



Récupération d'énergie pour les systèmes autonomes

École thématique ECOFAC 2010

<http://ecofac2010.irisa.fr/>

Conception faible consommation pour les systèmes embarqués temps réel
Plestin les Grèves - 29 mars au 2 avril 2010

Bernard MULTON, Marianne LOSSEC, Hamid BEN AHMED

ENS Cachan site de Bretagne

Département Mécatronique, Laboratoire SATIE CNRS

B. Multon et al

Plan

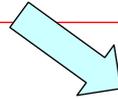
- **Positionnement du problème, « vision système »**
 - de la ressource au besoin
 - découplage énergie – puissance, gestion d'énergie
 - stockage

- **Ressources et transducteurs associés pour la production d'électricité**
 - lumière, conversion photovoltaïque
 - récupération d'énergie mécanique
 - chaleur, thermoélectricité
 - ondes radiofréquences

- **Bilan**

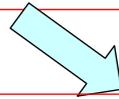
De la ressource énergétique au besoin

Lumière (solaire, artificielle)
Mouvements (vibratoires, humains...)
Chaleur
Rayonnements électromagnétiques
(éventuels carburants...)

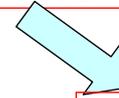


Récupération (*scavenging, harvesting*)

Transducteur
(convertisseur en électricité)



Conversion électronique de puissance (adaptation)
et/ou stockage

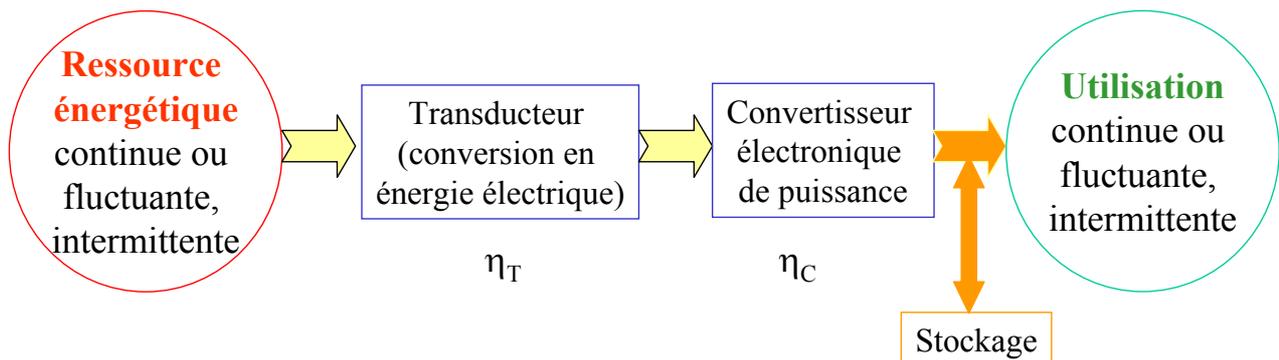


Utilisation/gestion

*Un domaine en émergence depuis les années 1990
Des solutions spécifiques et encore pas vraiment standardisées*

B. Multon et al

Besoins en découplage énergie - puissance



Le stockage permet :

- de suppléer les intermittences de production
 - de découpler énergie et puissance
- (la puissance délivrée par l'accumulateur peut être supérieure à celle en sortie du convertisseur)

Nécessité d'une **gestion d'énergie** pour :

- optimiser la récupération d'énergie
- ne pas surcharger l'accumulateur et ne pas trop le décharger
- optimiser éventuellement la consommation (mode veille, stratégies internes...)

B. Multon et al

Quelques données sur le stockage d'énergie

- Electricité « embarquée »

Piles électrochimiques (non réversibles) : les plus performantes au lithium jusqu'à **500 Wh/kg** et 1000 Wh/dm^3 et très faible autodécharge

Réversibles : **accumulateurs électrochimiques** :

60 (NiMH) -> **200 Wh/kg** (Li-Ion et Li-polymère) et **600 Wh/dm³**
décharges possibles de qq min (NiMH) à qq mois

Possibilités d'intégration, nécessité d'une gestion d'énergie avancée



supercondensateurs : **5 Wh/kg**

décharges possibles de qq s à qq heures voire qq jours

- volants d'inertie (rasoirs) : $\cong 1 \text{ Wh/kg}$

- ressort mécanique : $0,2 \text{ Wh/kg}$



Nécessitent un
convertisseur électromécanique
(moteur-générateur)

B. Multon et al

Stockage d'énergie (suite)

Comparaison :

- *accumul. électrochimiques* : -> **200 Wh/kg**

- *super-condensateurs* : qq Wh/kg

- Air comprimé « embarqué »

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

- Carburants « embarqués » (renouvelables ou non)

Avantage : densité d'énergie élevée,

Carburants liquides : environ **10 kWh/kg** hors réservoir
(facilité de conditionnement/stockage)

Hydrogène comprimé : **34 kWh/kg** (hors réservoir),

$\cong 1 \text{ kWh/kg}$ avec réservoir

- **Graisses** : **10 kWh/kg**,

avec 22% de rendement métabolique : $2,2 \text{ kWh}_{\text{méca}}/\text{kg}$

B. Multon et al

Exemple d'accumulateur miniature au lithium avec gestion intégrée



EnerChip™ CBC050

8 x 8 x 0,9 mm

50 μAh – 3,8 V

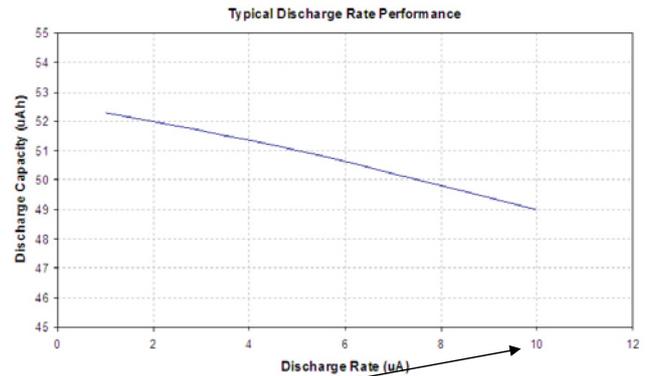
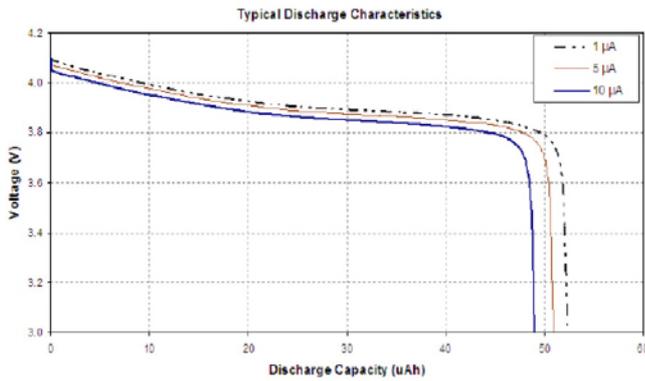
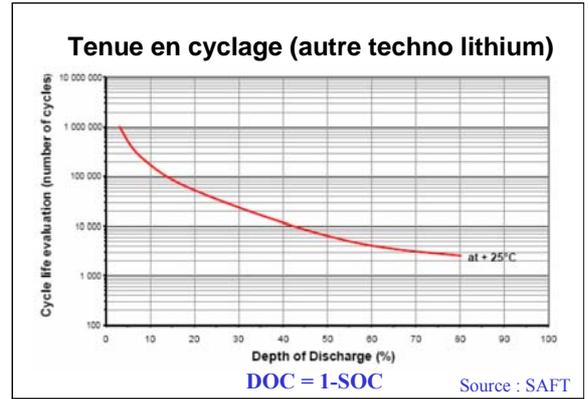
300 μA maxi pendant 20 ms

(décharge 6C)

résistance interne : 1,5 kΩ typ

Source : Cymbet Corp

- 5000 cycles à 10% de SOC
- Recharge possible en 50 min à 80% de SOC (sous 4,1 V)



10 μA ⇔ décharge C/5

B. Multon et al

SATIE

Systèmes et Applications des Technologies
de l'Information et de l'Energie UMR - 8029

CNS
CACHAN
BRETAGNE



Conversion photovoltaïque



B. Multon et al

Ressource : intensité de l'irradiation lumineuse

1 W/m² ≅ 100 lux en lumière solaire AM 1,5

(1 lux = 1 lumen/m²)

Selon spectre de la source...

Plein soleil : 1000 W/m² (≅ 100 000 lux)

Soleil voilé : 500 W/m² (≅ 50 000 lux)

Ciel nuageux : 200 à 50 W/m² (≅ 20 000 à 5000 lux)

Intérieur : vers une fenêtre : 400 à 2000 lux (≅ 4 à 20 W/m²)

éclairages artificiels : 100 à 1500 lux

Large dynamique
1 : 1000

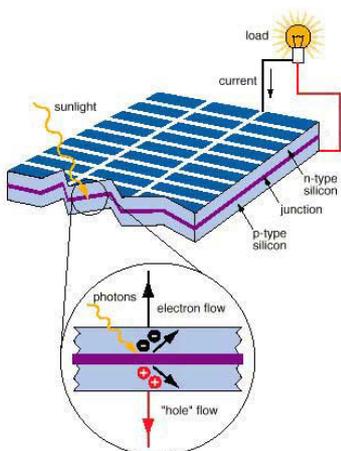
Eclairages **requis** (ordres de grandeur) :

Lieux de circulation :	40 lux mini
Standard (plan de travail bureau) :	500 lux (200 lux mini)
Travail de précision :	1000 lux
Bloc opératoire :	8 à 15 000 lux

B. Multon et al

Conversion photovoltaïque

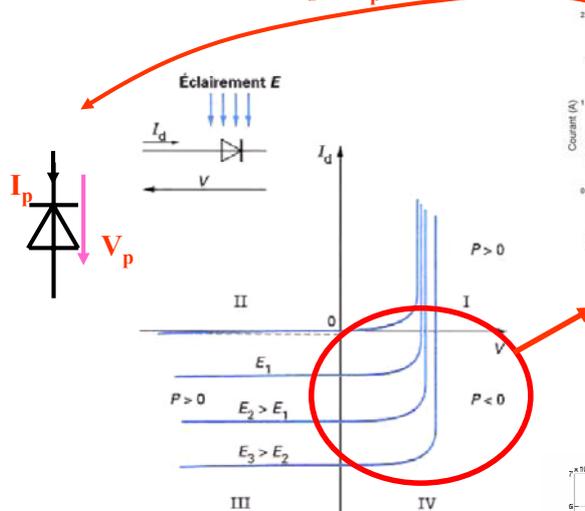
Principe cellule PV



Source : <http://www.rise.org.au/>

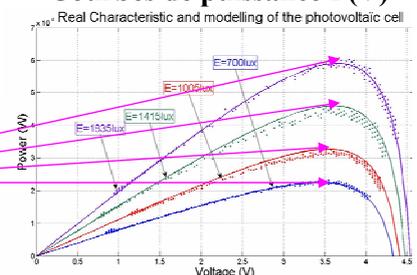
De la convention récepteur (diode) à générateur (PV)

$$I_d = -I_p$$



Source : Techniques de l'ingénieur

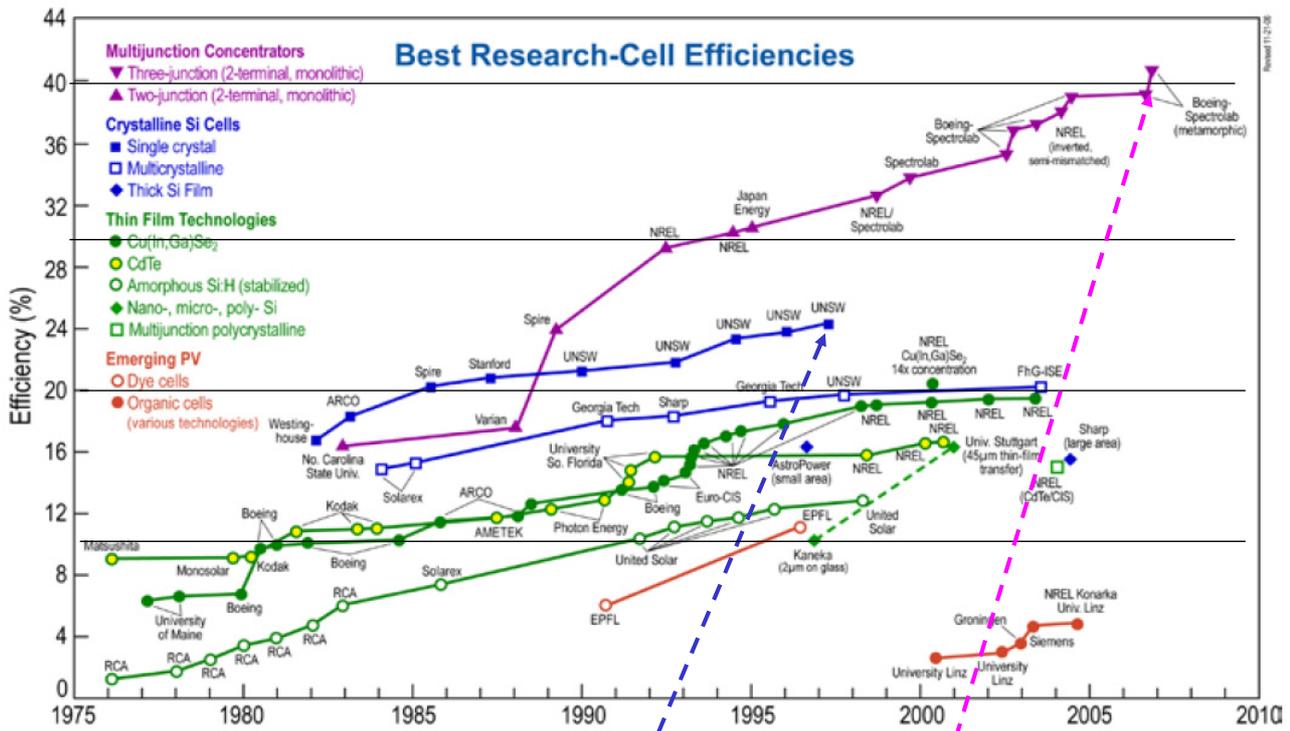
Courbes de puissance P(V)



Points de puissance maximale

B. Multon et al

Rendements technologies PV



Avec silicium : rendements possibles > 25% de rendement

Avec des multijonctions et avec concentration : > 40% de rendement

Source : NREL

B. Multon et al

Technologies courantes

Silicium polycristallin et monocristallin

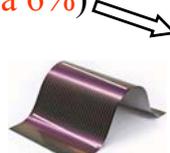
Silicium amorphe (aSi) rigide ou souple (η : 2 à 6%)

Autres films minces :

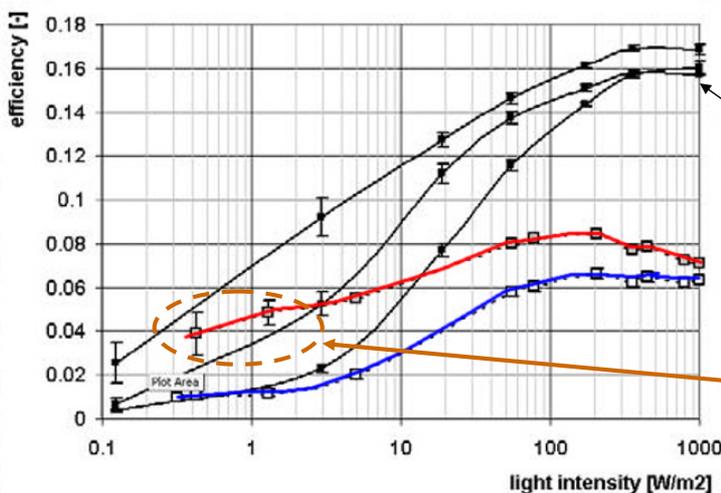
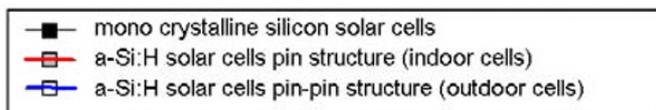
ex: CiS (cuivre indium selenium)



11 x 11 x 0,5 mm
0.55V, 500 μ A
(silicium)



Source : Flexcell



À 1000 W/m²
Avec 16% de rendement : 160 W/m²
ou 16 mW/cm²

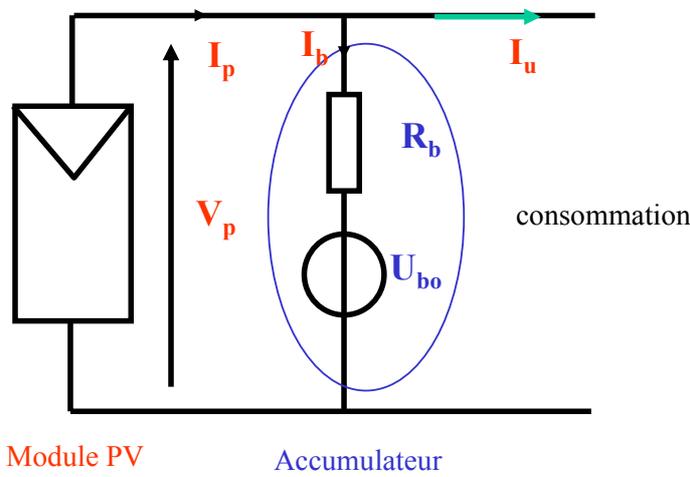
Aux faibles éclaircements
(moins de 3 W/m² ou 300 lux) :
rendement aSi > rendement Si cristallin

