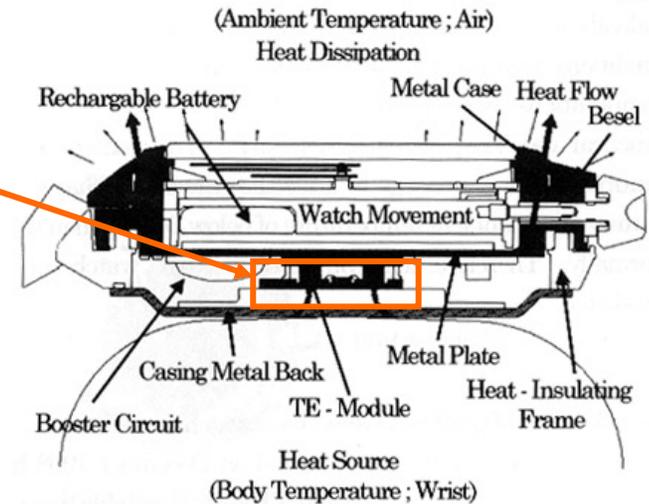


**Seiko THERMIC  
1998**

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



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



**Citizen CTY66-0341  
2001**

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

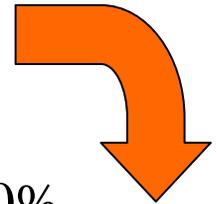
*J. Stockholm, « Génération Thermoélectrique »,  
JEEA Cachan mars 2002.*

# Récupération d'énergie du corps, principes de conversion pour obtenir de l'électricité

## Energie mécanique

Facile à convertir en électricité, bons rendements possibles :

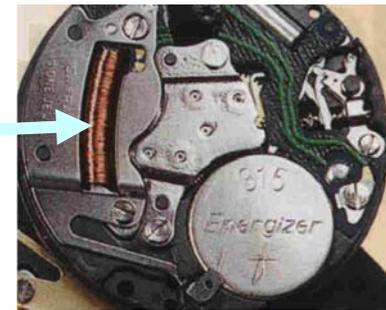
- **générateurs électromagnétiques à aimants**
- géné piézoélectriques...



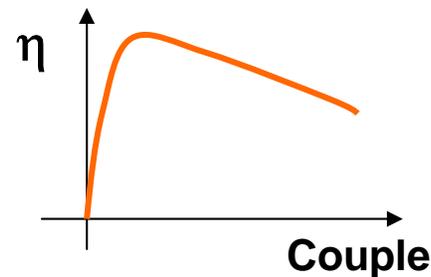
En grandes puissances : les rendements tendent vers 100%

En petites puissances, ils diminuent...

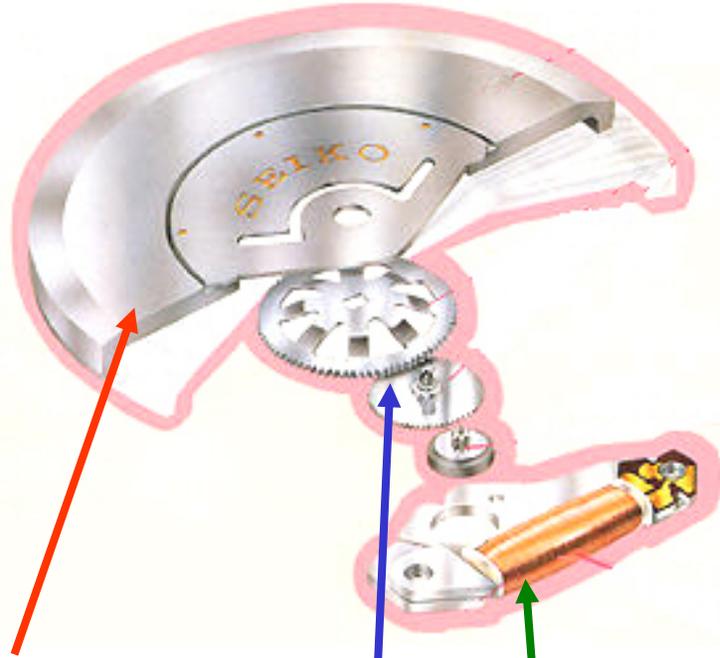
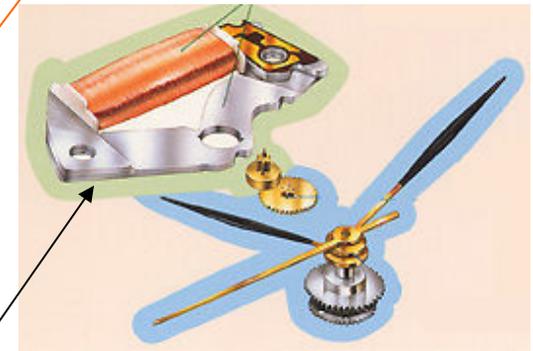
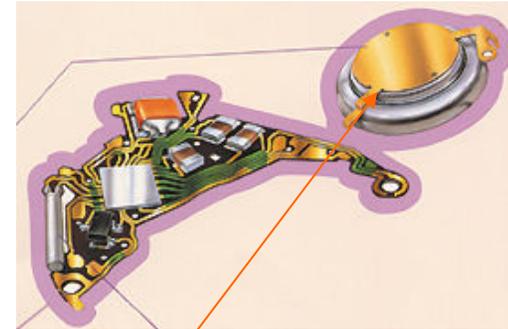
Moteur de montre :  $100 \mu\text{W}$   $\eta < 10\%$



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



**Exemple** : montre automatique électrique  
Seiko KINETIC

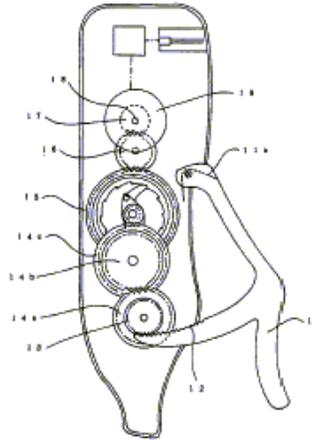


Une **masselotte** (principe des montres « automatiques ») entraîne, à travers un **multiplicateur de vitesse à engrenages**, un **générateur électromagnétique à aimants** à très haute vitesse (qq 100 000 tr/mn). L'énergie est stockée dans un **accumulateur**, puis restituée à l'électronique de comptage et au moteur qui entraîne les aiguilles

## Chargeurs divers



PATENTED



### Chargeur à main « Alladin Power » (Nissho)

1,6 W pour 90 cycles par minute

POLISHED ALUMINIUM ALLOY

NON-SLIP RUBBER GRIP

CONSTANT VOLTAGE CIRCUIT  
WHICH WILL SUPPRESS LOSS  
OF CHARGE



POWER INDICATOR

BUILT IN  
HIGH-POWER GENERATOR

DC JACK (OUTPUT)

PEDAL LOCK

### Chargeur à pied « Stepcharger » (Nissho)

jusqu'à 6 W

### Chargeur à pédale (Windstream Power)

Chargeur de batterie 12 V

50 W avec les mains

125 W avec les pieds

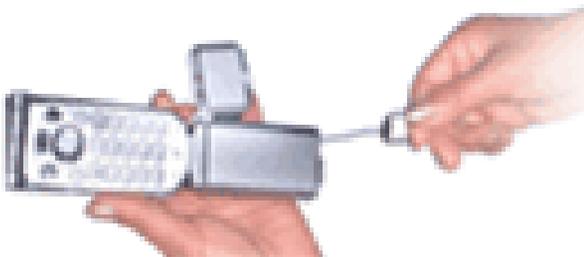
550 \$



Chargeurs de téléphone : en veille : qq 10 mW,  
en appel : qq W

### Chargeur à main enrouleur Nissho Engineering

3 W pour 60 cycles par minute



### Chargeur à manivelle Freepaly

45 secondes de remontage  
donnent 3 à 6 min d'appel

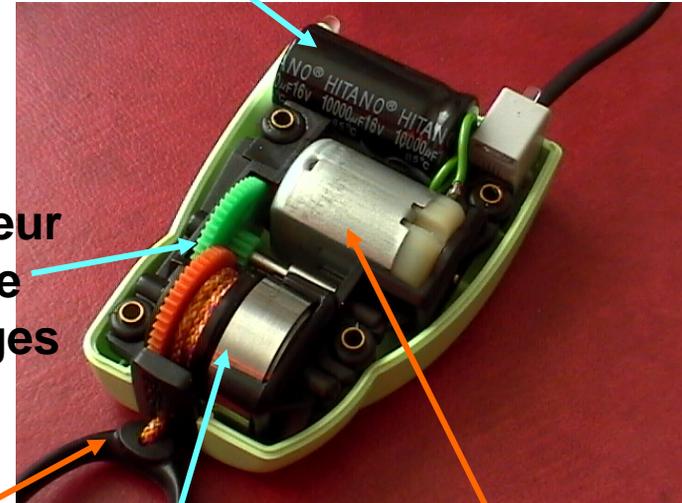
## Chargeur Souris Verte (+ lampe de poche)

<http://www.lsvproduction.com/>

À tirette et ressort de rappel  
1,5 watts, 110 grammes



## Condensateur de stockage

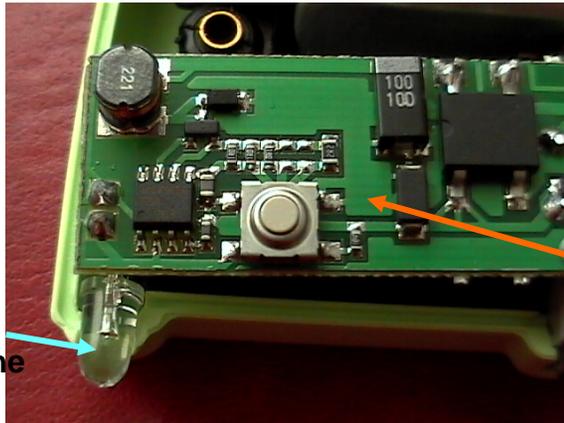


multiplicateur  
de vitesse  
à engrenages

Tirette

Ressort de rappel

Génératrice  
à aimants



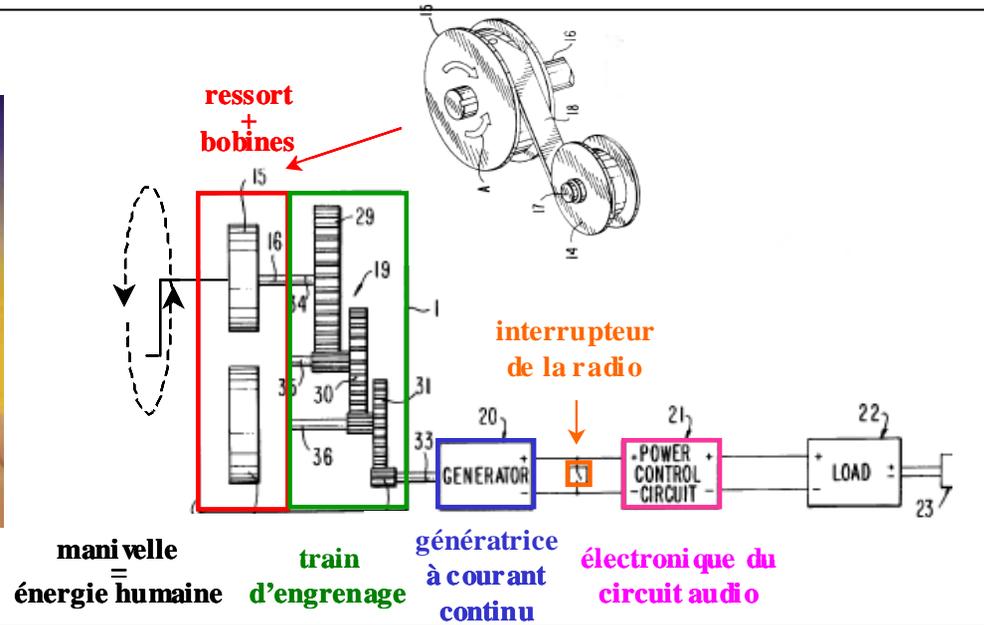
Circuit électronique  
(puissance et contrôle)

LED  
blanche

# Lampes rechargeables

## Freepaly

Stockage à ressort



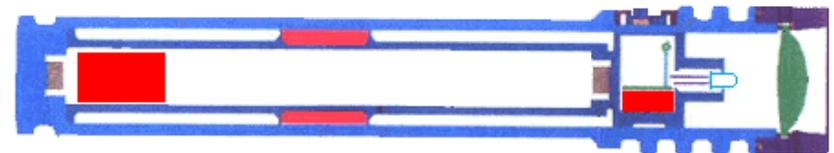
## Nightstar flashlight

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.