Source : Reich et al., 21st European Photovoltaic Solar Energy Conf. 2006

B. Multon et al

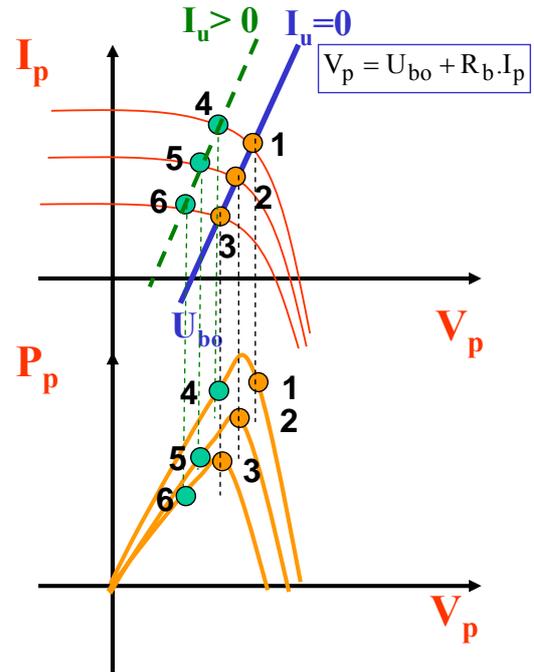
Chaîne de conversion

Modules PV directement connectés à un accumulateur



Modèle : $V_p = U_{bo} + R_b \cdot (I_p - I_u)$

$$V_p = [U_{bo} - R_b \cdot I_u] + R_b \cdot I_p$$



Sachant que U_{bo} et R_b sont également fonction de l'EDC et que I_u varie

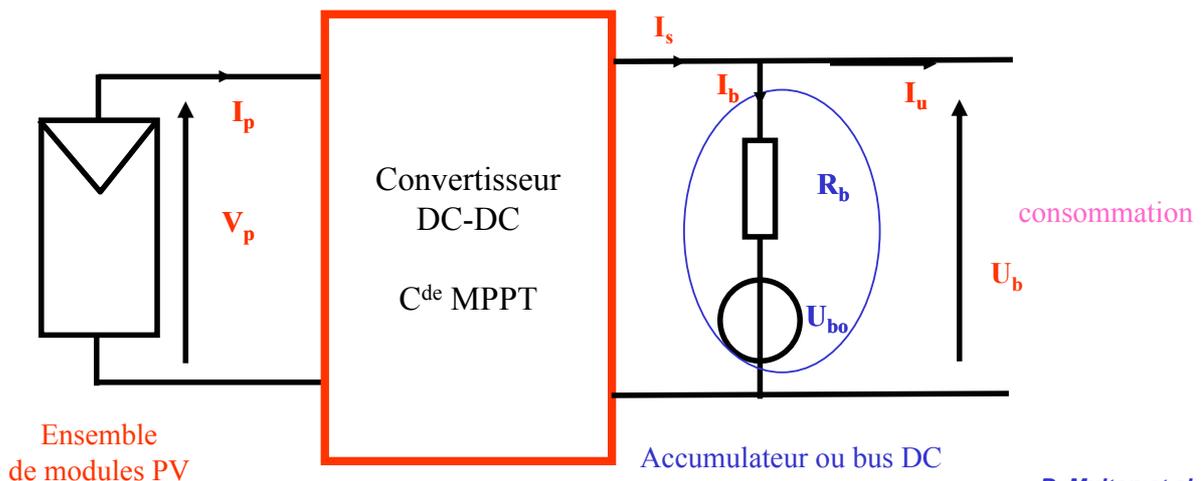
B. Multon et al

Chaîne de conversion

Utilisation d'un convertisseur à contrôle MPPT (maximum power point tracking)

Utile pour exploiter la puissance maximale dans des conditions très

- Variables : de température,
- d'ensoleillement...
- de tension continue (vieillesse batterie, EDC...)
- des disparités d'éclairement des modules
- de la consommation...



B. Multon et al

Exemple avec accu lithium en connexion directe

$$V_p = [U_{bo} - R_b \cdot I_u] + R_b \cdot I_p$$

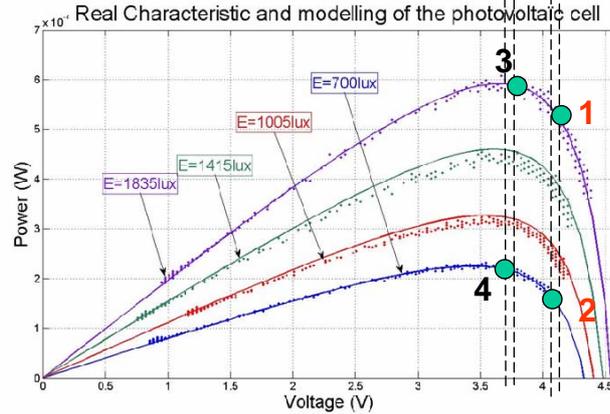
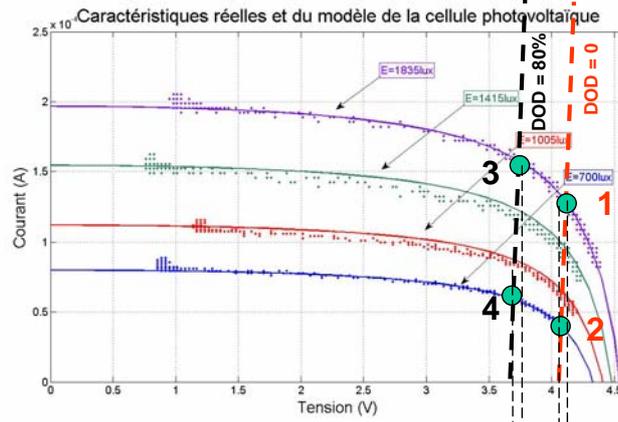


Module Solems
Si amorphe 54x54 mm²



Accu Li-Po (UBC322030)
120 mAh
 $U_{b0} \cong 4,17 \text{ V}$ (- 0,55 DOD)
 $R_b \cong 600 \Omega$

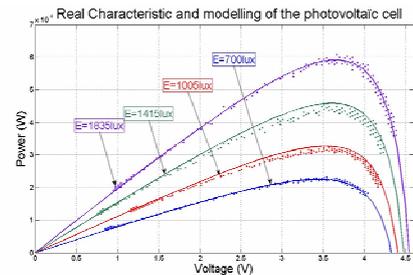
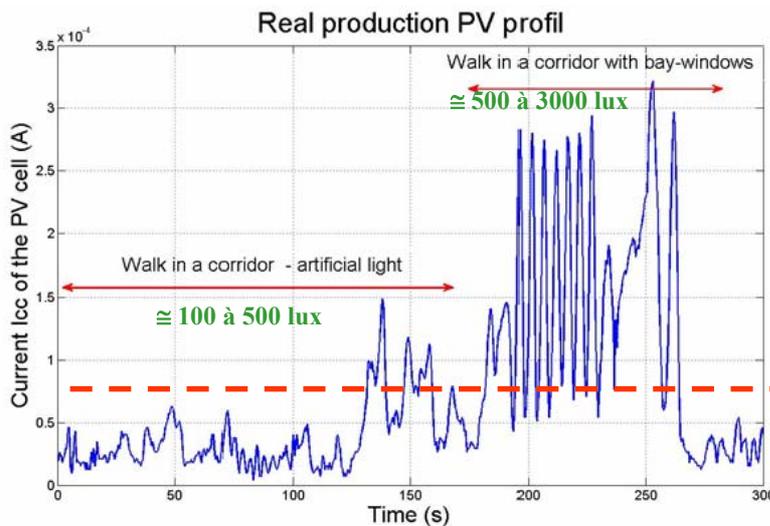
Un convertisseur MPPT avec un rendement global de 70% apporterait-il un gain significatif ?



Source : M2R Marianne Lossec, 2008

B. Multon et al

Profil de fonctionnement en situation réelle (intérieur d'un bâtiment et en mouvement)



Moyenne cycle
 $\cong 70 \mu\text{A}$
(260 μW)

@ 200 lux (3 W/m²) : $\cong 60 \mu\text{W} \Rightarrow 4 \mu\text{W/cm}^2$

@3000 lux (30 W/m²) : $\cong 800 \mu\text{W} \Rightarrow 50 \mu\text{W/cm}^2$

Exemple : moyenne : $\cong 260 \mu\text{W} \Rightarrow 17 \mu\text{W/cm}^2$

Source : M. Lossec et al, NEST 2009

B. Multon et al

Applications

Faibles besoins d'énergie en faible éclairement : Si amorphe

Calculatrice (source: Solems)



Cellule de 3 à 4 cm²
 Fonctionnement direct sans accu
 qq μA sous 1.5V
 Seuil d'éclairement env. 50 lux
 (0,5 W/m²)

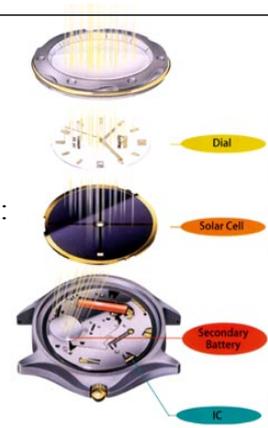
Montres

Accumulateur nécessaire
 6 mois d'autonomie possible

Consommation d'une montre :
 < 1μA sous 1,5 V (1,5 μW)

Avec un rendement de 4%,
 et une surface de 3 cm² :
 $P_{PV} = 12 \text{ mW}$ à 120 μW
 (11 s/jour à 18 min/j)

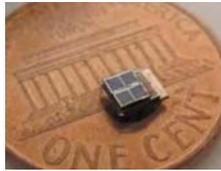
(Source : Citizen)



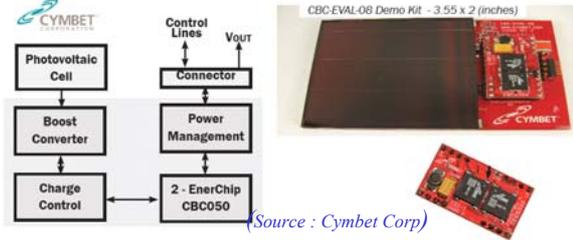
Faibles encombrements, plus forts besoins : Si cristallin

Capteur autonome

Dans 2,5 x 3,5 x 1mm :
 1 capteur PV
 1 accumulateur lithium intégré
 (film mince, Cymbet)
 1 circuit électronique basse conso
 (microproc. ARM Cortex-M3) (Source : Univ. Michigan)



Kit capteur communicant 90 x 50 mm



B. Multon et al

Applications plus forte puissance

Silicium cristallin :



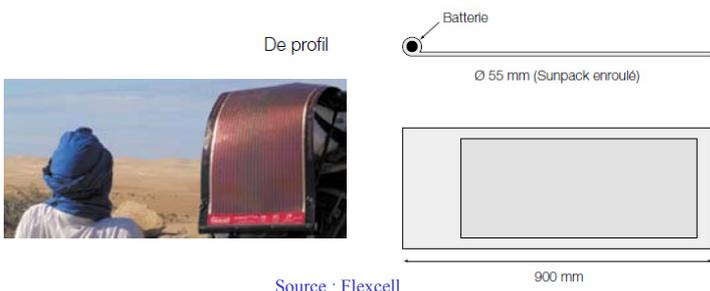
Professional (13.8 Watts)

0,1 m² @ 1000W/m² et 14% => 14 W

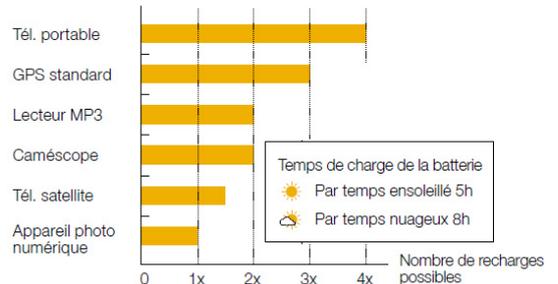


ICP Global Technologies : iSun Solar charger

Silicium amorphe couches minces : souple mais faibles rendements (< 6%)



Source : Flexcell



B. Multon et al

Conversion d'énergie mécanique en électricité



Source : Freeplay



Source : EnOcean

B. Multon et al

Ressources mécaniques

Mouvements humains :

- volontaires : pédaler, tourner une manivelle, tirer...
- naturels : efforts sous les pieds, articulations, pendulations...
(fréquences faibles)

Vibrations mécaniques dans l'environnement (machines...) :

caractérisées en fréquence et accélération $x = X_M \sin(\Omega t)$

$$\ddot{x}_M = X_M \cdot \Omega^2$$

Vibrations acoustiques :

Seuil d'audition : 1 pW/m²

Bruit de 100 dB : 10 mW/m²

B. Multon et al

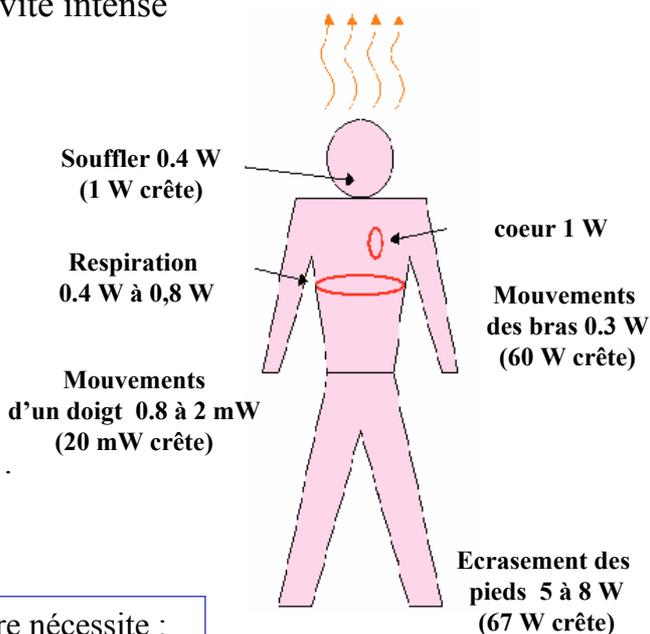
Ressources humaines

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

Un **cycliste** entraîné peut atteindre
 une puissance mécanique de :
100 W permanents
350 W en pointe

Mais faible **rendement**
 de conversion mécanique : **environ 20%**
 pour 200 W mécaniques :
 plus de 800 W de chaleur et de la fatigue...

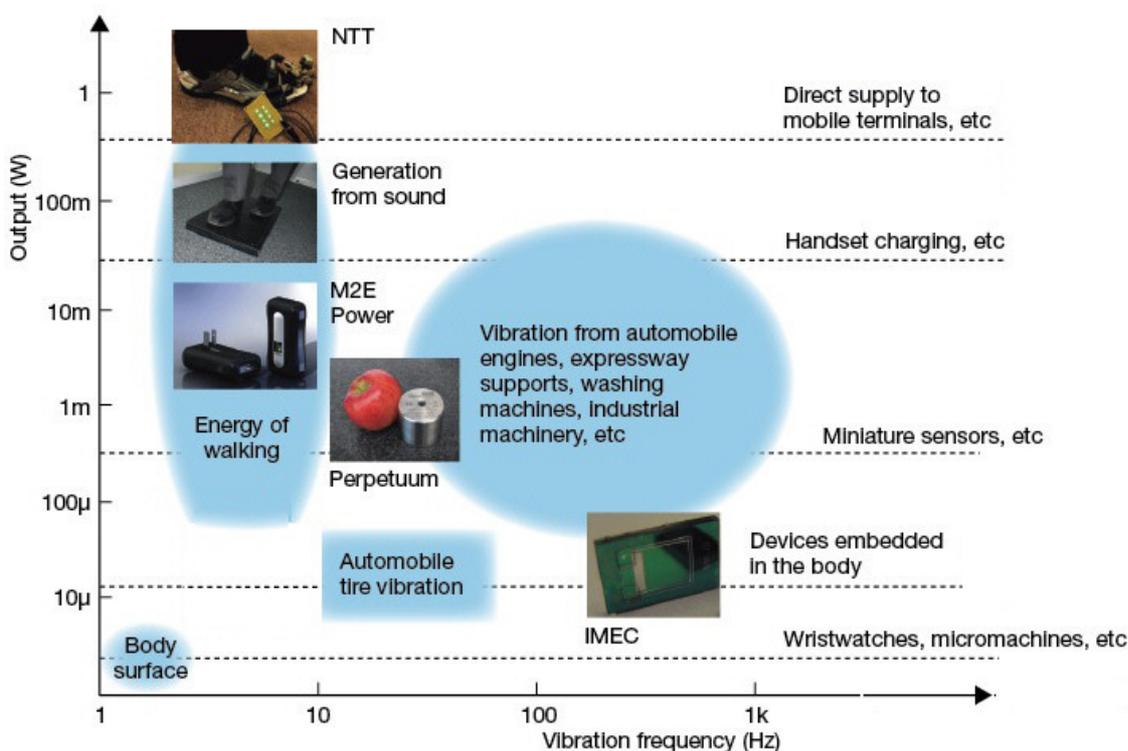
Produire 100 W en pédalant pendant 1 heure nécessite :
 360 kJ mécaniques
 1,8 MJ calorifiques ou 430 kcal (soit 100 grammes de pâtes)



Human-Powered Wearable Computing - Starner 1996

B. Multon et al.

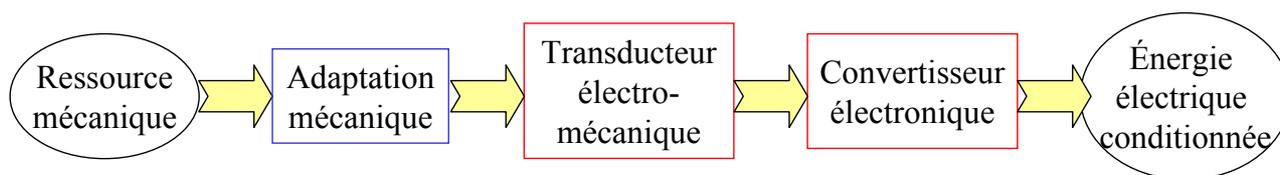
Vibrations : ressources et récupération



Source : Nikkei Electronics Asia , feb. 2009

B. Multon et al.

Principes de conversion électro-mécanique



Pas de limite thermodynamique pour convertir

l'énergie mécanique en électricité avec de bons rendements :

- **convertisseurs électromagnétiques (à aimants)**
- **conv. Electrostatiques (capacité variable)**
- **conv. piézoélectriques**
- autres matériaux électro-actifs (magnétostrictifs)

B. Multon et al

Convertisseurs électromagnétiques

En grandes puissances : les rendements tendent vers 100%

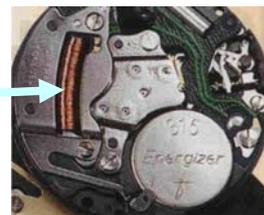
En petites puissances,

ils diminuent lorsque le dimensionnement est thermique,
mais peuvent être élevés :

- si la fréquence et/ou la vitesse de rotation sont élevées
- si on augmente la quantité de matière active (cuivre, fer, aimant)
(réduction de la densité de pertes)
- si on soigne la qualité :
bon remplissage en cuivre,
faible entrefer...

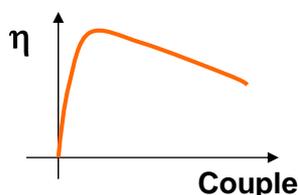
Ex. : moteur de montre : $100 \mu\text{W}$ $\eta \cong 99\%$

(fonctionnement en pas à pas)



Allure générale du rendement :

(Pertes fonction du couple et de la vitesse)



B. Multon et al

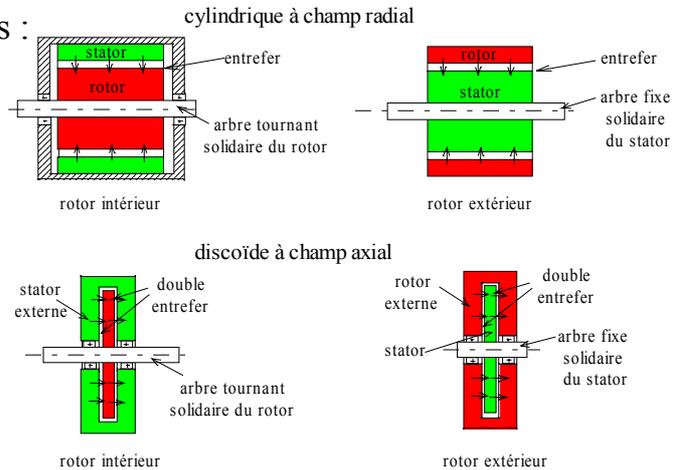
Convertisseurs électromagnétiques

Différents principes :

- synchrones à aimants : à collecteur mécanique ou électronique
- à réluctance variable (pas d'aimants et peu performants en petite dimensions)
- asynchrones (idem)
(RV et asynchrones peuvent être performants avec de très grandes vitesses)

et différentes architectures possibles :

- tournantes

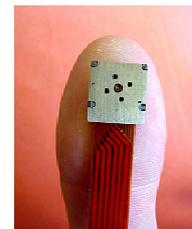
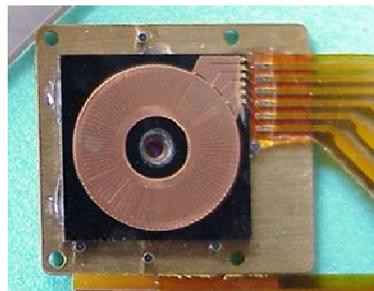
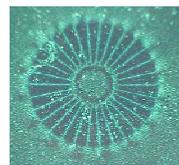
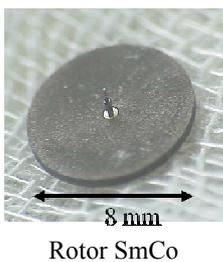


- linéaires

(mais difficile d'avoir des mouvements rapides et de bons rendements en petites dimensions)

B. Multon et al

Exemple de générateur rapide discoïde à champ axial (planaire)



Forces électromotrices triphasées à 50 000 tr/min

Caractéristiques :

(avec 4 conducteurs par pôle et par phase)

Épaisseur cuivre : 20 μm

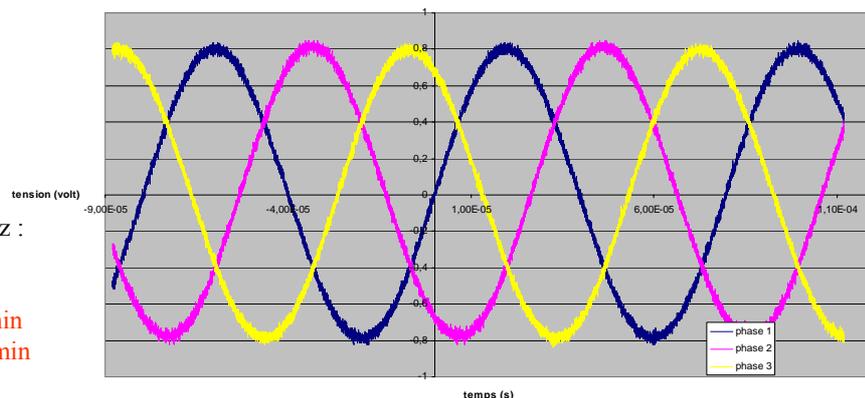
Résistance de phase : 5 Ω

Inductance de phase : 0,6 μm

Même à 60 000 tr/min et 15 kHz :

$$L\omega \cong 0,06 \Omega \ll R$$

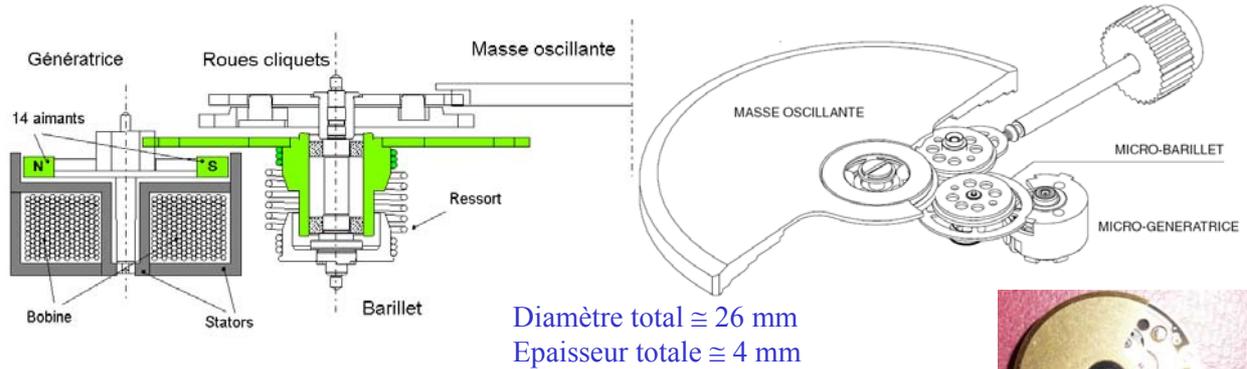
Rendement : 15% à 60 000 tr/min
30% à 140 000 tr/min



Source : J. DELAMARE, 2002 LEG/G2ELab/LETI

B. Multon et al

Un exemple de chaîne de conversion électromécanique : le système Autoquartz

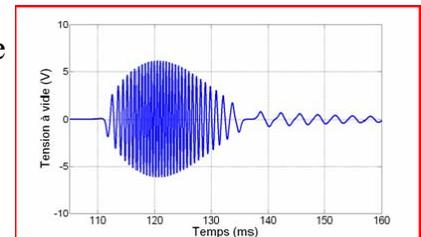


Le ressort se charge à travers un multiplicateur à engrenages ($m = 1,6$) sous l'effet des rotations partielles de la masselotte (220 g.mm^2)

Le ressort est couplé au rotor de la génératrice à travers un autre multiplicateur ($m=5$)

Lorsque le couple maximal de détente est atteint ($\cong 10 \mu\text{N.m}$)

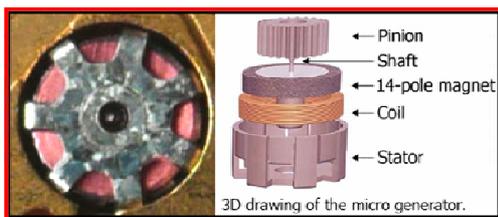
=> décharge du ressort à une vitesse de rotation bien optimisée



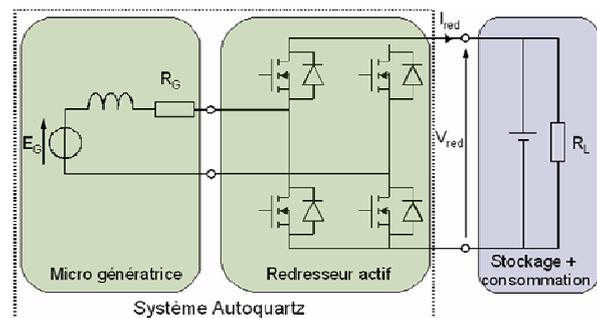
Source : M. Lossec *et al*, EF 2009

B. Multon *et al*

Un exemple de chaîne de conversion électromécanique : le système Autoquartz



Diamètre : 4 mm
Hauteur : 2,2 mm
Rotor aimants SmCo : $2p = 14$
1100 spires
Flux maxi $\cong 0,6 \text{ mWb}$
Résistance $\cong 300 \Omega$



Redresseur actif à MOS : 30Ω

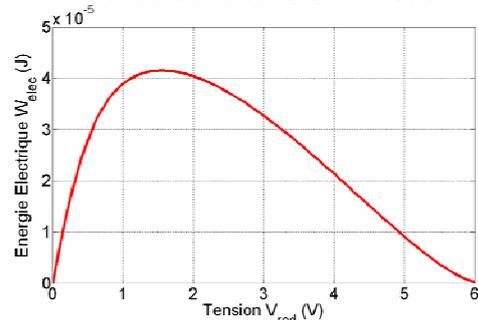
Vitesse de rotation lors de la décharge : 5 à 10 000 tr/min

Ordres de grandeurs:

- énergie accumulée dans le ressort: **$100 \mu\text{J}$**
- durée d'une décharge: **50ms**
- fréquence de répétition des décharges: **0.2Hz**
- rendement global de conversion : **30%**

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

Influence de la tension du bus DC



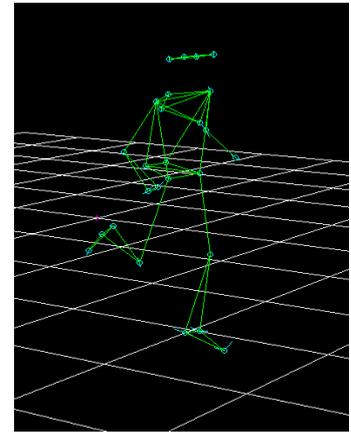
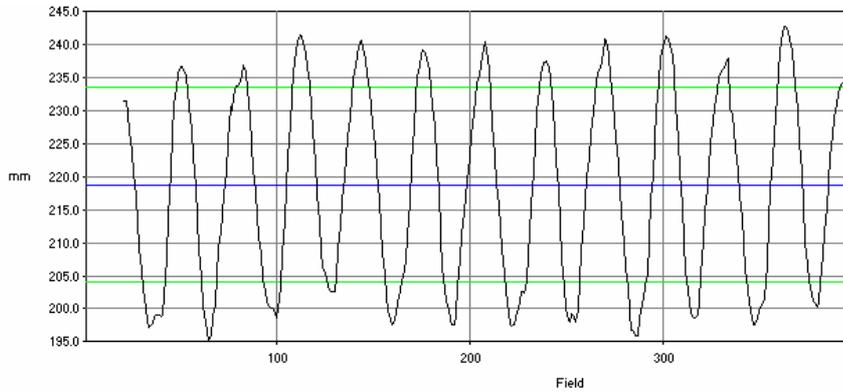
Source : M. Lossec *et al*, EF 2009

B. Multon *et al*

Générateur portable fonctionnant à partir des mouvements naturels de la marche

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

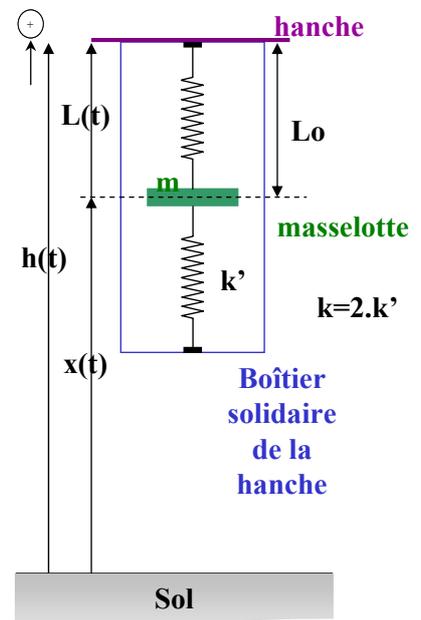
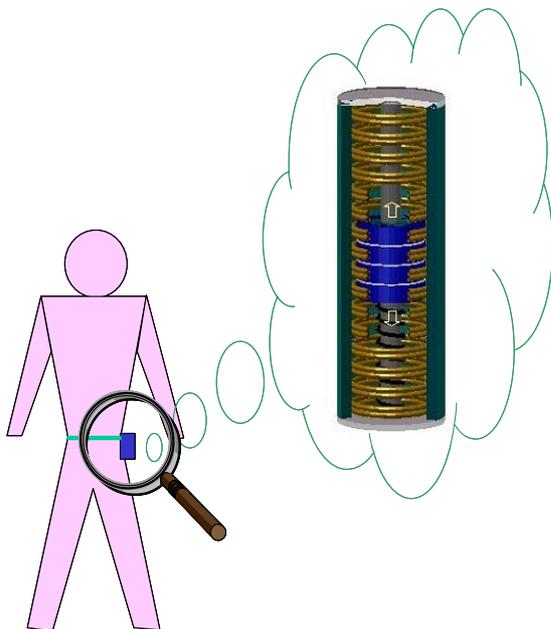
- amplitude : 10 cm
- fréquence : 5 Hz

La fréquence des oscillations varie peu : 2 à 3 Hz

B. Multon et al.

Structure électromécanique directe à mouvement linéaire oscillant

Principe et modélisation :



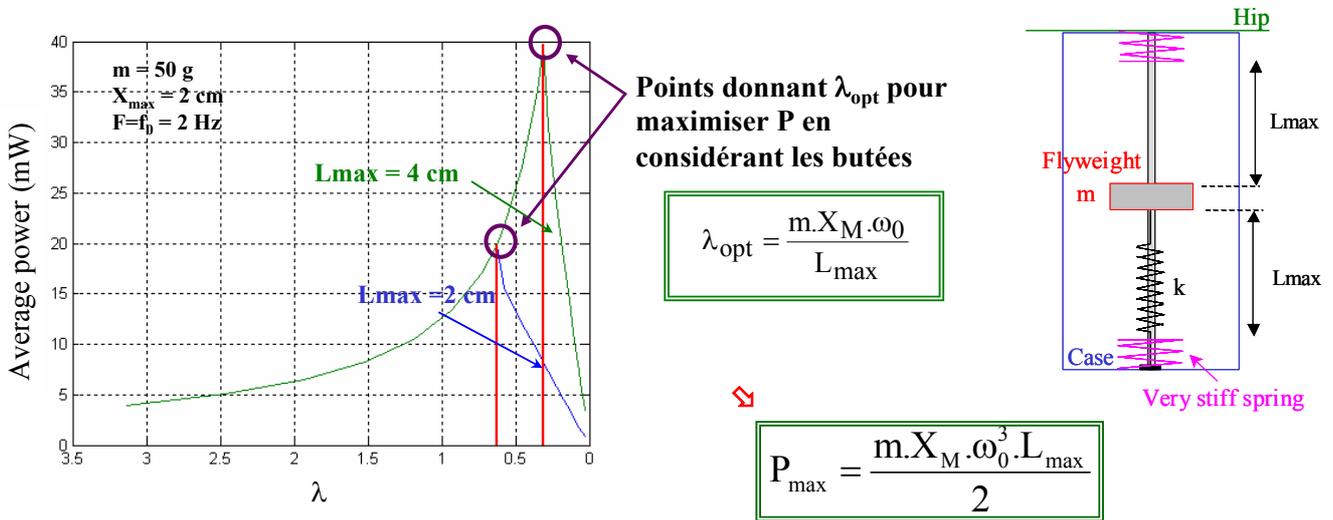
B. Multon et al.