## Autres dispositifs

### Poste de radio Freepaly

Tri-sources, rechargeable par :

- Manivelle (Stockage à ressort)
- Module photovoltaïque
- chargeur secteur

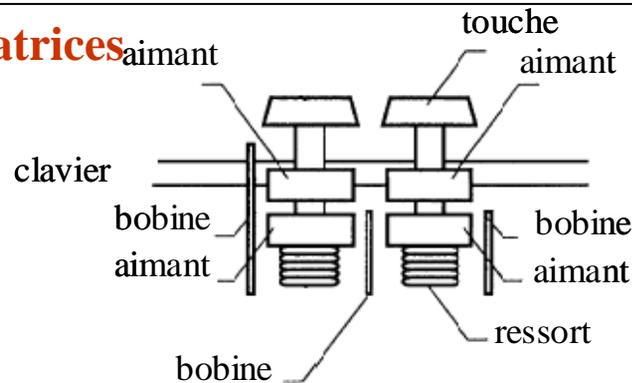


Voir résultats de l'étude détaillée plus loin.

### Clavier à touches génératrices

Compaq 1999

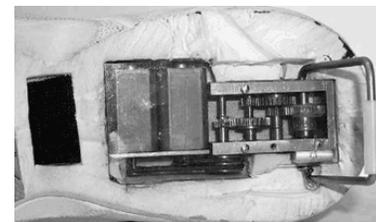
Brevet N° US 5911529



Générateurs piézoélectriques  
probablement mieux adaptés  
à ces applications.

### Chaussures génératrices

MIT media lab.



## 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.**



## Dynamos à entraînement direct dans le moyeu



**Moyeu Dynamo SHIMANO 6V 3W (50 €)**



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

## Pédales éclairantes



**Bizmate, masse + 20 g,**

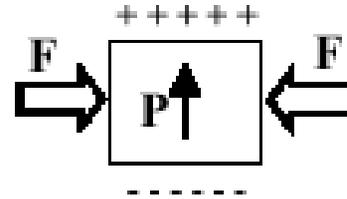
La solution idéale dans tous ces générateurs :  
une génératrice à aimants, sans balais et une électronique de puissance et de contrôle

## Energie mécanique (suite)

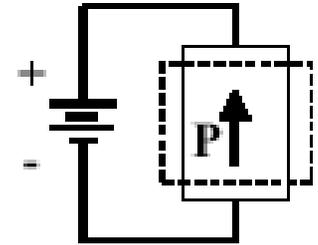
### - effet piézoélectrique

bien adapté aux efforts élevés

#### Effet Direct

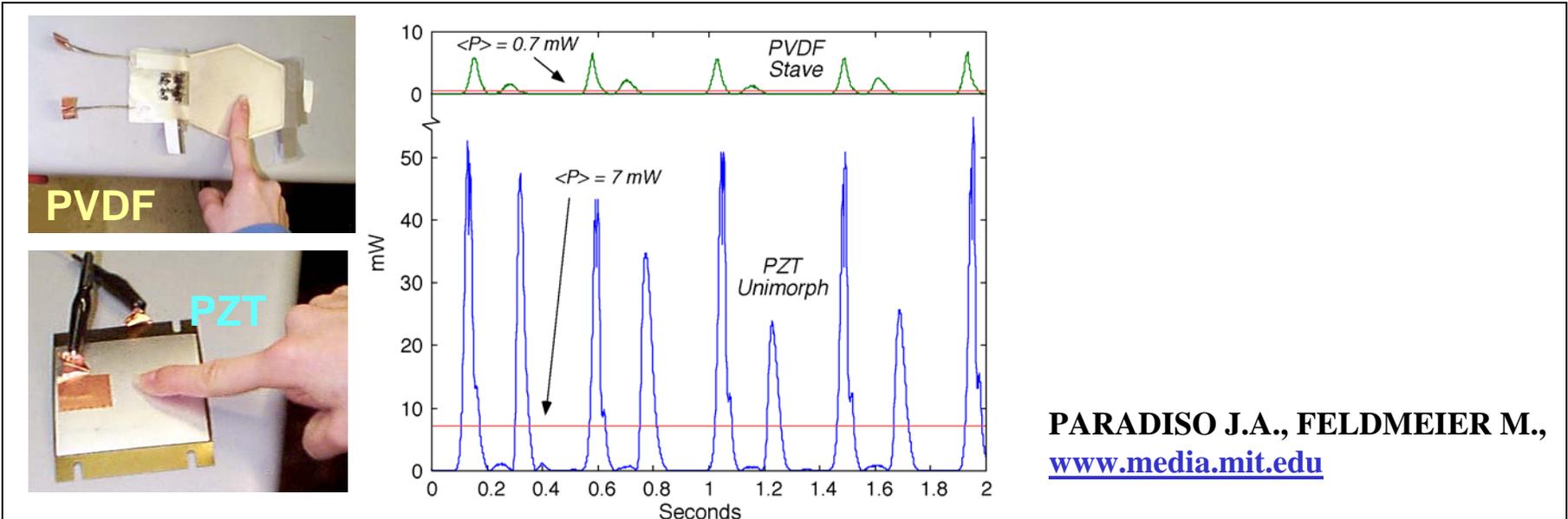


#### Effet Inverse



Matériau actuellement les mieux adaptés :

- céramiques, par ex. zircotitanate de plomb (**PZT**) déformations de l'ordre de 0,1 %
- polymères, moins rigides, par ex. polyvinylidène difluoré (**PVDF**)

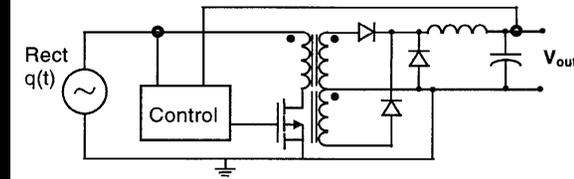
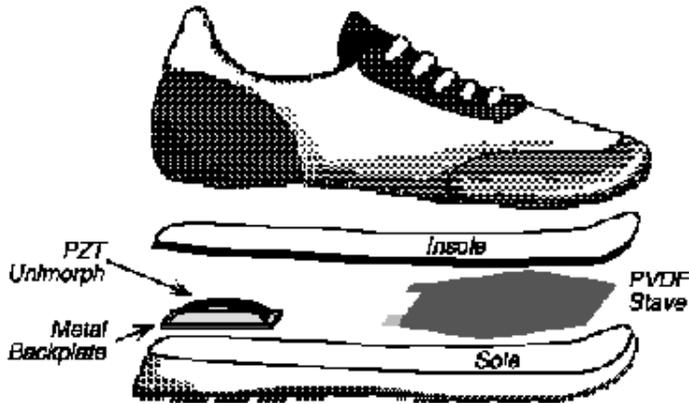


PARADISO J.A., FELDMER M.,  
[www.media.mit.edu](http://www.media.mit.edu)

**Exemples (MIT) :**

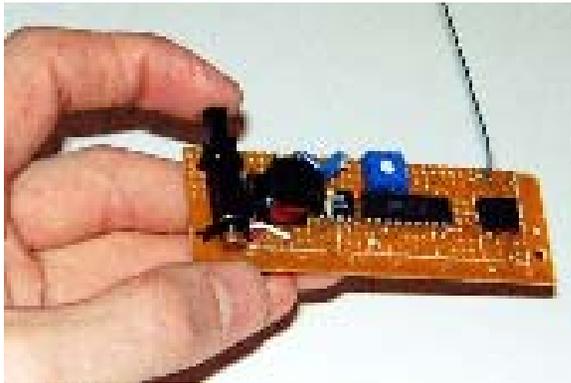
PARADISO J.A., FELDMEIER M., [www.media.mit.edu](http://www.media.mit.edu)

**chaussures génératrices**



Convertisseur électronique  
Rendement global : 17%,

**émetteur à pouton poussoir**



Rendement : 7%,  
pour 2 mJ générés à chaque pression.  
En sortie du  
convertisseur électronique,  
il reste 0,5 mJ sous 3 V

Encore difficile de  
récupérer une énergie  
impulsionnelle,  
haute tension,  
avec un bon rendement

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

## Interrupteurs autonomes sans fils

Pastille PZT diam. 5 mm

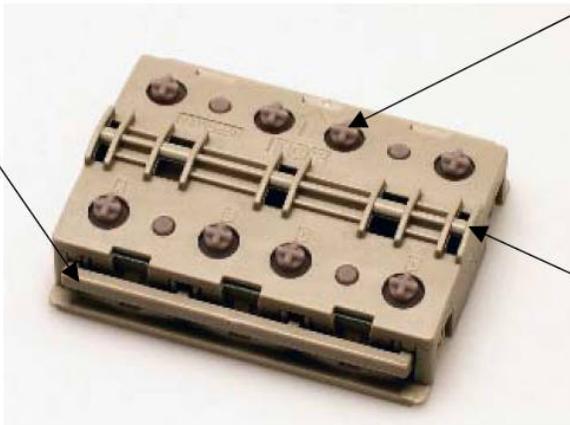
Épaisseur 15 mm

Déformation qq microns sous 100 N



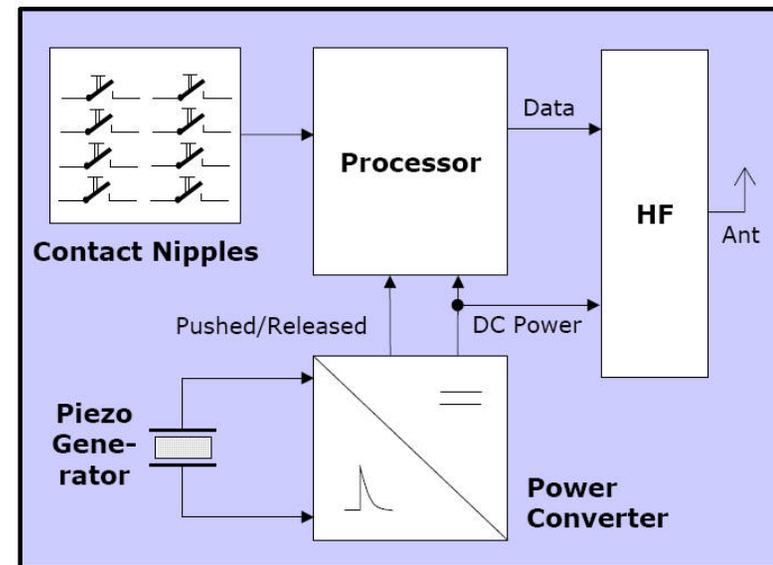
## Télécommande sans piles

(1) Energy bow  
on both module sides



(2) Soft rubber  
contact nipples  
for switch rocker  
identification

Rotation axis for  
pushbuttons or  
switch rocker



# Conversion photovoltaïque

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

Eclairement :	<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 :	<b>56 μW</b>	<b>350 μW</b>	<b>12 mW</b>	<b>49 mW</b>
Rendement :	<b>1,2 %</b>			<b>2 %</b>