Récupération du maximum de puissance

X_M = amplitude de l'excitation

À la pulsation propre (résonance) : $\omega_{step} = \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow P_{max} = \frac{F_M}{2\lambda}$ amplitude de la force d'excitation appliquée au système
 $F_M = m \cdot X_M \cdot \omega_0^2$

Il existe une valeur optimale de λ (amortissement) pour maximiser la récupération de puissance :



Source : S. Turry et al, EPE 2003

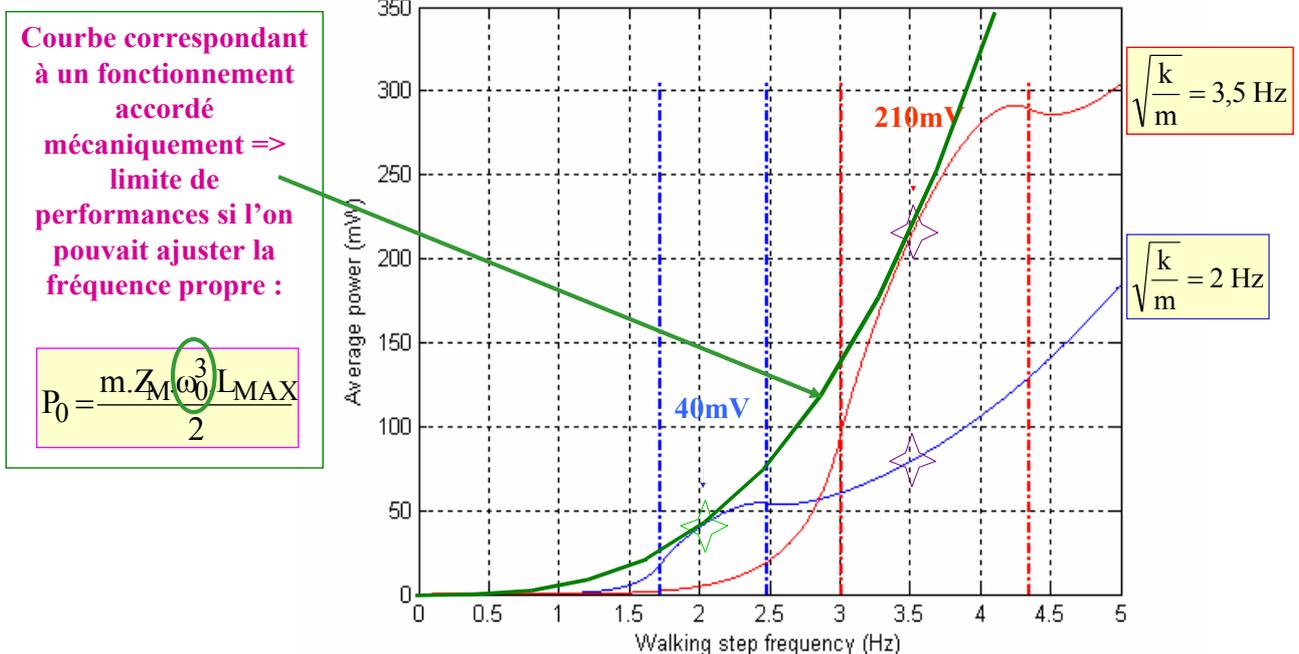
B. Multon et al

Effets de la fréquence d'excitation et de résonance (simulations) :

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

$m = 50$ g

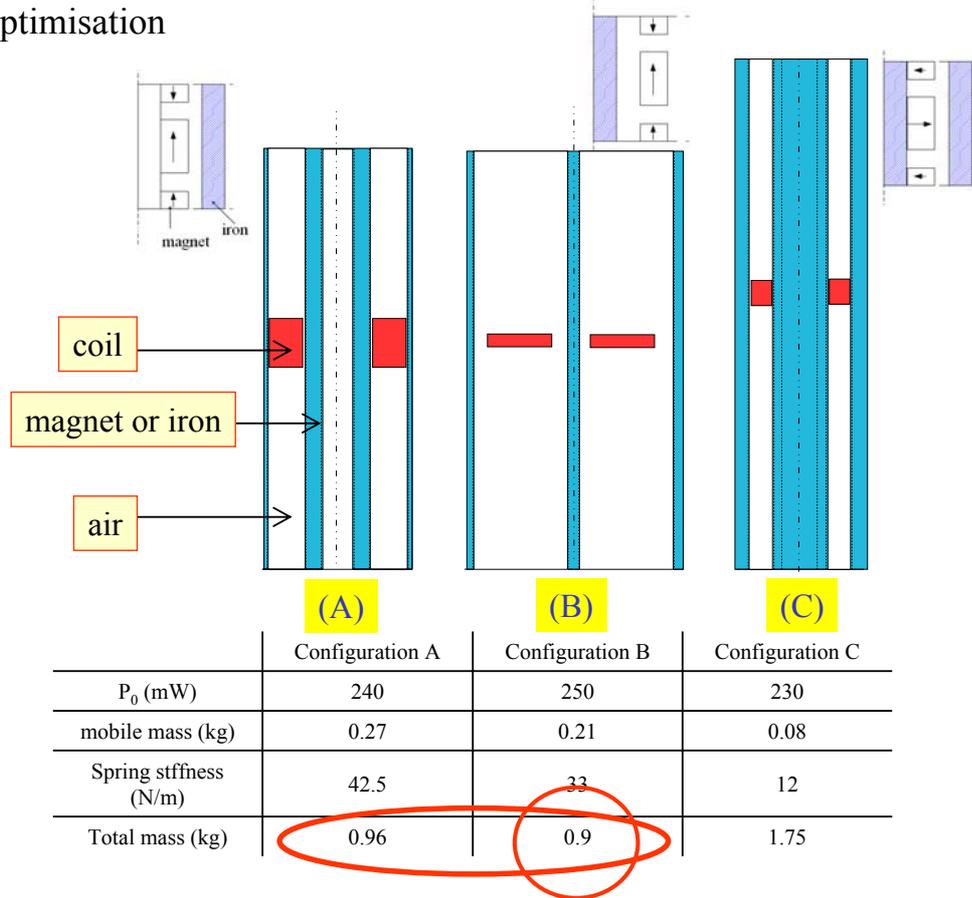
débattement ± 4 cm



Source : M. Ruellan et al, IEEE IAS 2005

B. Multon et al

Comparaison d'architectures électromagnétiques à bobine mobile, résultats d'optimisation



Source : M. Ruellan *et al*, IEEE IAS 2005

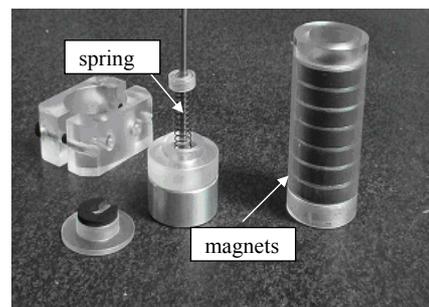
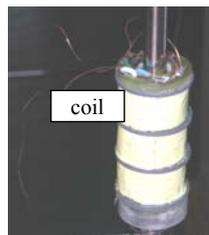
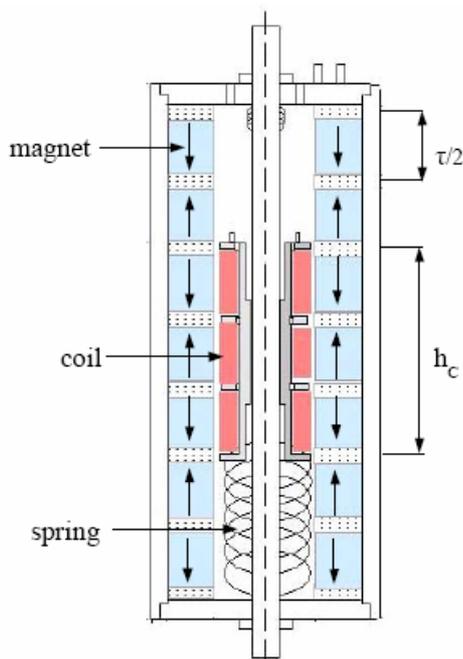
B. Multon *et al*

Prototype :

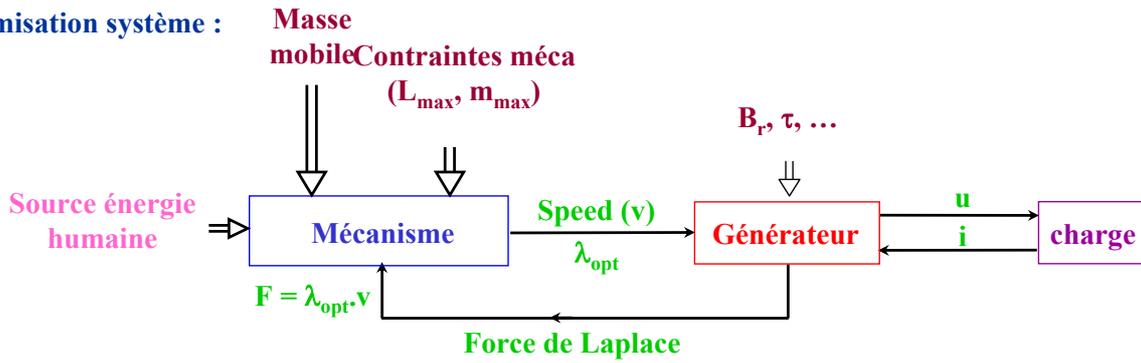
Configuration (B) :

- axially magnetized permanent magnet with ferrite permanent magnet ($M = 0.39$ T)
- single phase coil
- stiffness of 106 Nm^{-1}
- mobile mass of 50g

$$\left. \begin{array}{l} \text{stiffness of } 106 \text{ Nm}^{-1} \\ \text{mobile mass of } 50\text{g} \end{array} \right\} f_0 = 7,3 \text{ Hz}$$



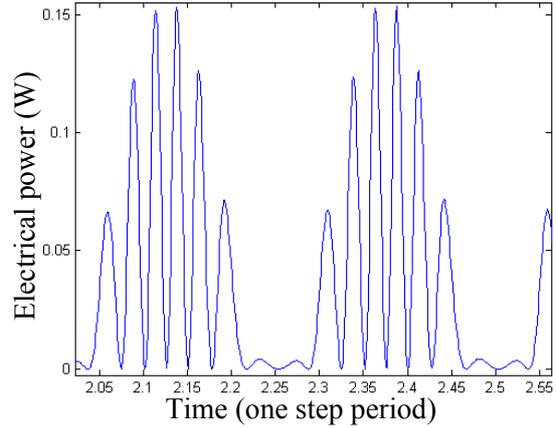
Optimisation système :



Exemple :

Marcheur : $f_{step}=2\text{Hz}$; 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 ;
 $R_c=16\ \Omega$; $R_{Load}=3.9\ \text{k}\Omega$
 $\Rightarrow E = 25\ \text{V}$; $I = 4.5\ \text{mA}$

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

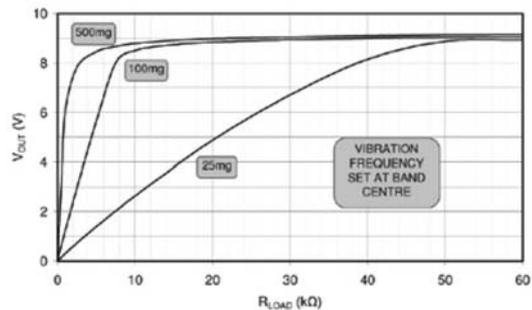
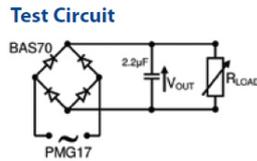


B. Multon et al.

Exemple commercial :
générateur récupérateur de mouvements vibratoires Perpetuum

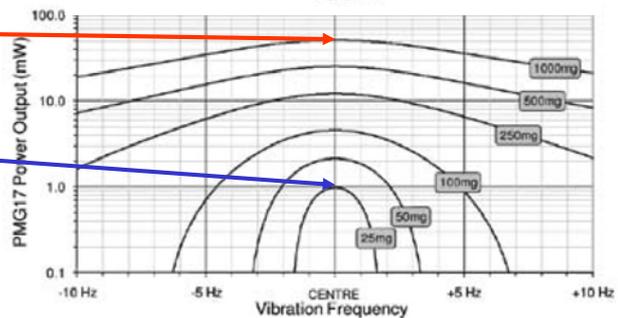
PMG17 Vibration Energy Harvester
 avec carte électronique de stockage
 par supercondensateurs CAP-XX

Diam : 55 mm – H : 55 mm - 655 grammes
Optimisé pour des vibrations à 100 Hz (ou 120 Hz)



@ 1 g
 et 100 Hz
 ($\approx 25\ \mu\text{m}$)
 $P_{max} = 45\ \text{mW}$

@ 0,025 g et 100 Hz
 ($\approx 0,62\ \mu\text{m}$)
 $P_{max} = 1\ \text{mW}$



Source : <http://www.cap-xx.com> et <http://www.perpetuum.com/>

B. Multon et al

Transducteurs piézo-électriques

Effet piézoélectrique :

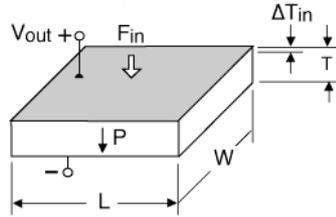
bien adapté aux efforts élevés,
ou aux phénomènes vibratoires

En mode générateur :

contrainte mécanique

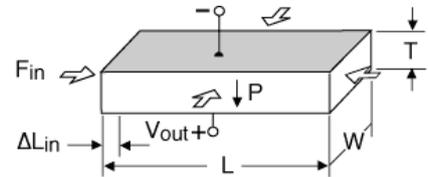
=> champ électrique

Mode longitudinal : d33



Source : Piezo Systems Inc.

Mode transverse : d31



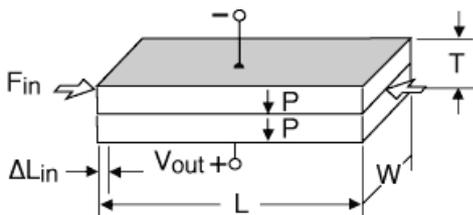
Charge électrique : $Q = d_{3i} \cdot F \cdot S$ d_{3i} en C/N ou m/V (S = L.W section)

Force électromotrice : $f.e.m. = g_{3i} \cdot F \cdot T$ g_{3i} en V.m/N ou m²/C (T = épaisseur)

B. Multon et al

Bimorphes (deux films piezo) mode d31 :

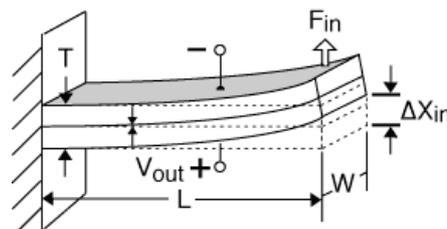
Mode transverse



Source : Piezo Systems Inc.

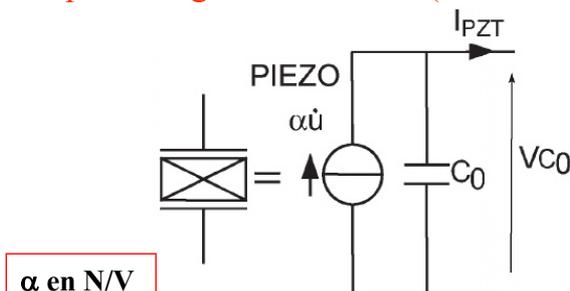
$$\begin{aligned} f.e.m. &\propto \Delta L_{in} \\ I_{cc} &\propto L \times W \\ \Delta L_{max} &\propto L \end{aligned}$$

Mode cintrage



$$\begin{aligned} f.e.m. &\propto L^2 \\ I_{cc} &\propto L \times W \\ \Delta X_{max} &\propto L^2 \end{aligned}$$

Modèle électrique en régime vibratoire (la variable d'entrée est le déplacement) :



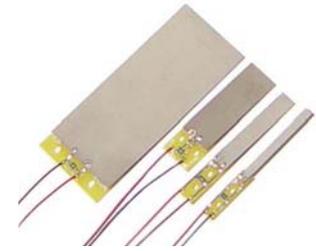
$$i_{PZT} = \alpha \cdot \frac{du}{dt} - C_0 \cdot \frac{dv_{c0}}{dt}$$

u(t) = déplacement

α en N/V

dépend des dimensions et des propriétés piézoélectriques

Matériaux piézoélectriques



Source : Piezo Systems Inc.