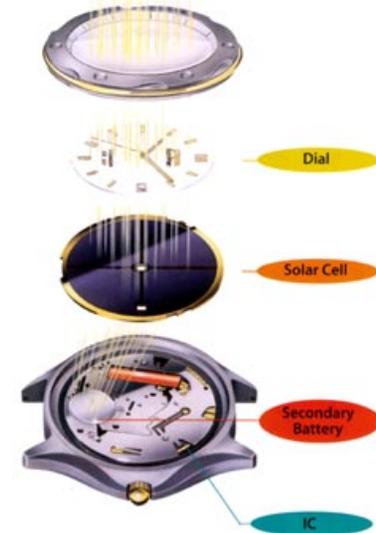
### Calculatrice (photo Solems)



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

### Montres

Accumulateur nécessaire  
6 mois d'autonomie possible



(photo Citizen)

# Conversion photovoltaïque

**Silicium cristallin** : meilleurs rendements ( $> 10\%$ )

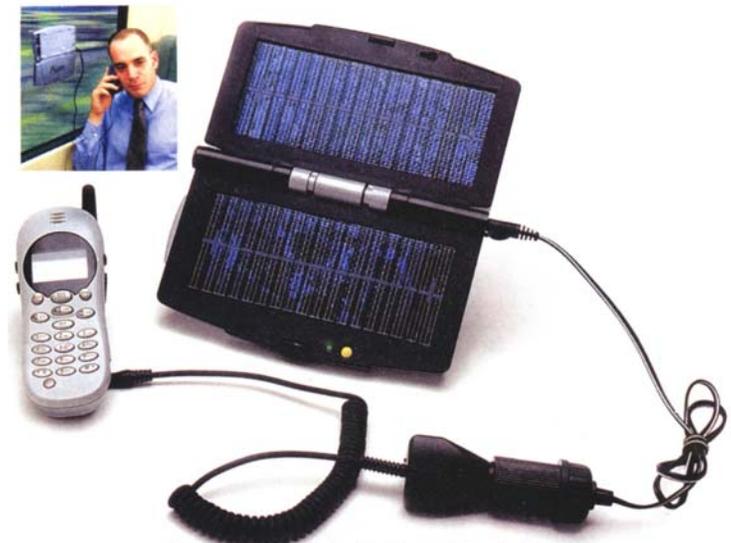
*donc moins encombrants ou plus puissants, mais plus cher*

Applications portables :



Call Outfitter  
615-889-8833

**Professional ( 13.8 Watts )**

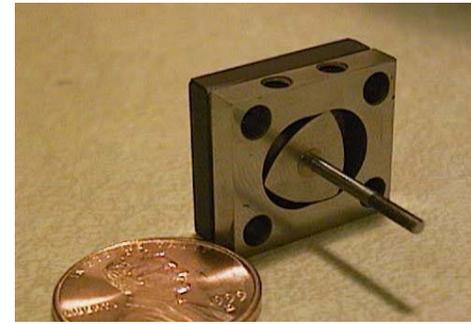


ICP Global Technologies : iSun Solar charger

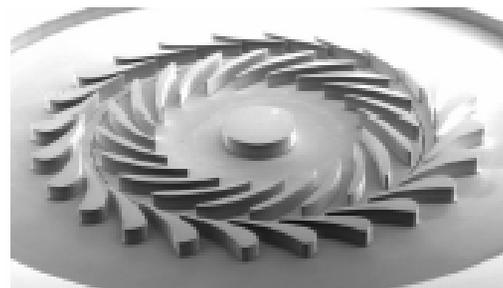
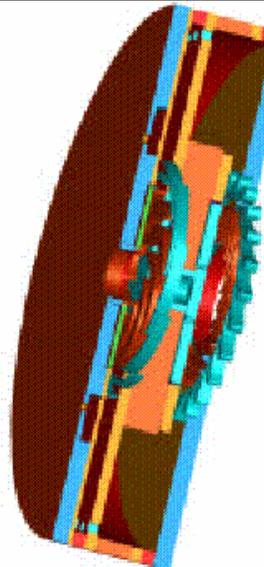
## Conversion à partir de carburants

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

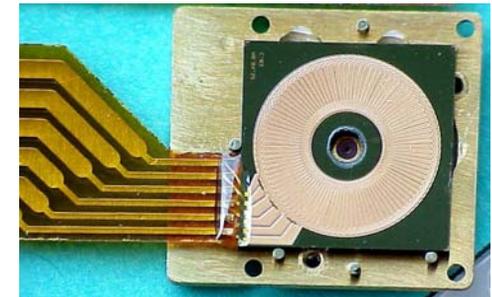
Moteur Wankel de Berkeley



Microturbine MIT



Générateur électromagnétique  
grande vitesse



LEG/LETI

## Conversion à partir de carburants

Micro-piles à combustibles (infos CEA)

Chaleur, eau

Fuel Cell

Hydrogène → Energie électrique  
*transformation directe*

DMFC

(Direct Methanol Fuel Cell)

Carburant (Méthanol)  
(CH<sub>3</sub>OH) → *Conversion directe*

Chaleur, CO<sub>2</sub>

Possibilités de bon rendement électrique : plus de 50%

Compromis rendement – densité de puissance (compacité – échauffement)

# Conversion à partir de carburants

Mini-piles à combustibles

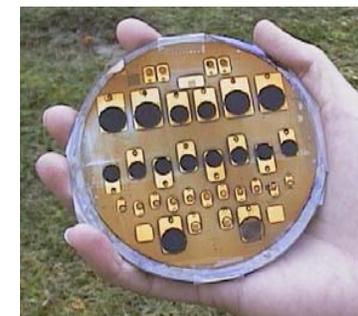
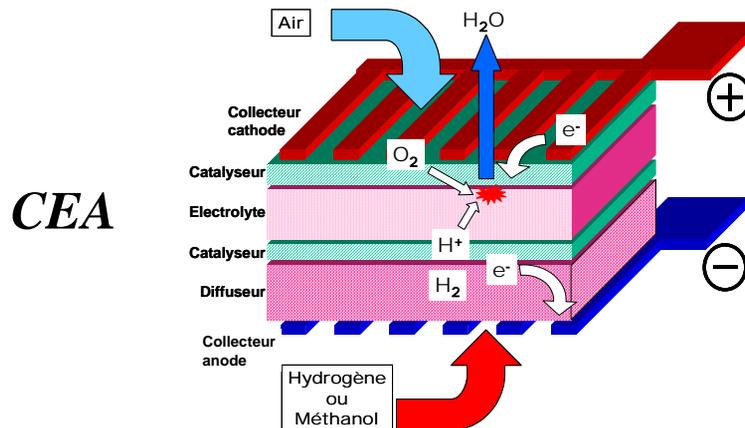


*DMFC Ballard 25 W*



*DMFC Motorola 0,1 W*

Micro-piles (intégrées) à combustibles (infos CEA)



Réalisation CEA  
sur tranche silicium

## Stockage d'énergie : généralement indispensable :

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

En fait, le stockage permet un **découplage énergie – puissance**.

## Comparaison :

- super-condensateurs : qq Wh/kg
- accumul. électrochimiques : 50 -> 150 Wh/kg (NiCd -> lithium polymère)
- volants d'inertie (rasoirs) Wh/kg
- ressort mécanique : 0,2 Wh/kg
- graisses : 10 kWh/kg, avec 22% de rendement métabolique :  $2,2 \text{ kWh}_{\text{méca}}/\text{kg}$  puis...
- carburants liquides : environ 10 kWh/kg (masse réservoir faible)
- hydrogène : hors réservoir 30 kWh/kg, avec réservoir < 3 kWh/kg

# Analyse quantitative expérimentale d'un dispositif commercial

radio Freeplay

collaboration SATIE

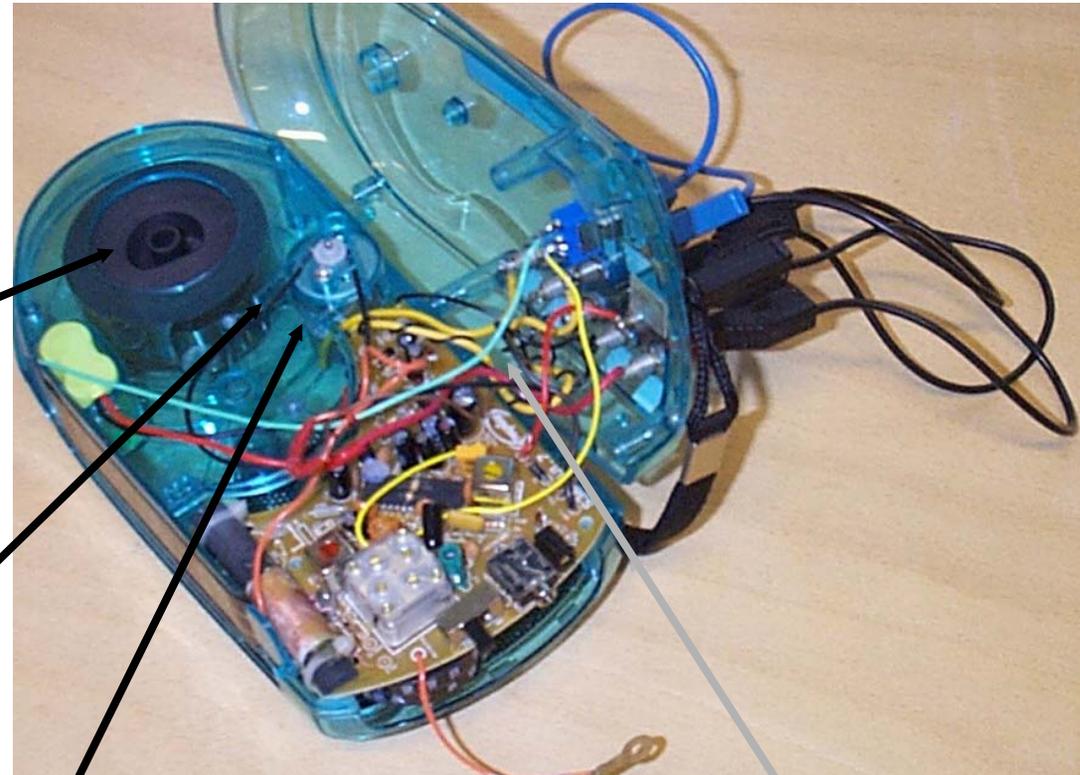
LPBM Laboratoire de physiologie et de biomécanique de l'exercice musculaire (Rennes)



# Analyse quantitative expérimentale d'un dispositif commercial

(radio Freeplay) collab. SATIE – LPBM Laboratoire de physiologie et de biomécanique de l'exercice musculaire

Objectif : analyser la conversion complète énergie humaine => électricité



Ressort

Train d'engrenages

Générateur à aimants

Instrumentation  
électrique et mécanique

## Partie mécanique :

Manivelle et ressort :  
(bras de levier 7,5 cm)

60 tours

ressort : 360 g, 220 J

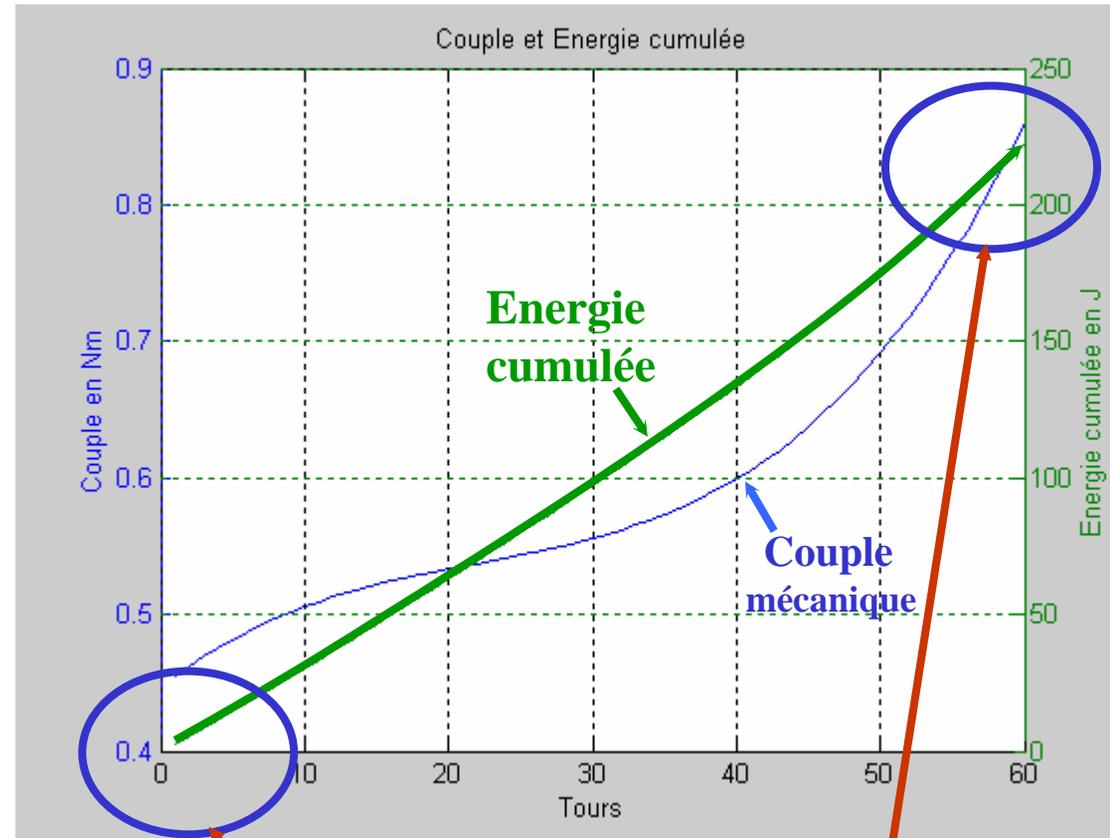
environ 0,17 Wh/kg

Remontage direct : 60 tr/mn

Dérroulement lent : 5 tr/mn

à travers multiplicateur

à 3 trains d'engrenages :  $m = 326$

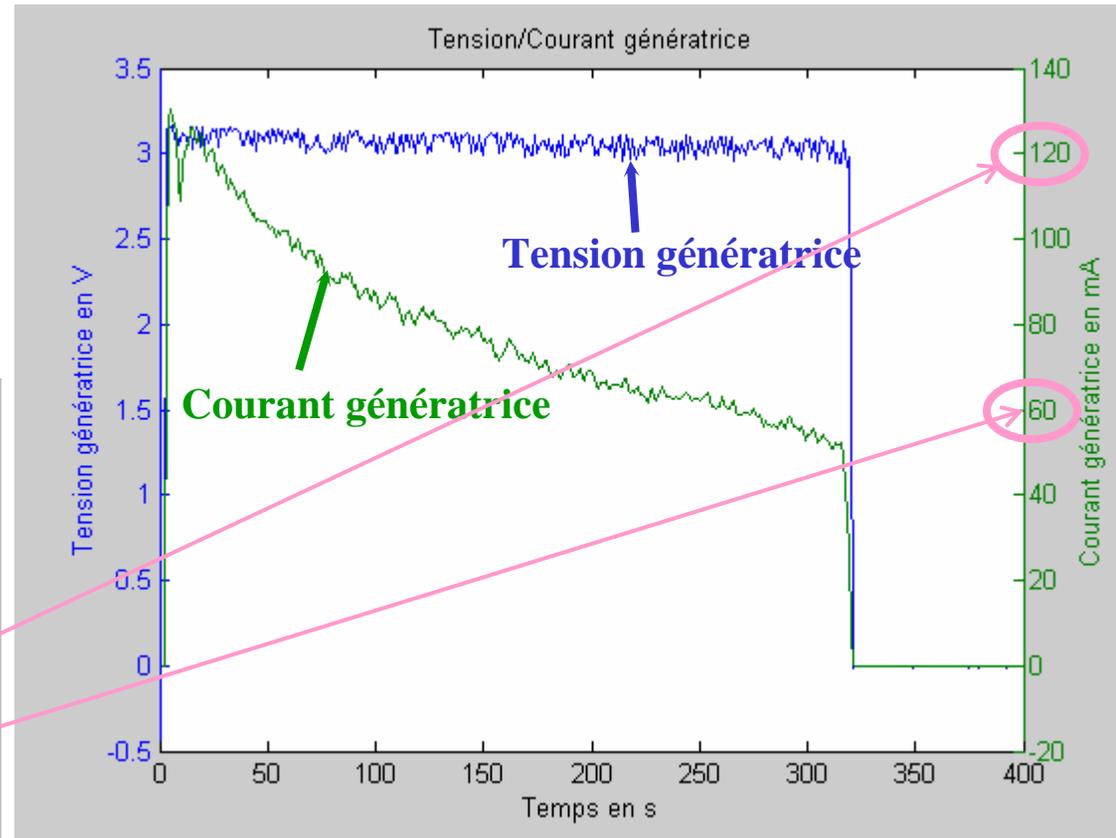
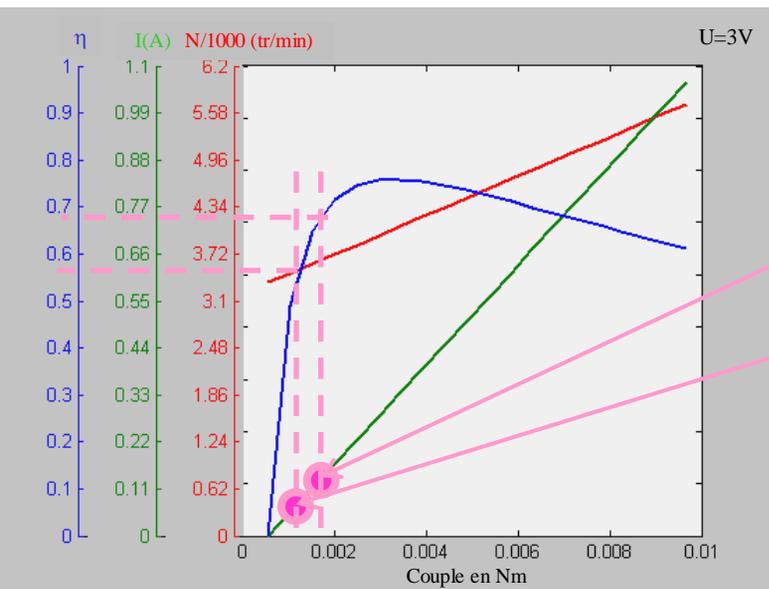


à 1 tr/s : 2,5 W

à 5,4 W

## Partie électromécanique :

Génératrice à collecteur 3 V  
débit direct  
à travers une diode série,  
sur accumulateur NiCd

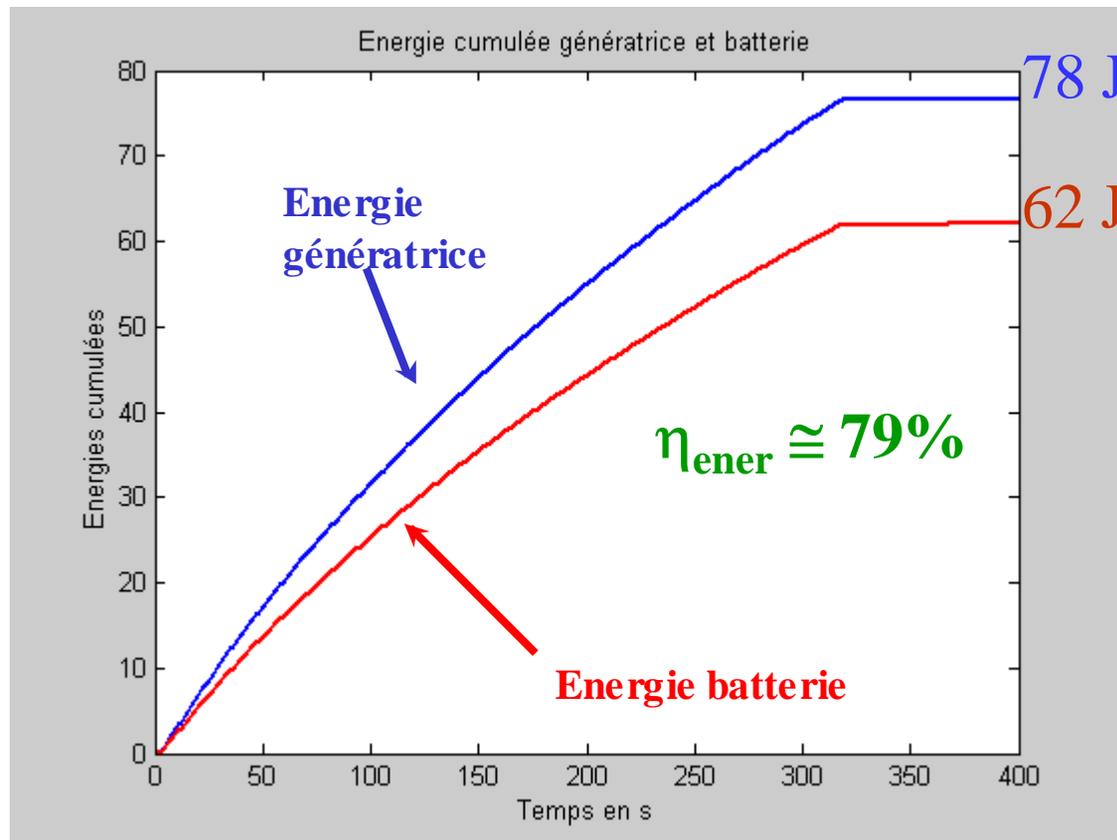


Energie électrique produite par le générateur :  
sur un cycle 78 J

**Du ressort à la génératrice :  $\eta_{\text{électroméca}} \cong 35\%$**

(65% générateur électromagnétique et 54% multiplicateur à engrenages)