Matériaux actuellement les mieux adaptés :

- céramiques : Plomb Zirconium Titanate (PZT)

déformations de l'ordre de 0,1 %

Coefficient $d_{33} : \cong 200 \text{ à } 800 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$ (charge en ct-ct)

Coefficient (f.e.m.) $g_{33} : \cong 10 \text{ à } 20 \cdot 10^{-3} \text{ V.m/N}$

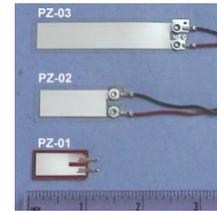
pertes diélectriques $\text{tg}\delta \cong 0,02$

- polymères, moins rigides, polyvinylidène difluoré (PVDF)

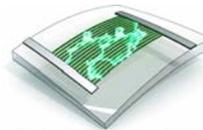
Coefficient $d_{33} : \cong -20 \text{ à } 30 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$ (charge en ct-ct)

Coefficient (f.e.m.) $g_{33} : \cong -200 \text{ à } 300 \cdot 10^{-3} \text{ V.m/N}$

pertes diélectriques $\text{tg}\delta \cong 0,2$



- PZT sur PDMS (polymère) => souple

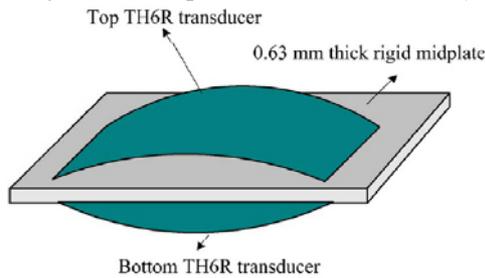


Source : Univ. de Princeton 2010

B. Multon et al

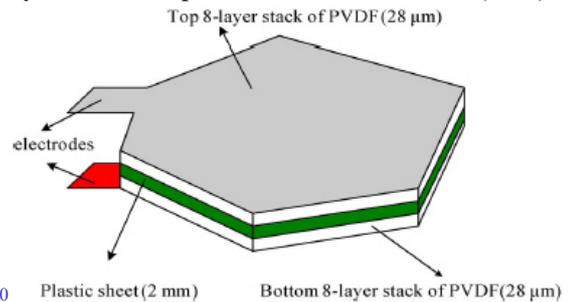
Structures mécaniques pour exploitation de fortes pressions

Système PZT pour talon de chaussure (MIT)

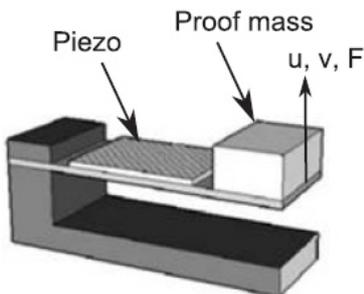


Source : Khaligh et al IEEE trans IE march 2010

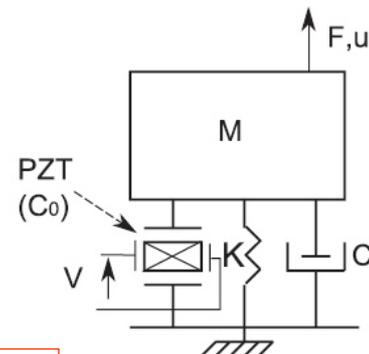
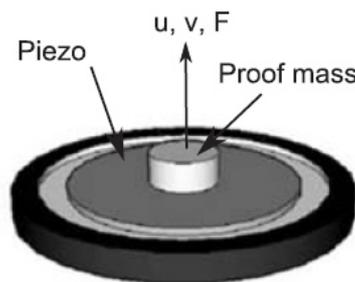
Système PVDF pour semelle de chaussure (MIT)



Structures mécaniques pour exploitation de sources vibratoires



Structure cantilever

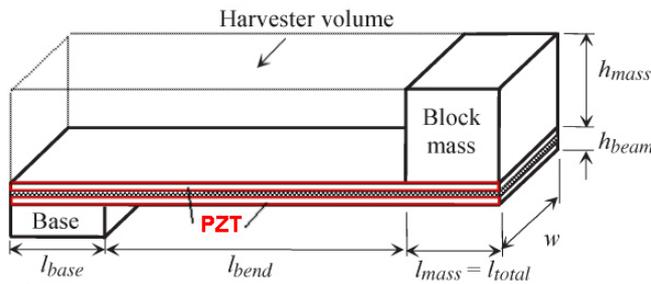


$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$$

Source : Guyomar et al Journal of Intelligent Material Systems and Structures_2009

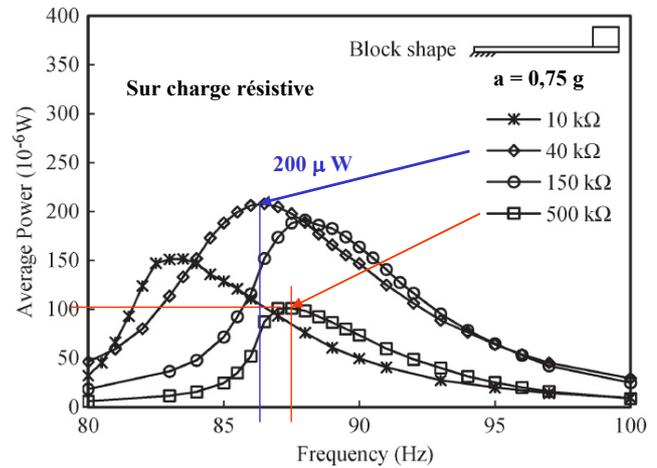
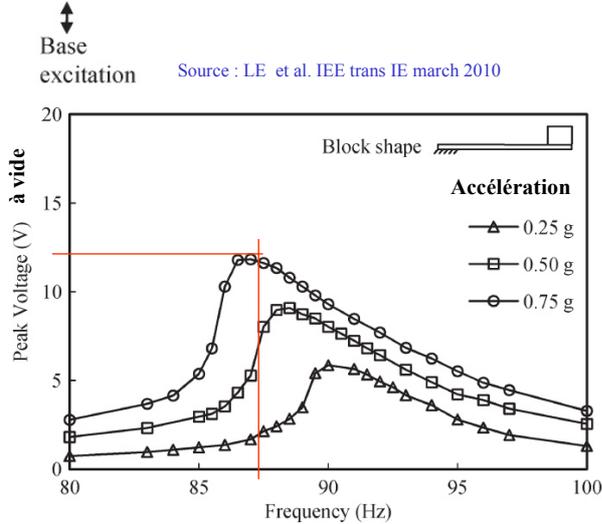
B. Multon et al

Caractéristiques de récupération d'une structure cantilever piézoélectrique



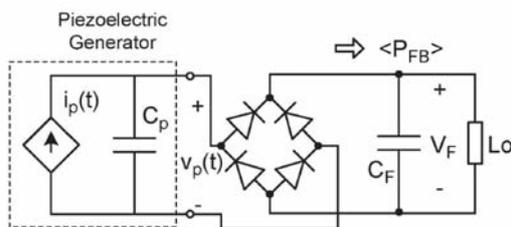
Volume total : 0,24 cm³ (22x3,5x2mm)
 Masse du bloc : 0,554 grammes
 $f_0 = 86$ Hz

PZT
 T215-H4-103Y Piezo Systems Inc.
 32 x 3,2 mm² x 0,139 mm



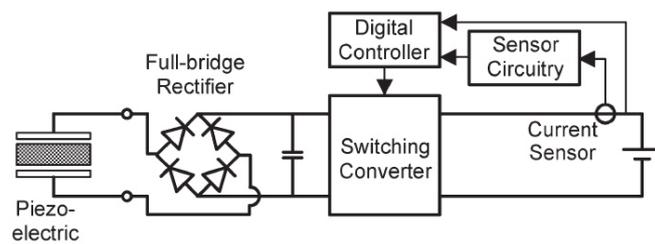
B. Multon et al

Chaînes de conversion électrique

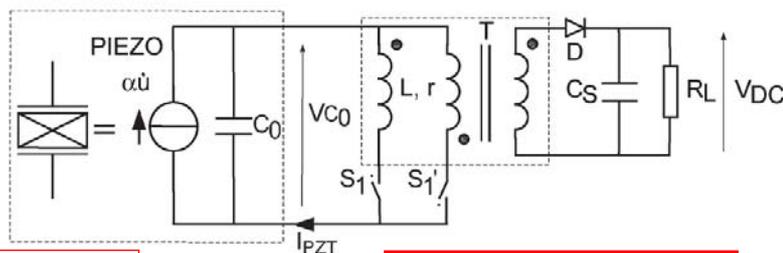


Source : Tabesh et al. IEEE trans IE march 2010

Optimisation de la récupération



Modèle électrique du générateur piézo et conversion efficace



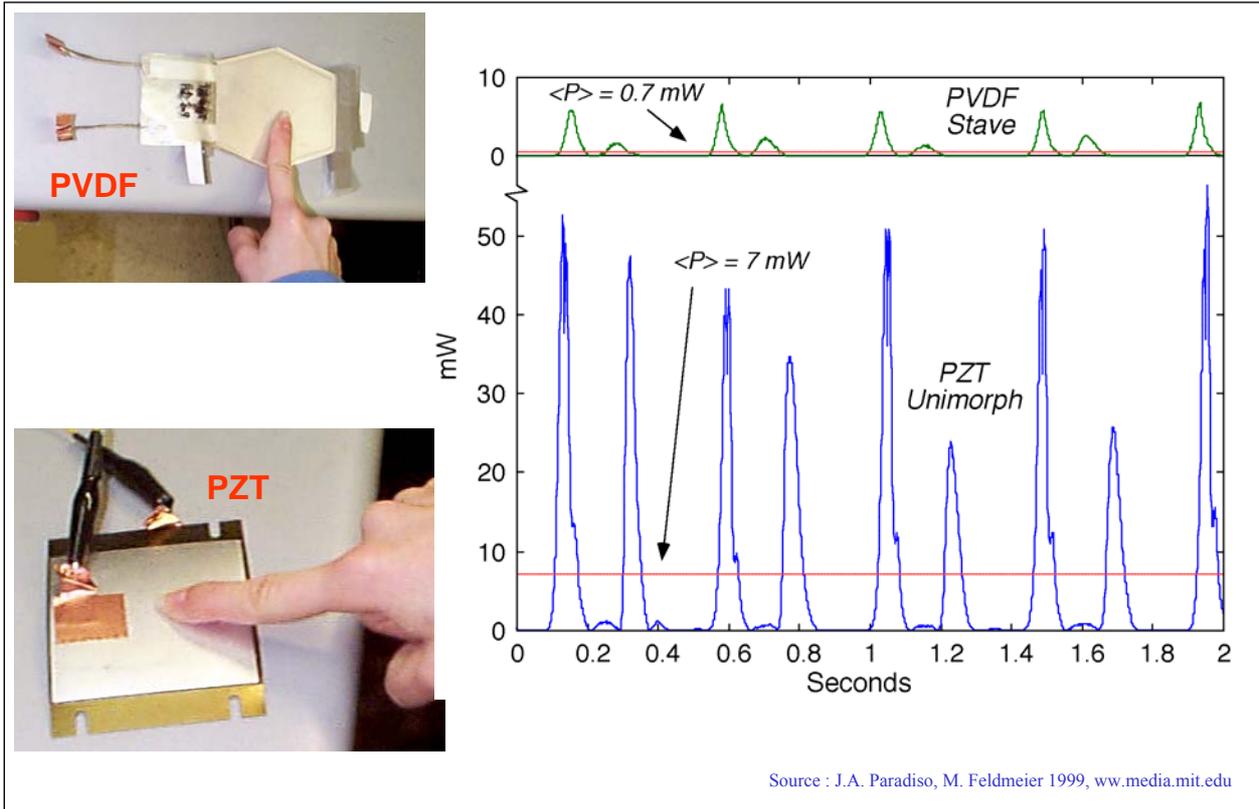
α en N/V

$$i_{PZT} = \alpha \cdot \frac{du}{dt} - C_0 \cdot \frac{dv_{c0}}{dt}$$

Source : Guyomar et al Journal of Intelligent Material Systems and Structures_2009

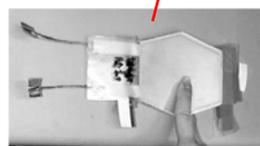
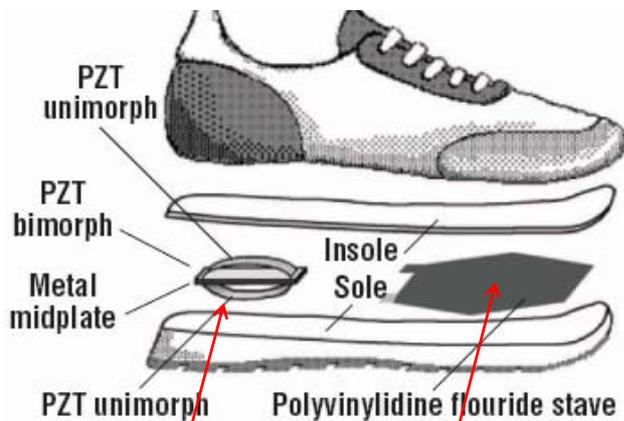
B. Multon et al

Exemples



B. Multon et al

Chaussures piezoélectrique avec convertisseur électronique, élément de stockage et émetteur radio 300MHz
 Rendement global : **17%**



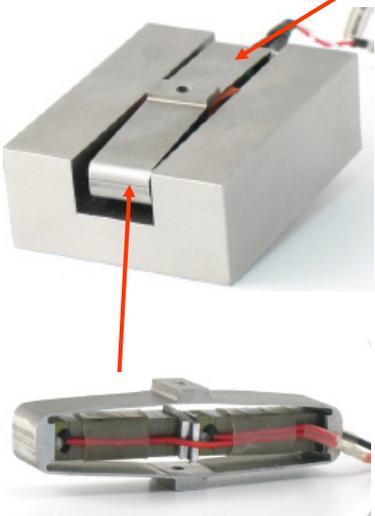
Talon: $P_{\text{moy}} = 8.3 \text{ mW}$
 Doigts de pied: $P_{\text{moy}} = 1.3 \text{ mW}$

Source : J.A.Paradiso, M.Feldmeier 1999, www.media.mit.edu

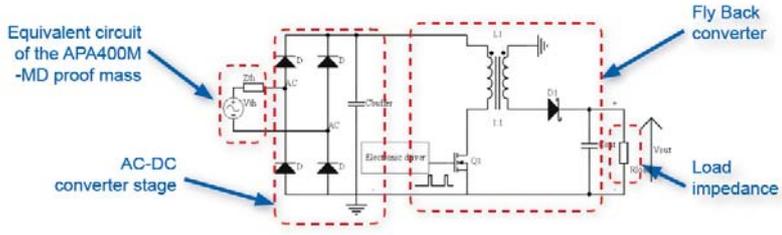
Exemple commercial : générateur récupérateur de mouvements vibratoires CEDRAT

VEH-APA 400M-MD

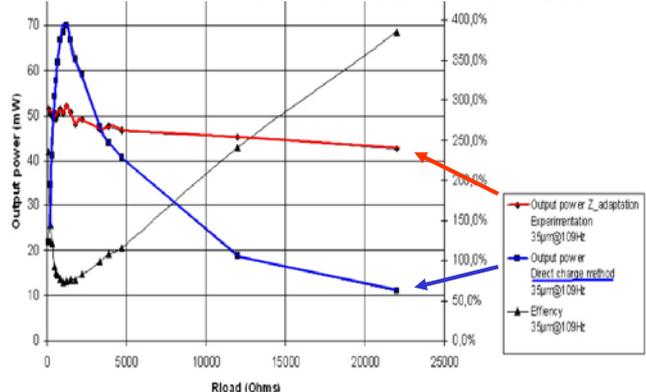
Dimensions de la masselotte : 50x32x22 – 270 grammes
Optimisé pour vibrations à 110 Hz – 45 μm_{pp} (1,1 g)



Equivalent circuit of the APA400M -MD proof mass



Schematic view of the AC-DC & DC-DC electronic



Source : <http://www.cedrat.com>

B. Multon et al

Exemples

Source : EnOcean www.enocean.com

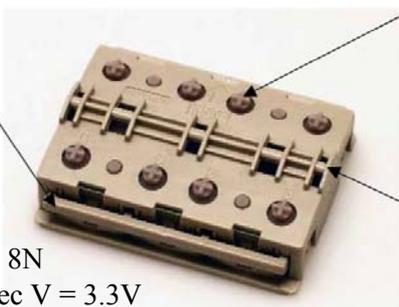
Interrupteurs autonomes sans fils

Pastille PZT diam. 5 mm
 Épaisseur 15 mm
 Déformation qq microns sous 100 N



Télécommande sans piles

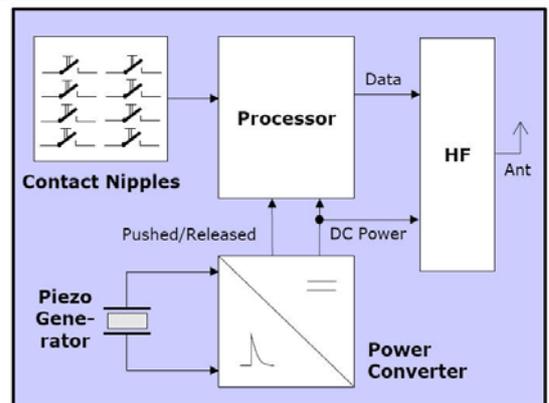
(1) Energy bow on both module sides



(2) Soft rubber contact nipples for switch rocker identification

Rotation axis for pushbuttons or switch rocker

Impulsion de 8N
 $\Rightarrow 100 \mu\text{J}$ avec $V = 3.3\text{V}$



B. Multon et al

Transducteurs électrostatiques

Adaptés aux faibles dimensions :

« facilement » intégrables sur silicium

bénéficient d'effets d'échelle favorable :

(par rapport aux transducteurs électromagnétiques)

pas de pertes associées au maintien d'une force

champ de claquage élevé pour les faibles « entrefers » (loi de Paschen)

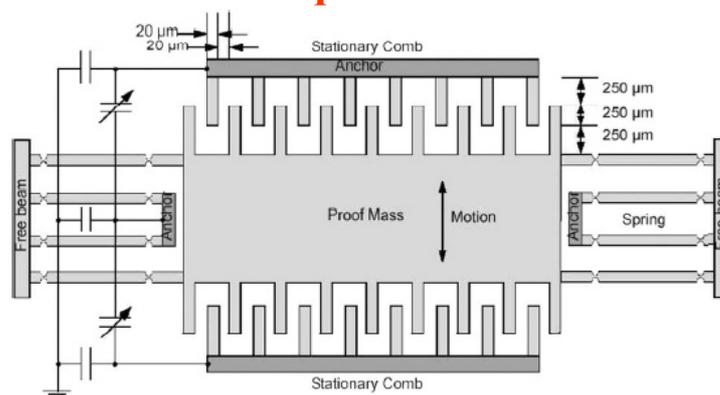
Structures à capacité variable similaire à celles à inductance variable

Analogie

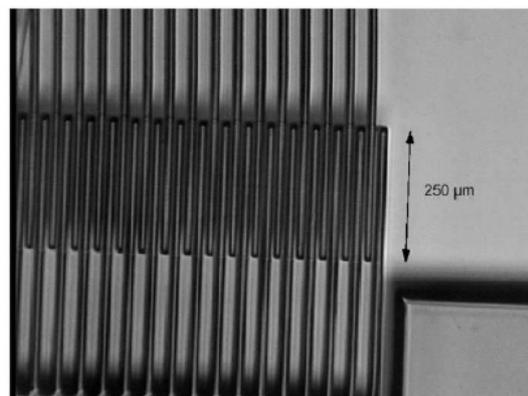
électromagnétique	L (H)	I (A)	ϕ (Wb)	$e = \frac{d\phi}{dt}$	$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2$	$F = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{dx}$	Pertes Joule	Pertes magnétiques
électrostatique	C (F)	U (V)	Q (C)	$i = \frac{dQ}{dt}$	$W = \frac{1}{2} C \cdot U^2$	$F = \frac{1}{2} \cdot U^2 \cdot \frac{dC}{dx}$	---	Pertes diélectriques

B. Multon et al

Transducteurs électrostatiques



6 à 8 μW



Transducteurs électrostatiques

Comparison of electrostatic energy harvesters.