Conversion électrique : juste une diode et deux transistors pour arrêter la décharge de la batterie en dessous d'un seuil



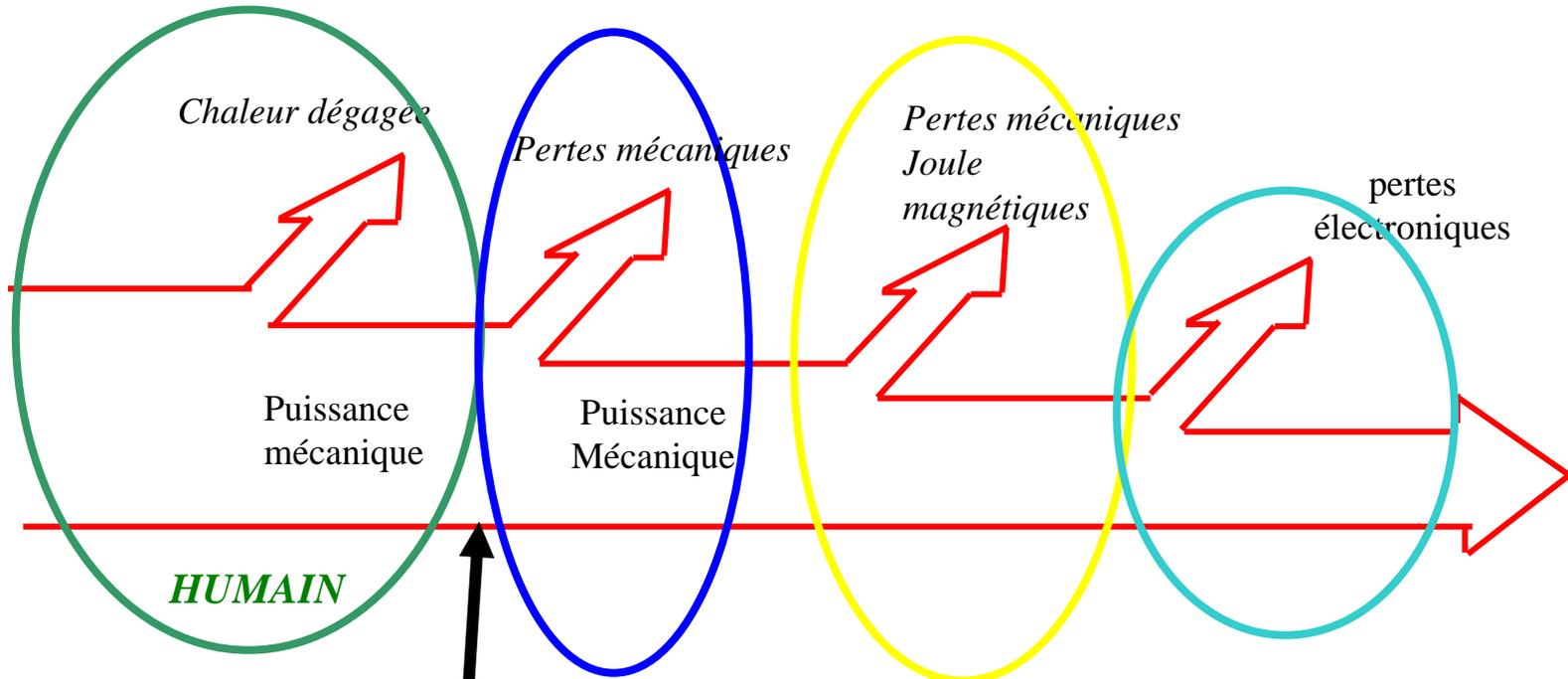
Accumulateur électrique :

NiCd : 2 éléments 600 mAh

sous 2,4 V : cela donne environ 5200 J soit 60 remontages !

Une recharge complète (éventuellement sur secteur) confère 12 à 14 h d'écoute  
un remontage d'une minute (à 1 tr/s) offre environ 1/4 h d'écoute  
(pour un déroulement de 5 mn)

# Bilan énergétique global



**HUMAIN**

**Réducteur**

**Générateur**

**"Convertisseur"**

*Phase de recharge humaine*

*Phase de transfert électromécanique*

$\cong 0,13$  l/mn d' $O_2$   
 $0,7$  kcal/mn soit  $50 W_{cal}$   
 soit  $\cong 10 W_{méca}$   
 avec  $\eta \cong 20\%$

$\eta \cong 54\%$

$\eta \cong 65\%$

$\eta \cong 79\%$

$\eta_{batterie} ?$

**Puissance méca**  
**2,5 à 5,4 W**

**Électroméca global :  $\eta \cong 28\%$**

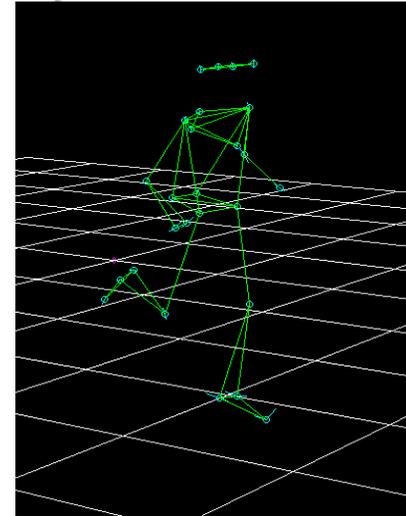
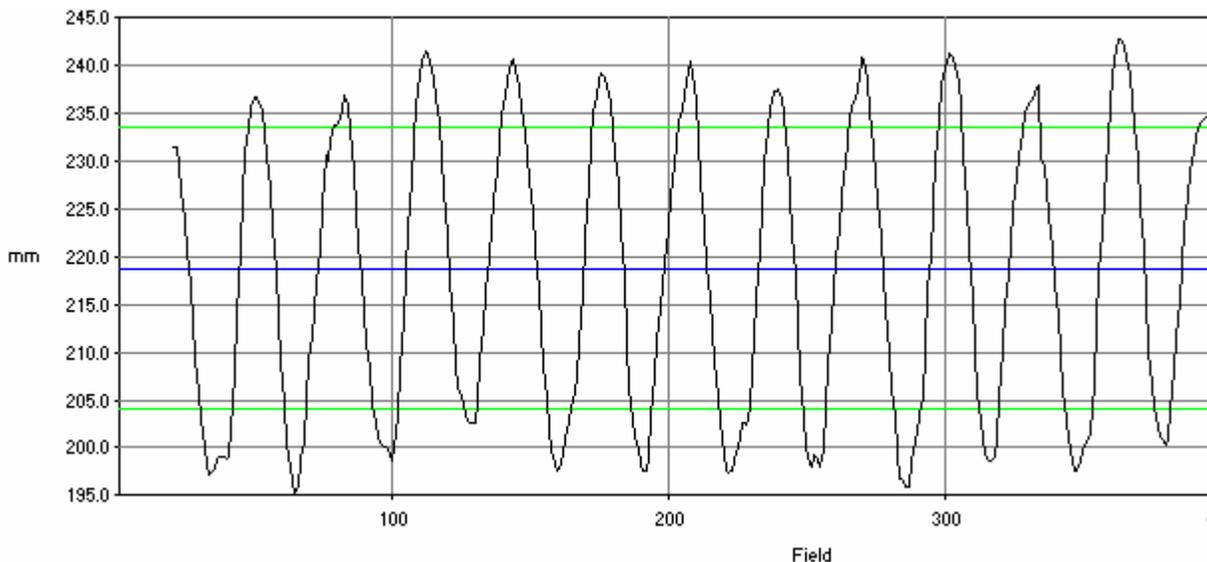
# **Conception d'un générateur portable fonctionnant à partir des mouvements naturels de la marche**

**collaboration SATIE**

**LPBM Laboratoire de physiologie et de biomécanique de l'exercice musculaire (Rennes)**

## Caractérisation des mouvements de la marche

Au niveau de la hanche :