Author [reference]	Year	Operating frequency f (Hz)	Device area A (mm ²)	Operation voltage (V)	Converted power P_h (μW)	Figure of merit (FOM) $P_h/(U^2 fA)$, $(10^8 \mu\text{W}/(\text{mm}^2 \text{Hz V}^2)^{-1})$
Despesse <i>et al</i> [5]	2005	50	1800	120	1050	80
Yen <i>et al</i> [16]	2006	1560	4356	6	9.47 ^a	4
Tsutsumino <i>et al</i> [20]	2006	20	200	950 (electret)	37.7	1
Ma <i>et al</i> [45]	2007	4100	25.9	15 ('electret like')	0.065	0.3
Suzuki <i>et al</i> [22]	2008	37	234	450 (electret)	0.28	2×10^{-3}
This work [27]	2008	250	66	8	0.061	6
Hoffmann [46]	2008	1460	30	50	3.8	4

↑
1 à 80 $10^{-8} \mu\text{W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{Hz} \cdot \text{V}^2)$

Source : Basset et al, JMM 2009

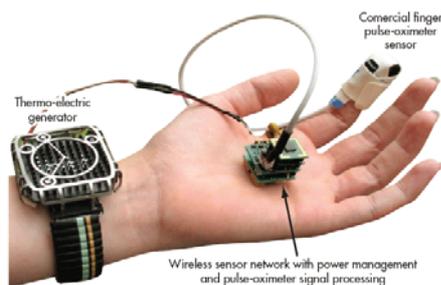
B. Multon et al



Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie UMR - 8029



Conversion thermoélectrique



Source : Leonov, IMEC, Electronic Design



Source : Heat2power

B. Multon et al

Sources de chaleur

Emission du corps humain

La température du corps est régulée à environ 37°C.

Si $T_{\text{amb}} < T_{\text{peau}}$: flux de chaleur vers l'extérieur $\frac{P}{S} = h.(T_{\text{peau}} - T_{\text{amb}}) \text{ W/m}^2$

Ordre de grandeur :

dans l'air au repos : $h \cong 8 \text{ W/(m}^2.\text{°C)}$, ainsi pour un écart de 15°C (ambiance à 22°C), la peau dissipe 120 W/m² ou **12mW/cm²**

Les vêtements limitent la puissance dissipée en augmentant la température « ambiante »

Autres sources :

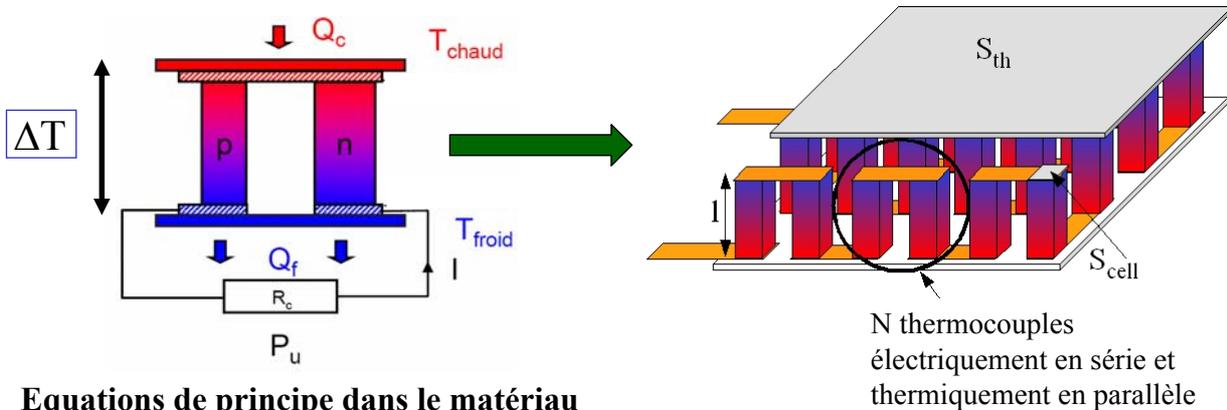
- Pertes des machines thermodynamiques
- Chaleur solaire captée...

B. Multon et al

Thermoélectricité :

conversion directe (et statique) de la chaleur en électricité (effets Seebeck et Peltier)

Du thermocouple au module thermoélectrique



Equations de principe dans le matériau

$$\begin{cases} \vec{E} = \rho \cdot \vec{J} + \alpha \cdot \vec{\nabla} T \\ \vec{Q} = \pi \cdot \vec{J} - \lambda \cdot \vec{\nabla} T \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} \rho : \text{resistivité électrique } (\Omega.m) \\ \alpha : \text{coefficient de Seebeck du couple } (V.K^{-1}) \\ \pi : \text{coefficient de Peltier du couple } (V) \\ \lambda : \text{conductivité thermique } (W.m^{-1}.K^{-1}) \end{cases}$$

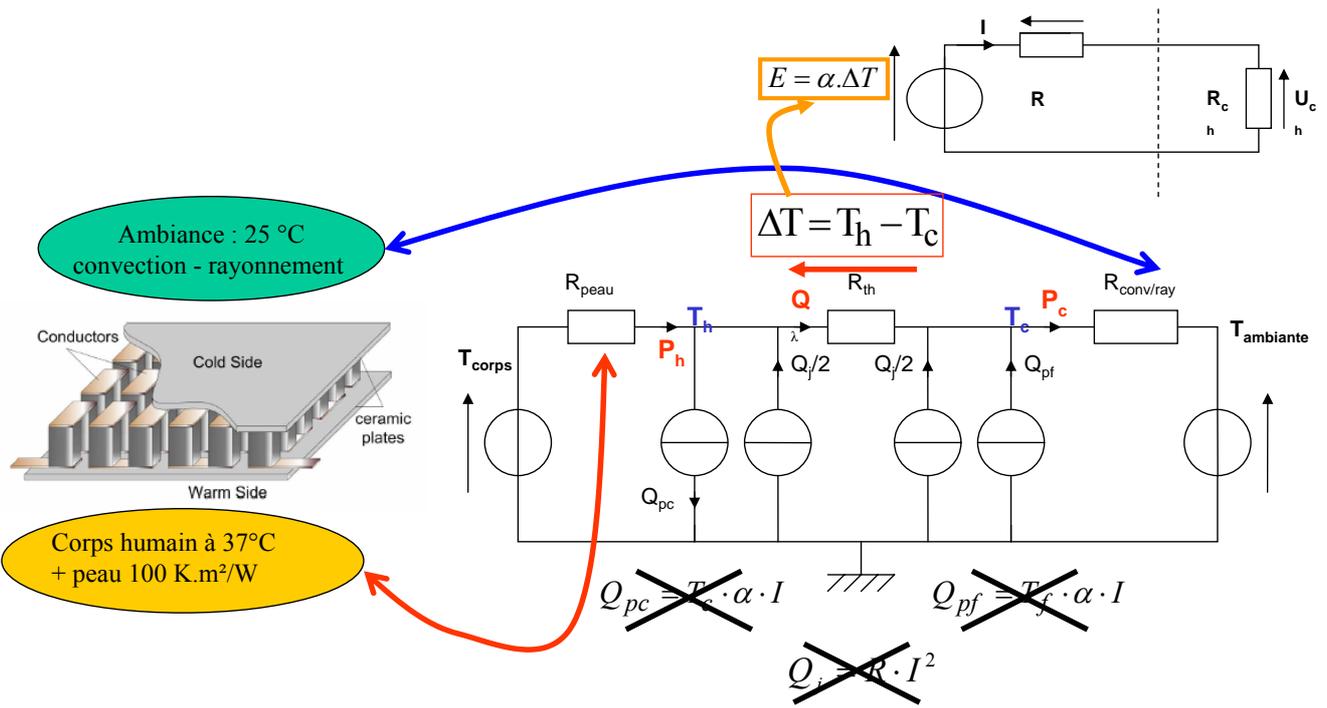
$\alpha = \alpha_n + \alpha_p$

Champ électrique \vec{E}
Flux de chaleur \vec{Q} W/m²
Gradient de température $\vec{\nabla} T$

Source : M. Lossec, M2R 2008

B. Multon et al

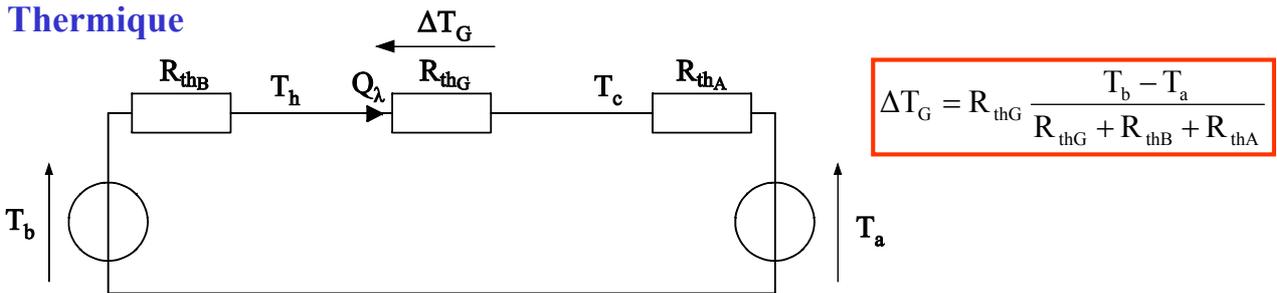
Schéma thermo-électrique équivalent, simplifications dans le cas de la production par le corps humain



B. Multon et al

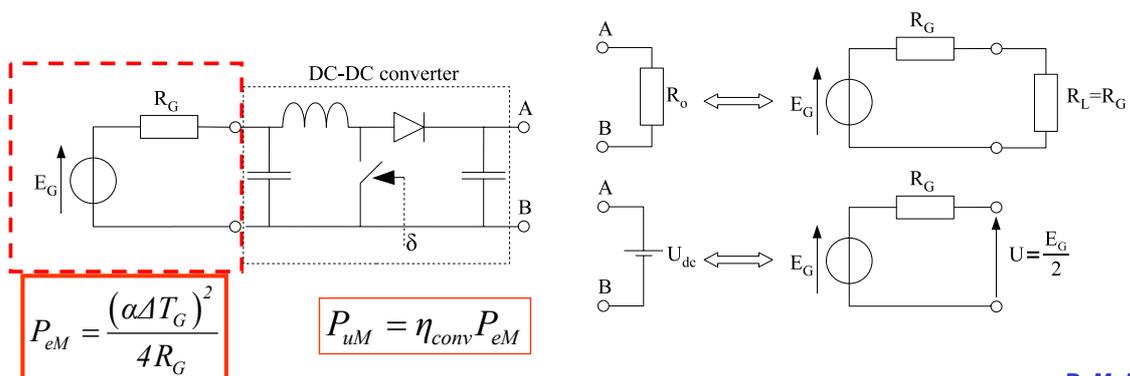
Schémas thermique et électrique simplifiés et équations associées

Thermique



Electrique

Maximisation de la puissance électrique



B. Multon et al

Optimisation du thermogénérateur

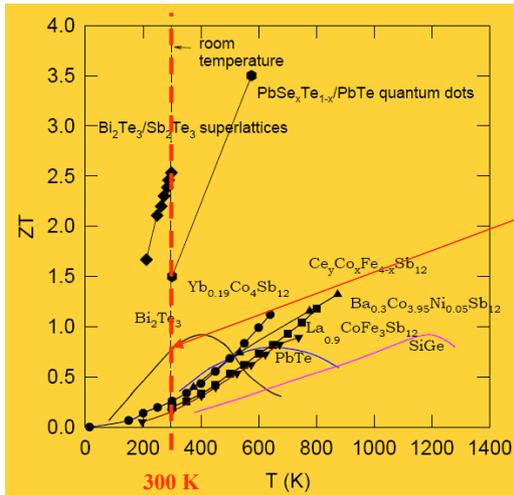
Si l'on cherche à **maximiser le rendement** c'est-à-dire le rapport $\eta_{TG} = \frac{P_e}{Q_h}$

alors il faut maximiser le produit $Z.T$ avec T la température moyenne

$$\eta_{TGM} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + 1}$$

$$Z = \frac{\alpha^2}{4 \cdot \rho \cdot \lambda} \quad \alpha = \alpha_n + \alpha_p$$

Facteur de mérite $Z.T$ des matériaux thermoélectriques :



Tellurure de Bismuth

$Z = 2,7 \text{ mK}^{-1} @ 300 \text{ K} (ZT \approx 0,8)$

Si $\Delta T = 15^\circ\text{C} : \eta_{TGM} \approx 2\%$

$$\eta_{TGM} \approx \frac{\alpha^2 \Delta T}{\rho \lambda 2}$$

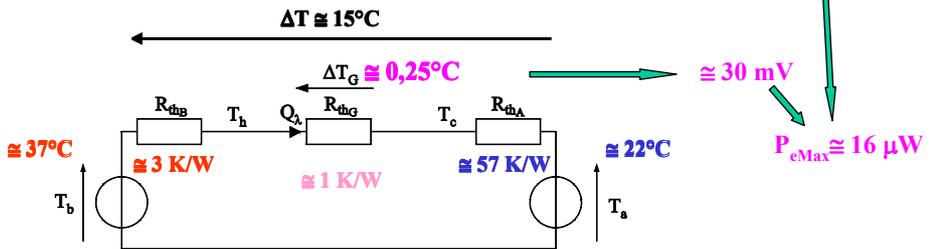
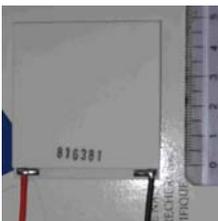
Mais $\Delta T \ll 15^\circ\text{C} !!$
 À cause du mauvais couplage thermique à l'environnement
 La notion de rendement n'est pas pertinente.

Source : Heat2power

B. Multon et al

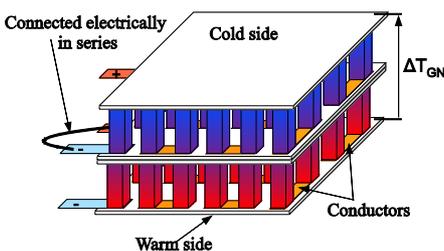
Performances obtenues avec un module Ferrotec TMG-241-1.4-1.2

$\approx 54 \times 54 \text{ mm}^2$ 450 thermocouples $\alpha_{\text{global}} = 0,12 \text{ V/K}$ $R_G = 14 \Omega$

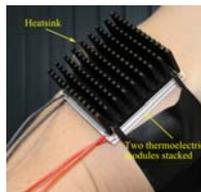


Améliorations :

1- Empilage de modules



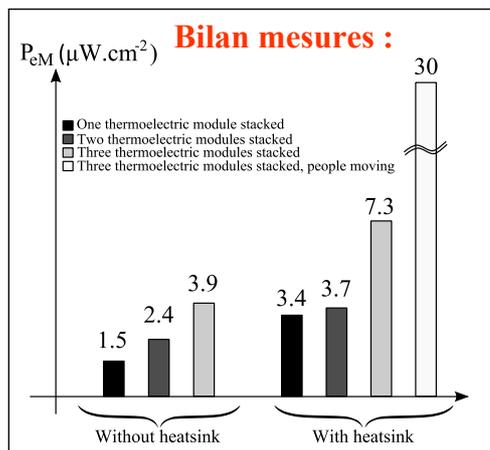
2- Dissipateur



3- Mouvements

4- Allongement des thermocouples, ici 55 mm (au lieu de 1,5)...