**Marche :**

- Amplitude cc : 4 cm
- fréquence : 2 Hz à 1 pas/s

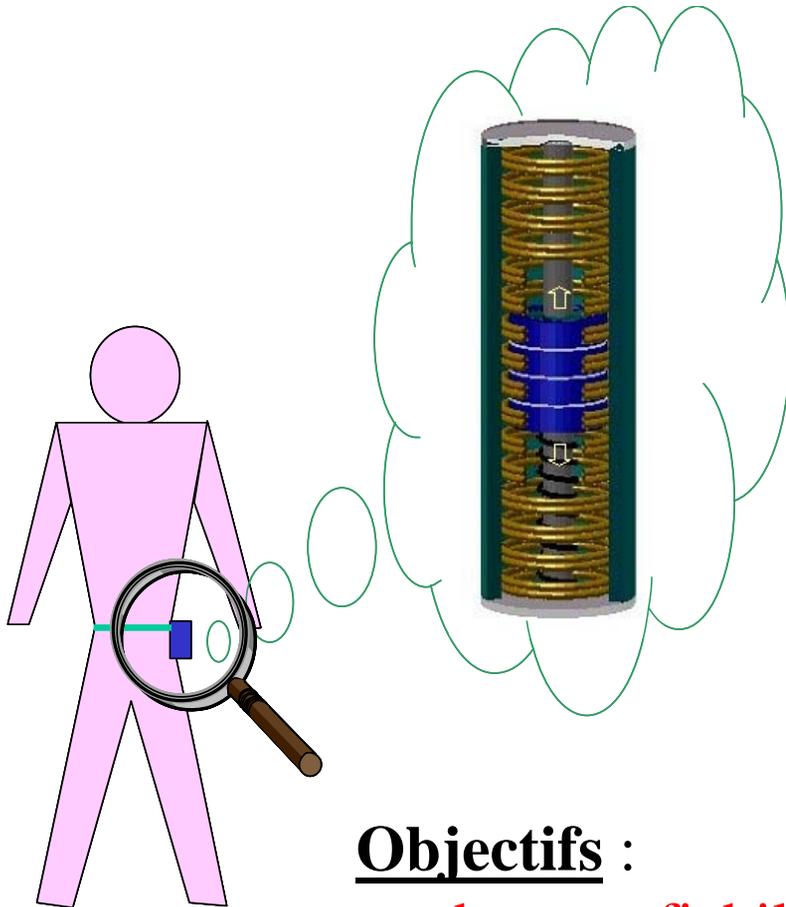
**Course : maxi**

- amplitude : 10 cm
- fréquence : 5 Hz

La fréquence des oscillation varie peu : 2 à 3 Hz

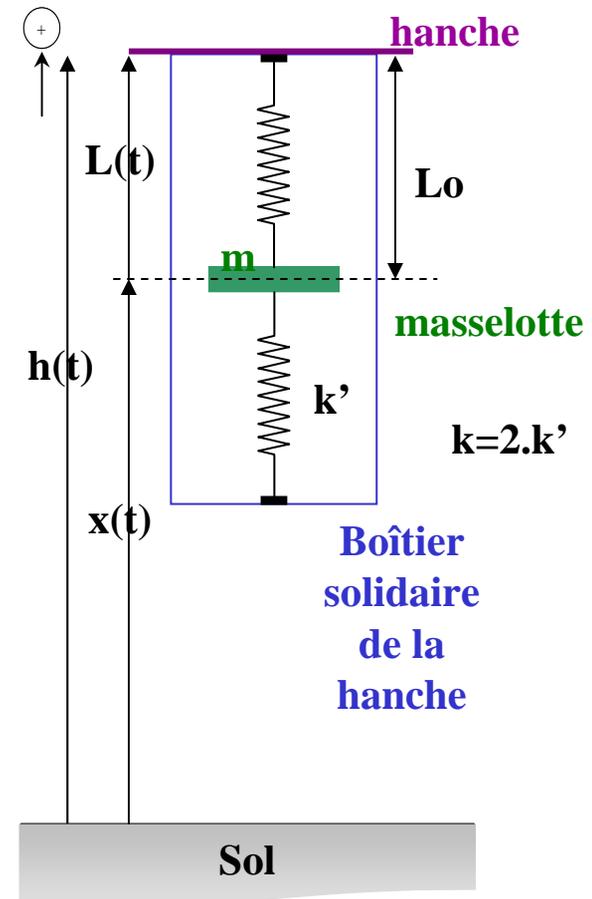
# Structure électromécanique directe à mouvement linéaire oscillant

Principe et modélisation :



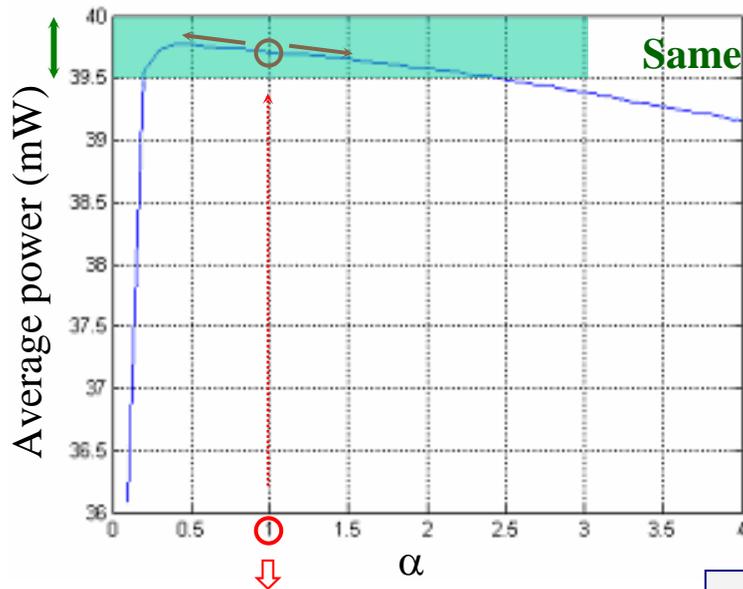
**Objectifs :**

rendement, fiabilité, ergonomie

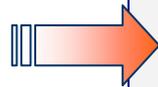


## Loi optimale Force d'amortissement en fonction de la vitesse ?

$$F(t) = \lambda \cdot \left( \frac{dL(t)}{dt} \right)^\alpha$$



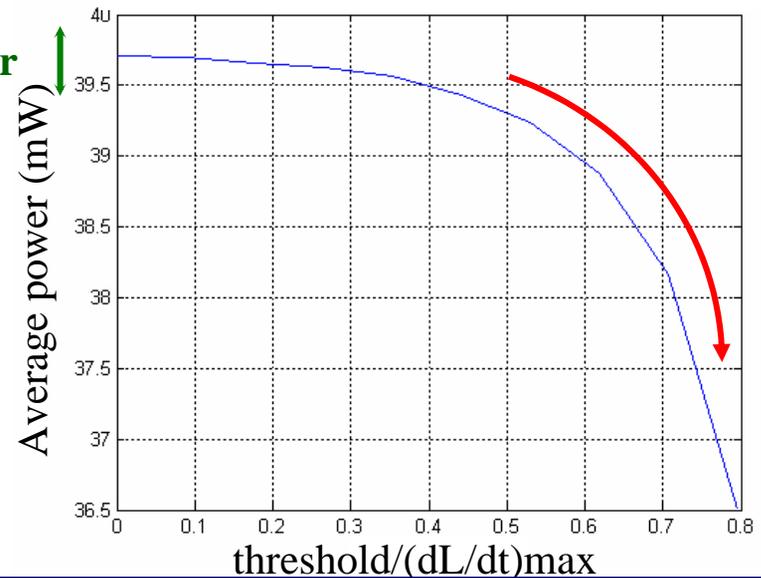
Convertisseur + charge  
= charge résistive équivalente



*Exemple :* **masse mobile 50 gramme**  
**fréquence propre = 2 Hz;**  
**plage de mouvement = 8 cm**

$$F(t) = \lambda \cdot \frac{dL(t)}{dt} \quad \text{with} \quad \left| \frac{dL}{dt} \right| \geq \text{threshold}$$

⇒ Diode rectifier + voltage source load



**Convertisseur + charge =  
adaptatif pour maximiser la récupération de puissance**  
*Systeme mecanique = 2nd ordre*

## Récupération du maximum de puissance

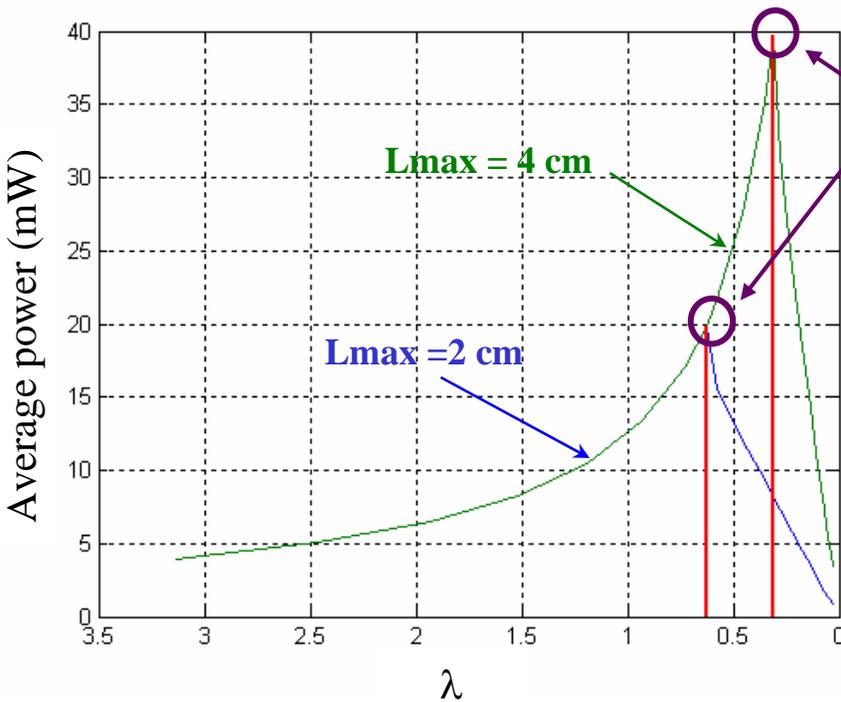
À la pulsation propre (résonance) :

$$\omega_{\text{step}} = \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow P_{\text{max}} = \frac{F_M}{2.\lambda}$$

amplitude de la force d'excitation  
appliquée au système

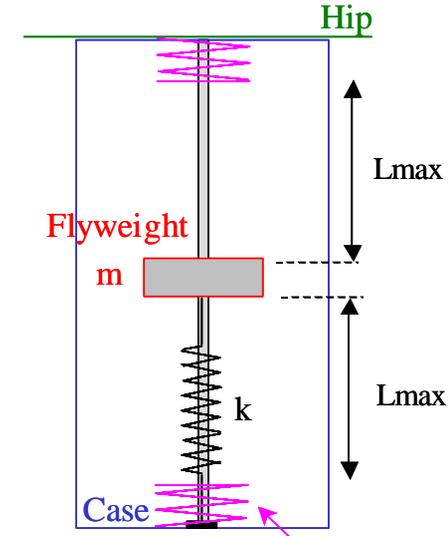
$$F_M = m.X_M.\omega_0^2$$

Il existe une valeur de  $\lambda$  (amortissement) optimale pour maximiser la récupération de puissance :



Points donnant  $\lambda_{\text{opt}}$  pour maximiser P (système à butées).

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{m.X_M.\omega_0}{L_{\text{max}}}$$



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

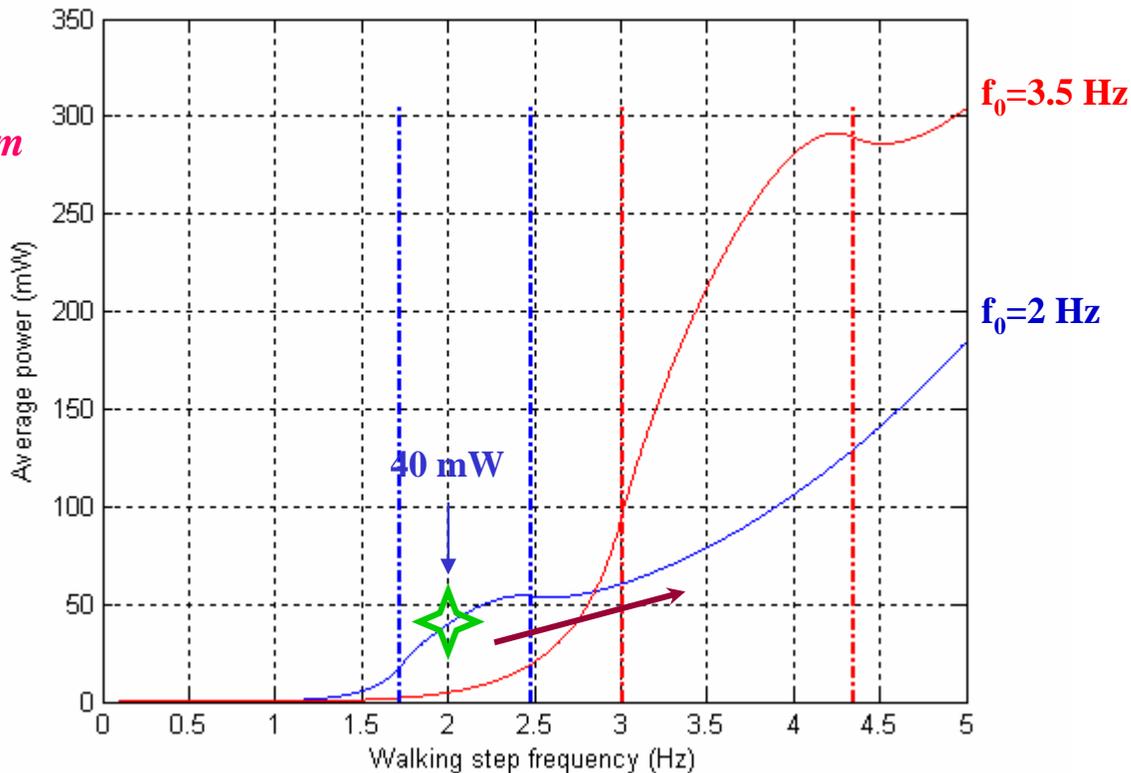
Maximum power is obtained when reaching stop spring limit

## Résultats généraux (simulations) :

la fréquence propre du système ( $f_0$ ) ne doit pas nécessairement être égale à celle d'excitation ( $f_{\text{step}}$ )

### Exemple

$m = 50 \text{ g}$   
débattement  $\pm 4 \text{ cm}$



La puissance croît  
avec la fréquence  
d'excitation

At resonance, power depends on Walk, Mass, Clearance (*Ergonomics Limits*)

and maximum power = stop spring limit  $\Rightarrow$  Simple mode regulation

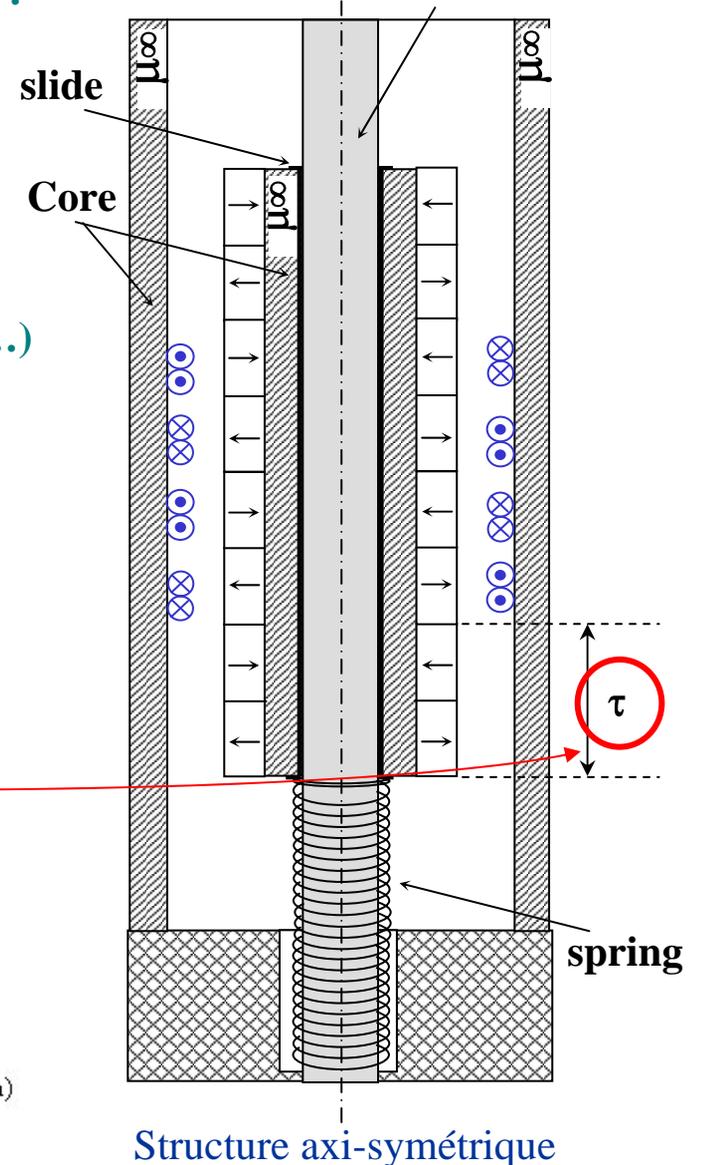
$$F = \lambda_{\text{opt}} \cdot v$$

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{m \cdot X_M \cdot \omega}{L_{\text{max}}}$$

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

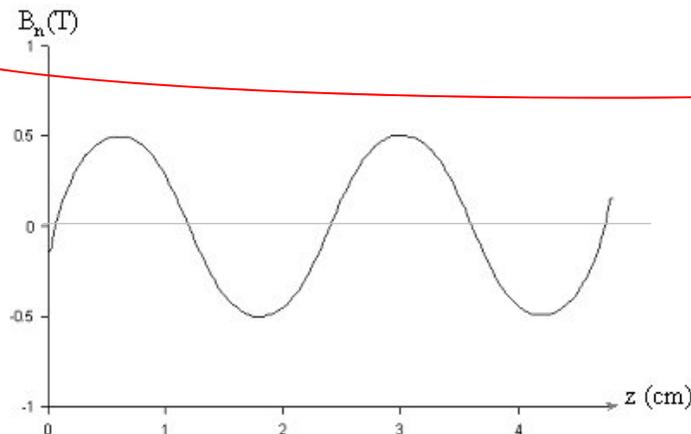
## Exemple de structure électromagnétique de générateur linéaire :

- masse mobile:
    - empilage d'anneaux aimantés radialement NdFeB sur un cylindre ferromagnétique
  - stator solidaire du boîtier :
    - circuit magnétique (réduction des courants de Foucault...)
    - bobinage d'induit concentrique
- ⇒ bobinage d'entrefer = effort de détente minimal



## Modèle d'induction d'entrefer sinusoïdale :

$$B_g(z) = B_{gM} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\tau} \cdot z\right)$$



☆ **F.E.M. :** ( $E_M$  depends on  $B_{gM}$ ,  $l_s$  length of turns,  $n_c$  coils,  $n$  turns,  $n_\ell$  layers, coil type)

$$e_c(n, n_\ell, d, z) = E_M(n, n_\ell, d) \cdot \frac{dz}{dt} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot z\right)$$

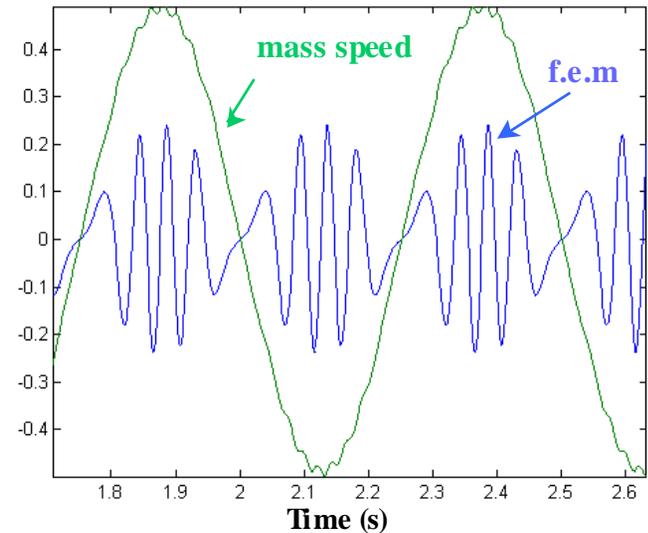
Speed

☆ **Force de Laplace :**

$i = \text{courant induit} :$   $f \cdot \frac{dz}{dt} = e \cdot i$

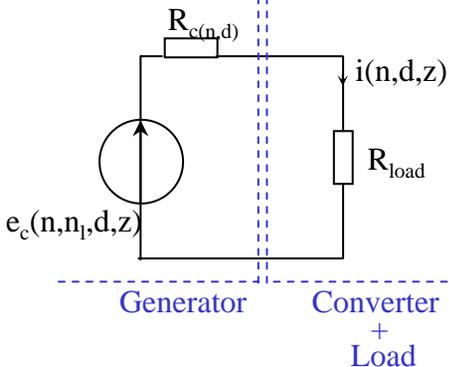
$$f(n, n_\ell, d, z) = E_M(n, n_\ell, z) \cdot i(n, d, z) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot z\right)$$

### Sinusoidal flyweight displacement



### Charge résistive :

$$i = \frac{e_c}{R_c + R_{load}}$$



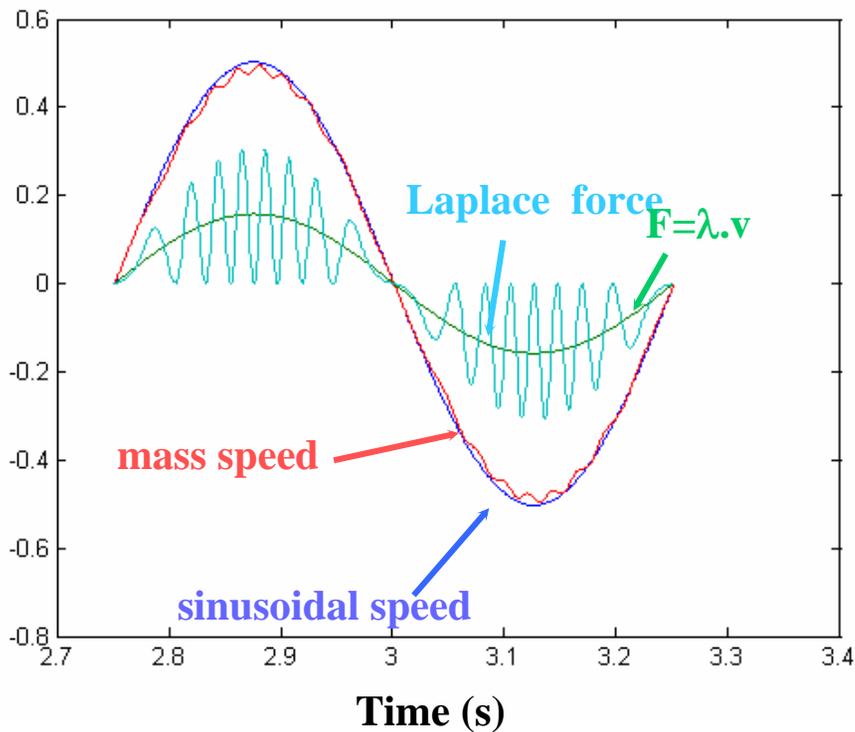
$$f(z) = \underbrace{\frac{[E_M(n, n_\ell, z)]^2}{R_c(n, d) + R_{load}(n, d)}}_{F_{max}} \cdot \frac{dz}{dt} \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot z\right)$$

☆ **Fonctionnement optimal :**

$$f(z) = F_{\max} \cdot \frac{dz}{dt} \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot z\right) \quad \left| \frac{dz}{dt} \right| = v$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot z\right) = \frac{1}{2}$$

**valeur moyenne de la force :**  $F(z) = \underbrace{\frac{1}{2}}_{\lambda} \cdot F_{\max} \cdot v$



⇒ Les simulations valident le modèle à **Laplace Force constante sur un pas :**

$$F(z) = \underbrace{\frac{1}{2}}_{\lambda} \cdot F_{\max} \cdot \underbrace{\frac{dz}{dt}}_{.v}$$

**Système mécanique : à  $f_0$ , la puissance dépend de la masse, du débattement (*encombrement*)**

$$F = \lambda_{\text{opt}} \cdot v \quad \swarrow \frac{dz}{dt}$$

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{m \cdot X_M \cdot \omega}{L_{\text{max}}}$$