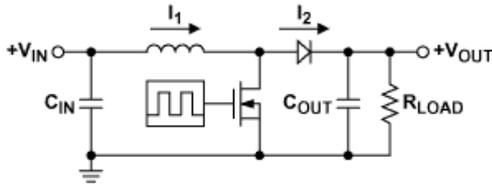
5- Meilleure optimisation du matériau : ne plus maximiser $Z = \alpha^2 / \rho \cdot \lambda$ mais $\alpha^2 / \rho \cdot \lambda^2$



B. Multon et al

Conversion DC-DC très basse tension

Une difficulté : élever de très basses tensions avec un bon rendement

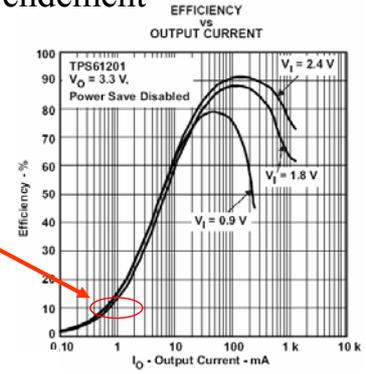


TPS61201 (0,5 V mini)

mal adapté

à ce niveau de puissance :

à 100 μ W $\eta < qq\%$

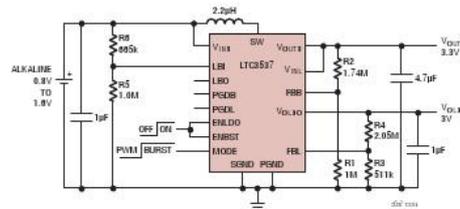
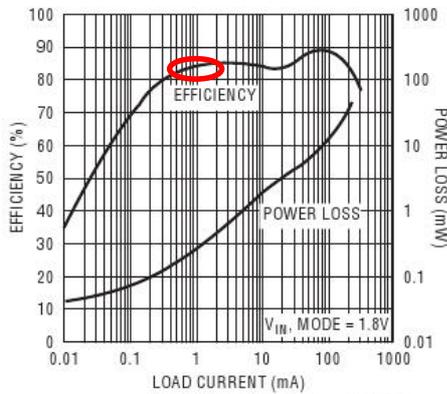


LTC3537

V_{IN} : 0.68V to 5V, V_{OUT} : 1.5V to 5.25V

I_{OUT} : 100mA @ 3.3V, $V_{IN} > 0.8V$

Efficiency and Power Loss vs Load Current



Nécessité :

- de bien dimensionner le convertisseur
- de disposer d'une tension suffisante en sortie du générateur quitte à utiliser des matériaux moins performants

B. Multon et al

Exemples de transducteurs thermoélectriques

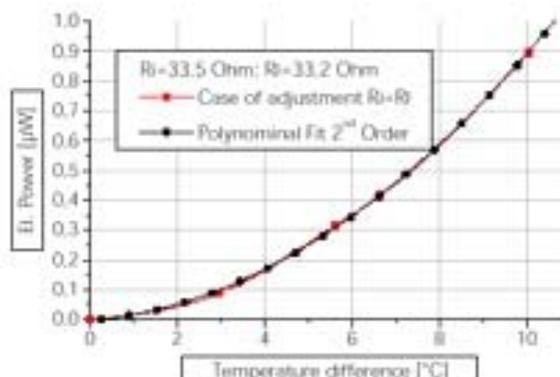
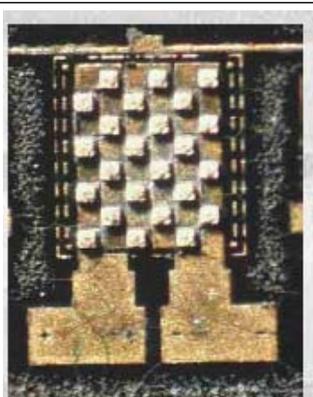
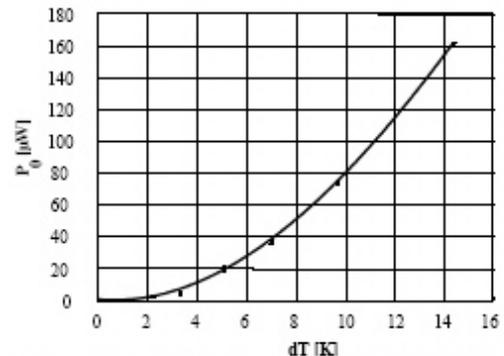
EnOcean GmbH, 2002



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

Source www.enocean.com

$$P_{Max} (R_L = R_i) = \frac{(\alpha \Delta T)^2}{4 R_i}$$



6 mm²,
59400 thermocouples
en poly-Si ou poly-SiGe

0,6 μ W/cm² @ $\Delta T = 10K$

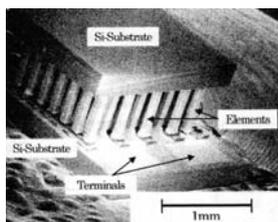
Source : Infineon 2002

B. Multon et al.

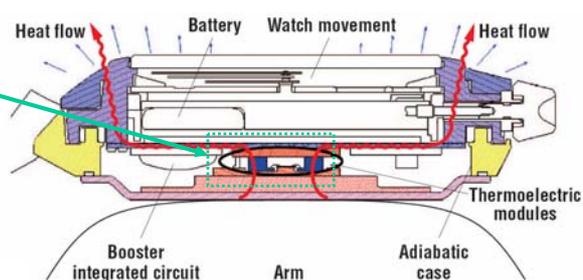
Application : montres (consommation qq μW et ΔT qq $^{\circ}\text{C}$)



Seiko THERMIC
1998



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



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



Citizen CTY66-0341
2001

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

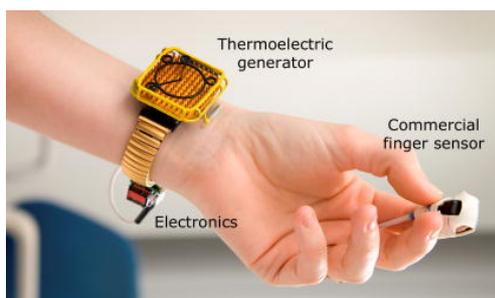
Source : J. Stockholm,
« Génération Thermoélectrique »,
JEEA Cachan mars 2002.

B. Multon et al.
B. Multon et al

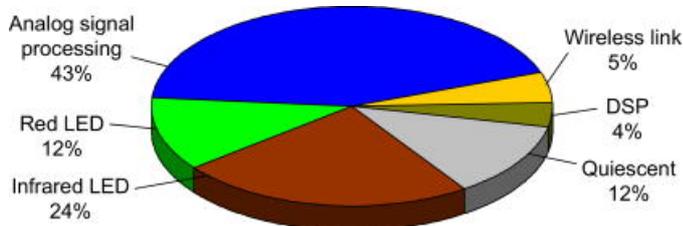
Applications possibles

Alimentation d'un oxymètre communicant : conso $62\ \mu\text{W}$,

capacité de génération $200\ \mu\text{W}$,
stockage par supercondensateur $22\ \text{mF}$



Source : Leonov, JRSE 2009



Vêtements « thermoélectriques »:

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

Les matériaux nanostructurés permettent de
diminuer la conductivité thermique.

Source : CEA-Liten



Récupération des rayonnements électromagnétiques radio-fréquences



B. Multon et al

Ressources

Energie rayonnée par les sources existantes (téléphonie, Wifi...)

Application	Fréquence
Radio FM	≈ 100 MHz
TNT	450-860 MHz
GSM	≈ 900 MHz
UMTS	≈ 2100 MHz
Wi-Fi (b-g)	≈ 2400 MHz
WiMAX	≈ 3500 MHz

Source : F. GALLEE
Télécom Bretagne, mars 2009

Observations Cartoradio

qq V/m à 10 V/m

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

Observations Univ. Liège

0,1 à 0,5 V/m (à 20 cm d'une borne wifi 50 mW)

Formes d'onde complexes (trains de pulses...)
Puissances très variables selon la distance des émetteurs

Systèmes dédiés : émetteurs spécifiques

Avantage : puissance mieux caractérisée, plus efficace

Exemples : bande 902-927 MHz **champ électrique** (Powercast)

« basse fréquence » (10 MHz) et courte distance $< \lambda$ (30 m) **champ magnétique**

Recommandations : (bande de fréquence 10 MHz-19GHz : pb d'échauffement des tissus)

DAS (Débit d'Absorption Spécifique) de

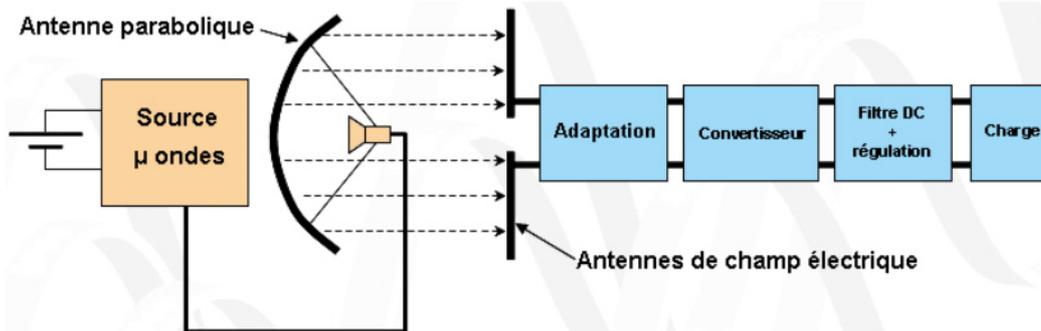
2 W/kg localement (pour 10 grammes de tissus)

0,08 W/kg pour le corps entier

Limites de champ de **28 à 61V/m** selon fréquence.

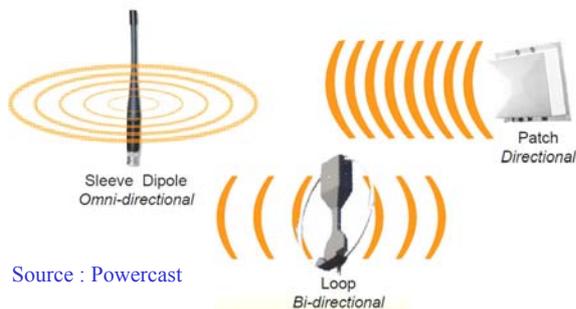
$$DAS = \frac{\sigma \cdot E^2}{\omega} \quad \sigma (\Omega \cdot m)^{-1} \quad \text{et} \quad \omega (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$$

Chaîne de transmission - récupération

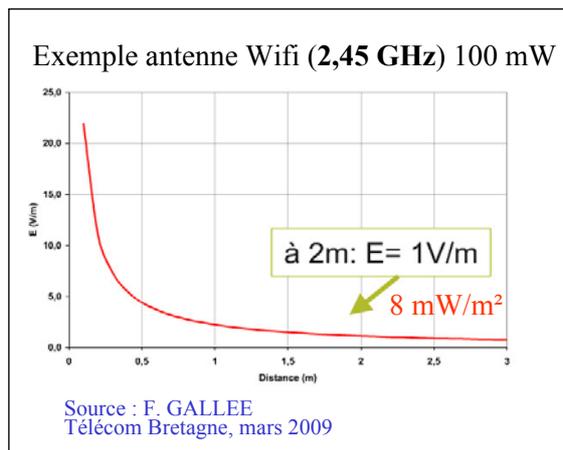


Source : F. GALLEE
Télécom Bretagne, mars 2009

Atténuation variable avec la distance selon directionalité



Source : Powercast

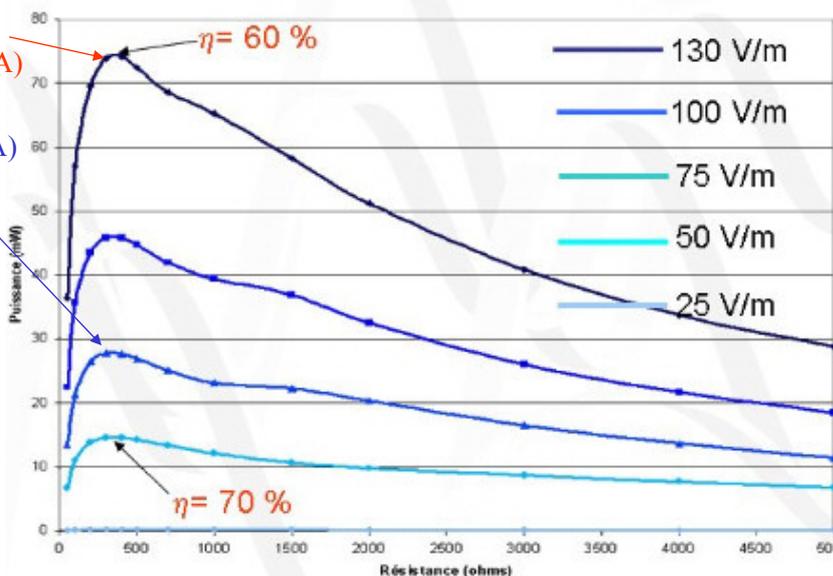


Source : F. GALLEE
Télécom Bretagne, mars 2009

Récupération par antenne planaire rectenna à 2,45 GHz

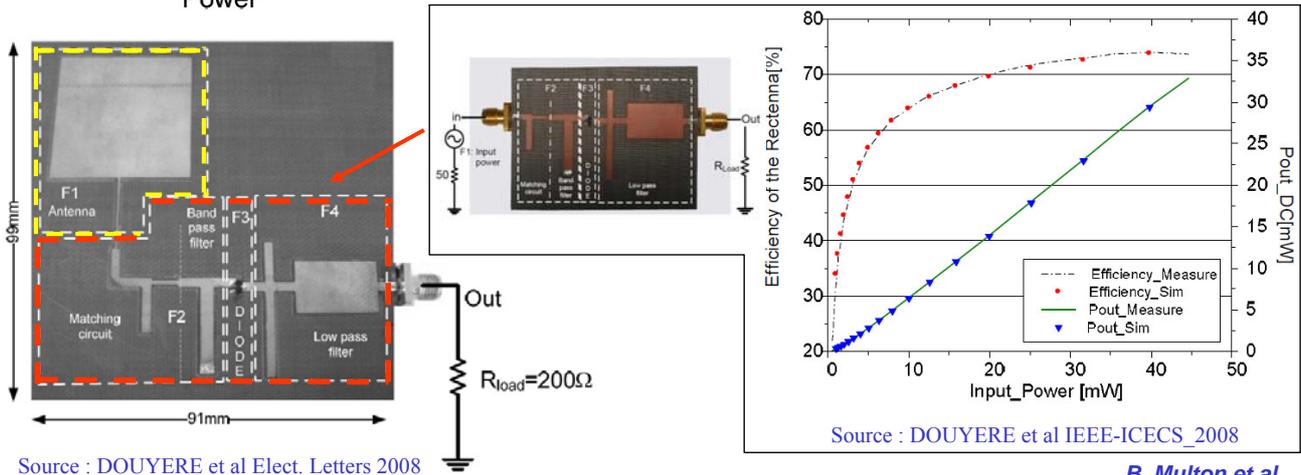
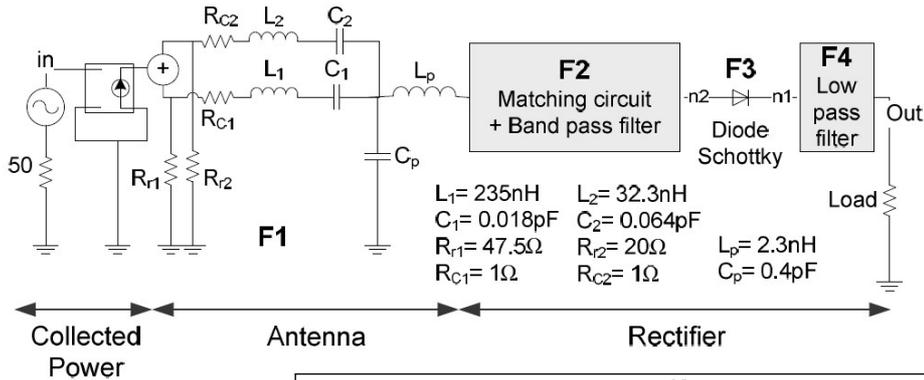
Limite travailleur (prof.)
137 V/m : 70 mW (3V-25 mA)

Limite grand public
61 V/m : 30 mW (3V-10 mA)



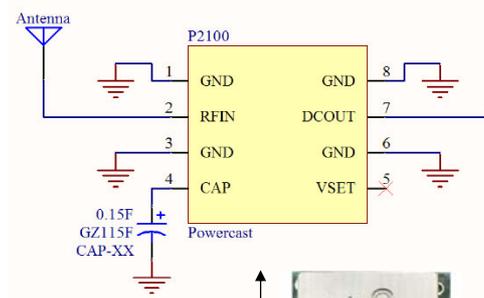
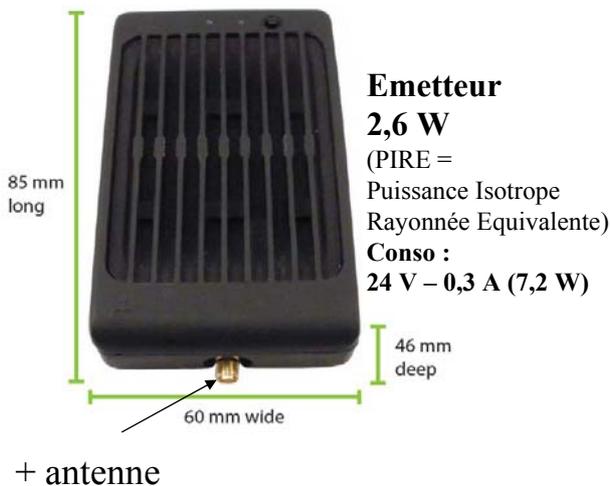
Source : F. GALLEE
Télécom Bretagne, mars 2009

Chaîne de conversion rectenna à 2,45 GHz



B. Multon et al

Dispositif commercial émetteur + récepteur 915 MHz (902-928) : Powercast



Module de réception :
-10 à 10 dBm
260 mW peak

Supercondensateur
0,15 F - 3 V
60 mΩ

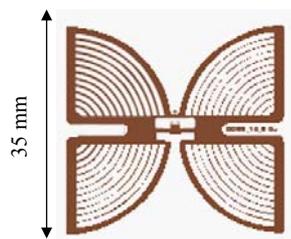
Source : Powercast Corp.
<http://www.powercastco.com/>

Autres modules pour charge de batterie Lithium

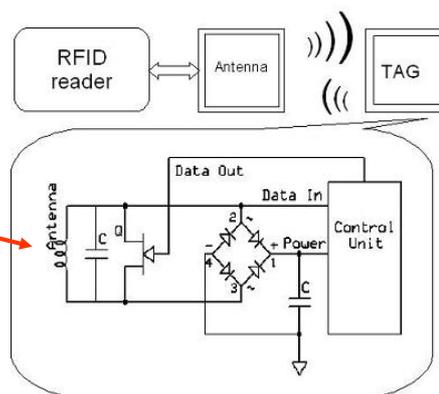
B. Multon et al

Application : alimentation de TAG RFID passifs

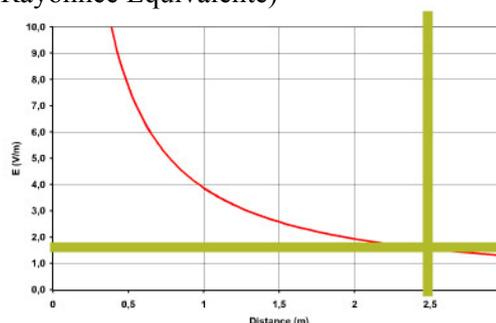
RFID, fréquences de 868 MHz (Europe) à 2,4 GHz



Source : GAO RFID Inc.