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

**Partie électromagnétique : Force de Laplace :**

$$F(z) = \frac{1}{2} \cdot F_{\text{max}} \cdot \frac{dz}{dt}$$

Pour maximiser la puissance :

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \cdot F_{\text{max}} = \frac{m \cdot X_M \cdot \omega}{L_{\text{max}}}$$

*Electromagnétique*

*Mécanique*

**Performance énergétique :**

$$\eta_{\text{elec}} = \frac{P_{\text{Load}}}{P_{\text{meca}}}$$

⇒

$$\eta_{\text{elec}} = \frac{R_{\text{Load}} \cdot i^2}{e_c \cdot i}$$

⇒

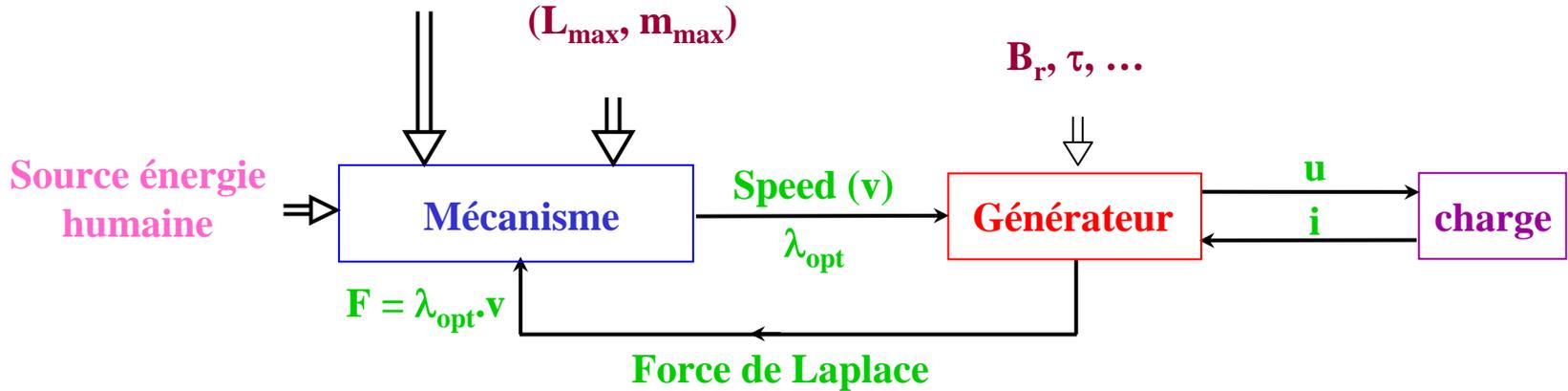
$$\eta_{\text{elec}} = \frac{R_{\text{Load}}}{R_c + R_{\text{Load}}}$$

⇒

$$e_c = (R_c + R_{\text{Load}}) \cdot i$$

Pertes magnétiques  
et frottements mécaniques non considérés

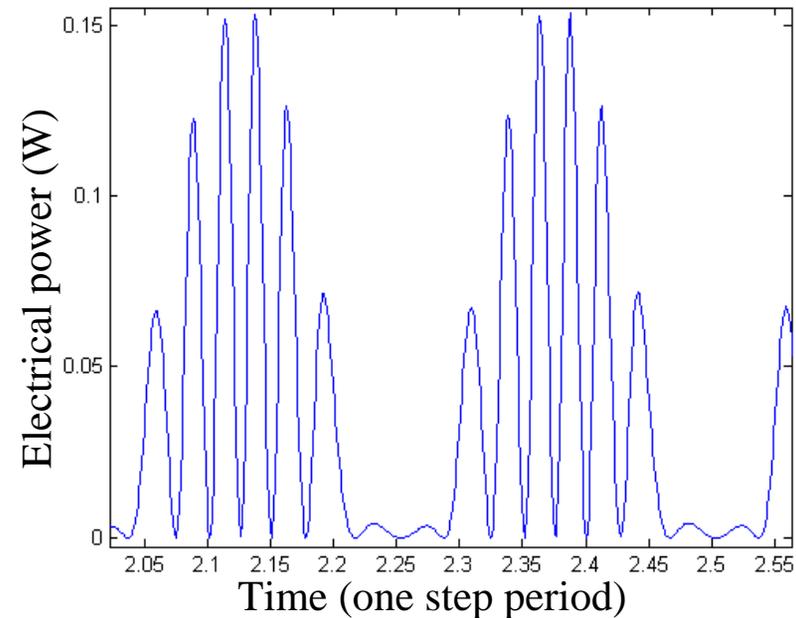
Optimisation système : **Masse mobile** **Contraintes méca**



**Exemple :**

Marcheur :  $f_{\text{step}}=2\text{Hz}$ ; amplitude excitation  $X_M=4\text{cm}$   
 Flyweight:  $m= 50 \text{ g}$  ; débattement  $\pm 4 \text{ cm}$   
 Système électr. : 4 bobines; 10 couches; 37 tours ;  
 0.25 mm diamètre fil ;  
 $R_c=16 \Omega$ ;  $R_{\text{Load}}=3.9 \text{ k}\Omega$   
 $\Rightarrow E = 25 \text{ V}$ ;  $I = 4.5 \text{ mA}$

$P_{\text{méca}} = 40 \text{ mW}$   
 $P_{\text{élec}} = 39 \text{ mW}$



## CONCLUSION

- 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

## Bibliographie

### Articles divers

- [AladdinPower\_web-01] Site internet de la société AladdinPower, Floride, US. Constructeur Nissho Engineering (Japon) <http://www.aladdinpower.com>
- [Baylis\_bv-99] BAYLIS T. G., Spring operated current generator for supplying controlled electric current to a load.  
Demandeur : Baylis Generators Limited, Twickenham, Grande Bretagne - Brevet N° US 5917310, 29 june 1999, 18 pages.
- [Born\_web-98] BORN J.J., DINGER R., FARINE P.A., High Precision Mechanics (HPM) : un mouvement automatique avec la précision de quartz.  
7.CEC 1998, 10 october 1998, karslsruhe, Germany. 7 pages. <http://www.asulab.ch/pdf/salto-fr.pdf>
- [Crisan\_BV-99] CRISAN A., Typing power., Demandeur : Compaq computer Corporation, Houston, US., Brevet N° US 5911529, 15 june 1999, 9 pages.
- [ElectricShoe\_web-01] Site internet de la société The Electric Shoe Compagny, Grande Bretagne. <http://www.theelectricshoeco.com/>
- [Freeplay\_web-01] Site internet de la société Freeplay Energy, Grande Bretagne. <http://www.freeplay.net>
- [Jansen-99] JANSEN A.J., STEVELS A.L.N., Human Power, a sustainable option for electronics. Electronics and the Environment, Proceedings IEEE International Symposium on, 1999, pages 215-218.
- [knapen\_BV-87] KNAPEN P.M.J., Electric power suply system for portable miniature size power consuming devices. Demandeur : Kinetron B.V., Tilburg, Pays-Bas - Brevet N° US 4644246, 17 february 1987, 7 pages.
- [Komezumi\_bv-01] Komezumi T., Hirakui K., Portable Manual Generator. Demandeur : Nissho Engineering, Japon - Brevet N° WO 0131764, 3 may 2001, 30 pages.
- [Lacour-78] LACOUR J.R., Le fonctionnement musculaire. Hors série Science et Vie, juin 1978, pages 99-111.
- [Nightstar\_web-01] Site Internet Nightstar Flashlight, Applied Innovative Technologies, USA. <http://www.nightstar1.com>
- [Paradiso-00] Paradiso J., Renewable Energy Sources for the Future of Mobile and Embedded Computing. Computing Continuum Conference, San Francisco, CA, 16 mars 2000. <http://www.media.mit.edu/resenv/papers.html>
- [Ram-99] Ram B., Stevels A., Griese H., Middendorf A., Muller J., Nissen N.F., Reich H., Environmental performance of mobile products. Electronics and the Environment, Proceedings IEEE International Symposium on, 1999, pages 140-145.
- [Schmitt\_Enocean02] Frank SCHMITT, EnOcean GmbH, Batterielose Funksensoren, betrieben mit Energie aus der Umgebung, ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Mess-Systeme Ludwigsburg, 11. und 12. März 2002
- [Seiko\_web-01] Site Web Seiko. Thermic : la technologie de la chaleur. <http://www.seiko.fr/cadres/techno.htm>.
- [Shenck-99] Shenck N.S., A Demonstration of Useful Electric Energy Generation from Piezoceramics in a Shoe. Thèse Massachusetts Institute of Technology. Mai 99.
- [Starner-96] Starner T. Human-Powered Wearable Computing. IBM Systems Journal, Vol. 35, pages 618-629, 1996.
- [Tug Power\_web-02] Site Internet de la société Nissho Engineering. Constructeur Nissho Engineering (Japon). <http://www.nseg.co.jp/english2/products/tug/syousai.htm>

## Articles SATIE

<http://www.satie.ens-cachan.fr/> et <http://www.bretagne.ens-cachan.fr/dochtml/docD/dochtml/0306.html>

S. TURRI, B. MULTON, H. BEN AHMED, D. MILLER, F. MULTON, P. DELAMARCHE, « *Caractérisation d'un générateur portable : de l'énergie humaine à l'électricité* », Colloque GEVIQ, Marseille 12-13 juin 2002, pp.11-16.

S. TURRI, G. POULIN, « L'exploitation de l'énergie des mouvements humains », Colloque Energie portable : autonomie et intégration dans l'environnement humain (Journées Electrotechniques du Club EEA), Cachan 21-22 mars 2002.

S. TURRI, D. MILLER, H. BEN AHMED, B. MULTON, "Design of an electro-mechanical portable system using natural human body movements for electricity generation", European Power Electronics Conf. 2003, Toulouse, sept. 2003 CDROM.

## Colloque Energie portable : autonomie et intégration dans l'environnement humain (mars 2002)

<http://www.satie.ens-cachan.fr/jeea2002/JEEAindex.htm>

John STOCKOLM (Marvel Thermoelectrics), « *Génération thermoélectrique* »

Anne LABOURET, « Cellules solaires quelle autonomie en énergie portable ? »

Franck MULTON et Paul DELAMARCHE, « *L'énergie chez l'homme* »

Jérôme DELAMARE, Orphée CUGAT, « *Micro sources d'énergie thermo-mécaniques* »

Alain LEVASSEUR, Brigitte PECQUENARD, Philippe VINATIER (ICMB Bordeaux) et Jean-Paul TERRAT, Michel MARTIN, Frédéric FAVERJON (HEF), « *Les microaccumulateurs* »

Stéphane RAEL, Bernard DAVAT, F. BELHACHEMI (GREEN Nancy), « *Supercondensateurs à couche double électrique : principes de fonctionnement et comportement électrique* »

Michel FROELICHER et René JACQUES (CETEHOR, Besançon), « *Les énergies renouvelables dans la montre* »,

Sylvie TURRI et Guylaine POULIN (LESiR, ENS Cachan sites de Cachan et de Rennes), « *Dispositifs exploitant l'énergie des mouvements humains* »