Avec un émetteur à 868 MHz ($\lambda/8 \cong 4$ cm)
et 500 mW (PIRE = Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente)
@ 2,5 m : 1,6 V/m et -10 dBm



Source : F. GALLEE
Télécom Bretagne, mars 2009

67

B. Multon et al

SATIE

Systèmes et Applications des Technologies
de l'Information et de l'Energie UMR - 8029

ENS
CACHAN
BRETAGNE



BILAN

- Diversité des ressources accessibles, souvent renouvelables ou « perdues »
- Nombreuses solutions de conversion existantes, « marché » en émergence...
- « Approches systèmes » pour concevoir des chaînes de conversion plus efficaces et mieux intégrées
- Nécessité quasi-systématique d'adaptation d'impédance et/ou de fonctionnement MPPT
- Nécessité de prendre en compte les variations de la ressource pour évaluer la productivité réelle
- Impératif de minimiser encore plus la consommation des dispositifs électroniques

B. Multon et al

Synthèse du potentiel de récupération

Photovoltaïque : jusqu'à 20 mW/cm^2 en extérieur
qq $10 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ en lumière artificielle

Mouvements : fortement dépendant de la fréquence et de l'amplitude
(systèmes résonnants : F^3 et X_{max}) donc γ^2 et F
qq μW à qq mW/cm^3

Chaleur humaine (avec $T_{\text{amb}} = 22^\circ\text{C}$) : qq μ à qq $10 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$
(objectif : $100 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$)

Ondes radiofréquences : qq μW à qq mW/cm^2

69

B. Multon et al

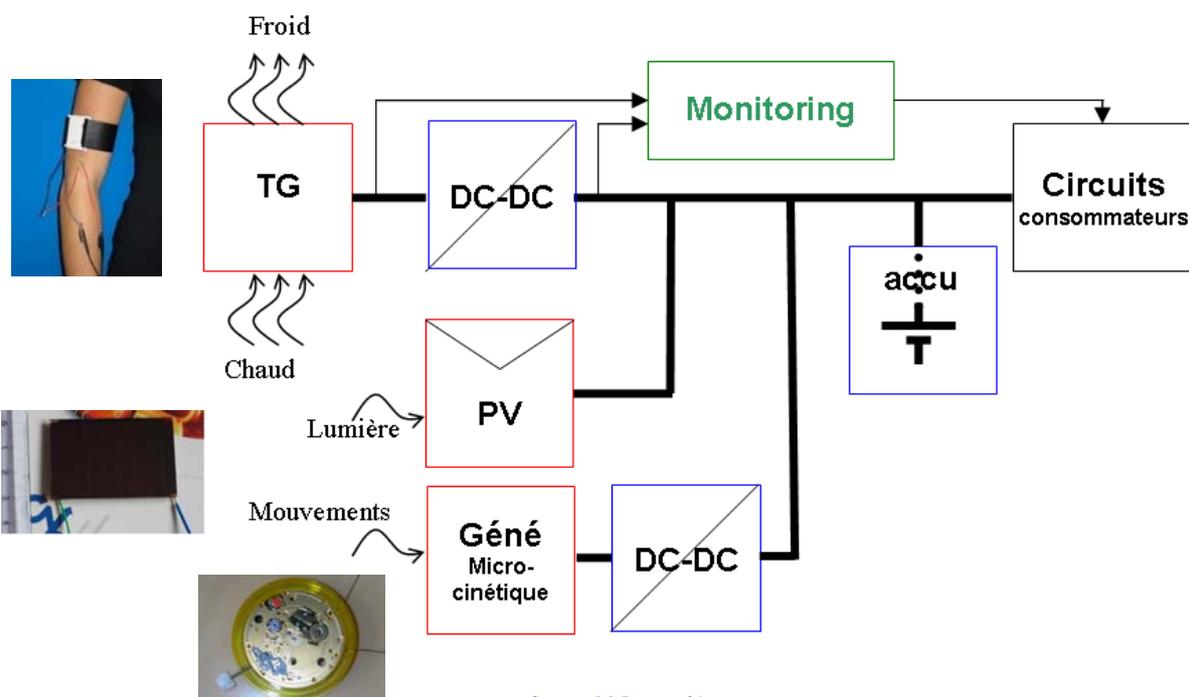
SATIE

Systèmes et Applications des Technologies
de l'Information et de l'Energie UMR - 8029

ENS
CACHAN
BRETAGNE



Système de génération multisources:



70

Source : M. Lossec, thèse en cours

B. Multon et al



Bibliographie

Articles divers

- STARNER T. "Human-Powered Wearable Computing." IBM Systems Journal, Vol. 35, pages 618-629, 1996.
- 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 P.M.J., "Electric power supply system for portable miniature size power consuming devices". Kinetron B.V., Tilburg, Pays-Bas - Brevet N° US 4644246, 17 february 1987, 7 pages.
- PARADISO J., "Renewable Energy Sources for the Future of Mobile and Embedded Computing." Computing Continuum Conference, San Francisco, CA, mars 2000.
- 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.
- SHENCK N.S., "A Demonstration of Useful Electric Energy Generation from Piezoceramics in a Shoe". Thèse MIT Mai 99.
- S P BEEBY, M J TUDOR, N M WHITE, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications", Meas. Sci. Technol. 17 (2006) pp.175-195.
- S. BASROUR, M. MARZENCKI, Y. AMMAR, H. BOUSSETTA, « Microgénérateurs et circuits de gestion de l'énergie pour microsystèmes autonomes », Séminaire GDR SoC - SiP, ISEP-Paris, 22 Mars 2007.
- P. D. MITCHESON, E. M. YEATMAN, G. K. RAO, A. S. HOLMES, T. C. GREEN, "Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices", Proceedings of the IEEE vol.96, n°9, Sept. 2008, pp.1457-1486.
- CEA-Liten "Les nouvelles sources d'énergie miniatures pour applications nomades » dossier de presse 2008.
- A. DOUYERE, J.D. LAN SUN LUK, F. ALICALAPA, "High Efficiency Microwave Rectenna Circuit: Modelling and Design", Electronics Letters, 2008 Vol.44 (n°24).
- A. DOUYERE, J.D. LAN SUN LUK, F. ALICALAPA, A. CELESTE, "Losses Analysis and Performance Improvement of a Rectenna for RFID Systems", IEEE ICECS 2008.
- D. GUYOMAR, G. SEBALD, S. PRUVOST, M. LALLART, A. KHODAYARI, C. RICHARD, "Energy Harvesting from Ambient Vibrations and Heat", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 20, March 2009, pp. 608-624.
- P Basset, D Galayko, A Mahmood Paracha, F Marty, A Dudka, T Bourouina, « A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester », J. Micromech. Microeng. 19 (2009) 115025 (12pp).
- V. LEONOV, R. J. M. VULLERS, "Wearable electronics self-powered by using human body heat: The state of the art and the perspective", Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol 1, issue 6, 2009.
- F. GALLEE, "Micro-ondes et économie d'énergie", Journée TIC & DD, Télécom Bretagne, 26 mars 2009.
- W. G. LI, S. HE, S. YU, « Improving Power Density of a Cantilever Piezoelectric Power Harvester Through a Curved L-Shaped Proof Mass », IEEE Trans. IE, Vol. 57, n°3, march 2010 pp. 868-876.
- A. TABESH, L. G. FRECHETTE, "A Low-Power Stand-Alone Adaptive Circuit for Harvesting Energy From a Piezoelectric Micropower Generator", IEEE Trans. IE, Vol. 57, n°3, march 2010 pp. 840-849.
- A. KHALIGH, P. ZENG, C. ZHENG, "Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art", IEEE Trans. IE, Vol. 57, n°3, march 2010 pp. 850-860.

B. Multon et al.

Articles SATIE <http://www.satite.ens-cachan.fr/>

- 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.
- M. RUELLAN, S. TURRI, H. BEN AHMED, B. MULTON, « Electromagnetic Resonant Generator », IEEE IAS annual meeting, Hong Kong, CDROM proc., 2-6 oct. 2005, 8 p.
- M. LOSSEC, B. MULTON, H. BEN AHMED, L. L'HOURS, P. QUINTON, G. NICOLAS, A. SOREL, J. PRIOUX, « Optimization Methodology for a Multi-Source-Energy Generation System using the Human Environment Energy Resource », NEST 2009 (New Energy Solutions in Tours), 26-27 may 2009.
- M. LOSSEC, B. MULTON, H. BEN AHMED, C. FREDY, F. LE BOURHIS, S. MOYA, « Etude d'un générateur micro-cinétique : modélisation énergétique et optimisation du transfert d'énergie », Electrotechnique du Futur 2009 (ISBN 978-2-913923-30-0), Compiègne, 24-25 sept. 2009, 23C.
- M. LOSSEC, B. MULTON, H. BEN AHMED, « Micro-Kinetic Generator: Modeling, Energy Conversion Optimization and Design Considerations », IEEE MELCON, Malta 26-28 April 2010.

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

<http://www.satite.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 »

Remerciements au CNRS pour son soutien : PEPS 2007-2009 (ST2I), AS 2001-2002 (SPI-STIC)

B. Multon et al.

ANNEXE

Informations complémentaires

73

B. Multon et al

Compléments

Energie d'origine métabolique

74

B. Multon et al

Conversion d'énergie métabolique

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

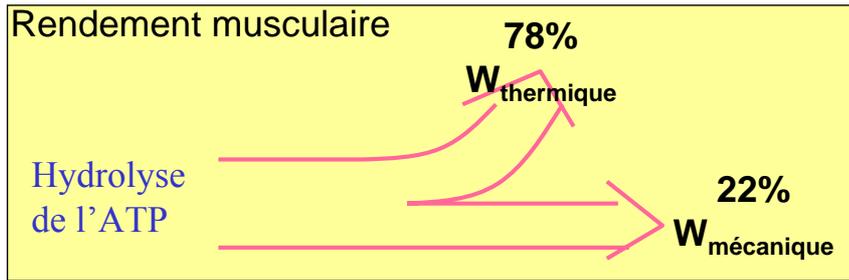
Production d'ATP à partir de « substrats métaboliques » :

créatine phosphate, glucides, lipides, protéines

Conversion glucose -> ATP



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



La dégradation du glucose consomme :

1 litre d'O₂ pour 5,05 kcal (21 kJ ou 5,8 Wh)

Graisses, lipides (triglycérides) :

1 litre d'O₂ pour 4,7 kcal

Moyenne des substrats énergétiques : 1 litre d'O₂ pour 4,8 kcal ou 20 kJ

Source : Franck MULTON et Paul DELAMARCHE, « L'énergie chez l'homme », JEEA Cachan mars 2002

B. Multon et al.

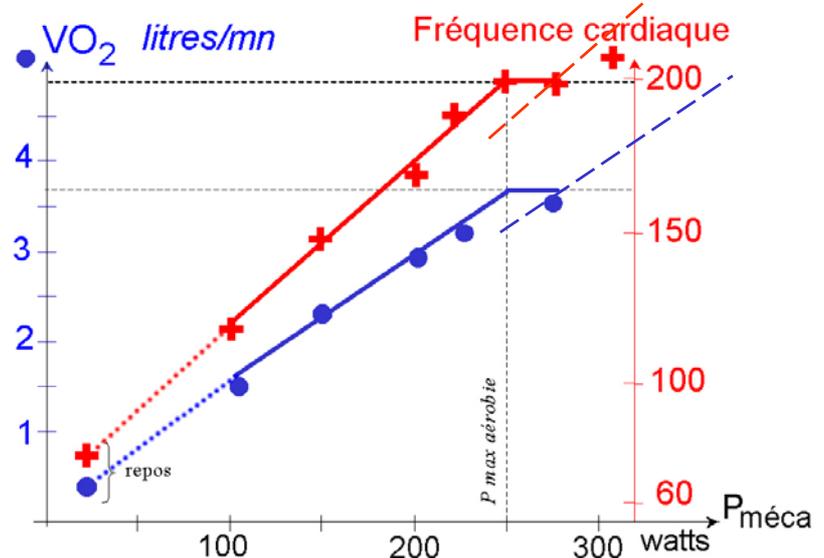
Conversion d'énergie métabolique

Relations

Consommation d'oxygène (VO₂)

Fréquence cardiaque

fonctions de la puissance mécanique produite



Accroissement de
1 litre O₂/min
≅ 20 kJ/mn soit 330 watts
et, avec 22% de rendement,
70 watts mécaniques

Un moyen de mesurer la puissance...

B. Multon et al.

Puissance mécanique lors d'exercices physiques

Vélo :

en promenade : $P_{\text{méca}} = 75 \text{ W}$

en crête (côte) : $P_{\text{méca_Max}} = 350 \text{ W}$



Puissance
« 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 :

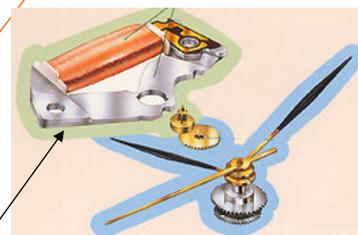
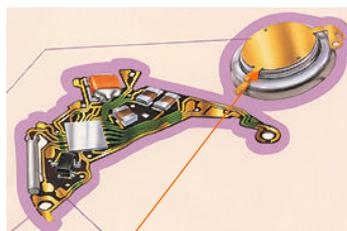
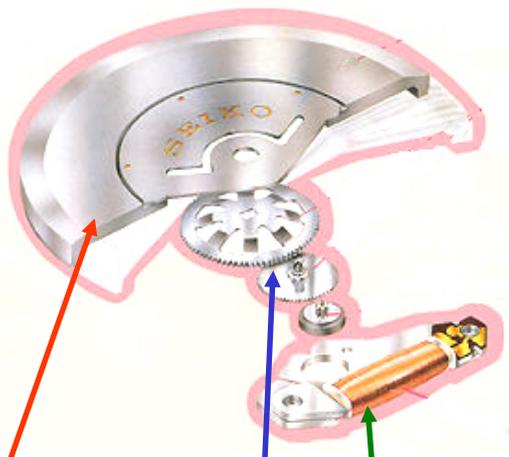
en moyenne $P_{\text{cal}} = 1100 \text{ W}$, $P_{\text{méca}} = 220 \text{ W}$

B. Multon et al

Compléments

Autres exemples de systèmes
de récupération d'énergie
mécanique humaine

Système Kinetic de Seiko



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

B. Multon et al

Chargeurs divers



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 pédale (Windstream Power)

Chargeur de batterie 12 V
50 W avec les mains
125 W avec les pieds

550 \$



B. Multon et al

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

B. Multon et al

Chargeur Souris Verte (+ lampe de poche)

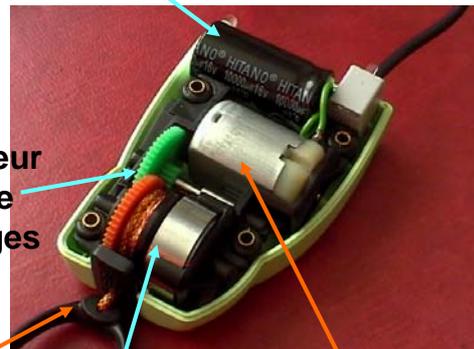
<http://www.lsvproduction.com/>

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



LED blanche

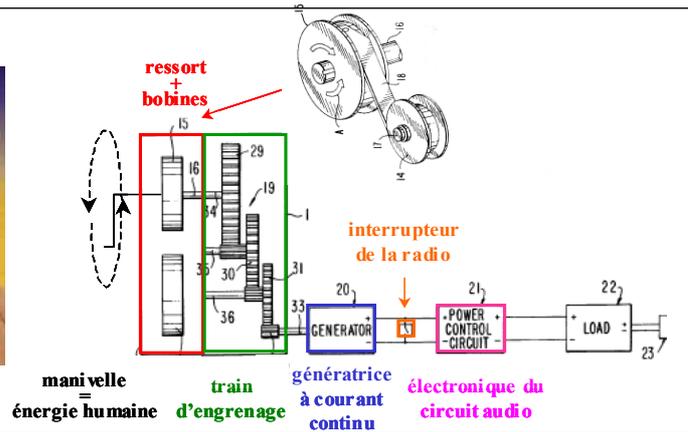
Circuit électronique (puissance et contrôle)

B. Multon et al

Lampes rechargeables

Freepaly

Stockage à ressort



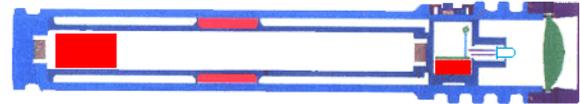
Nightstar flashlight

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.



B. Multon et al

Poste de radio Freepaly

Tri-sources, rechargeable par :

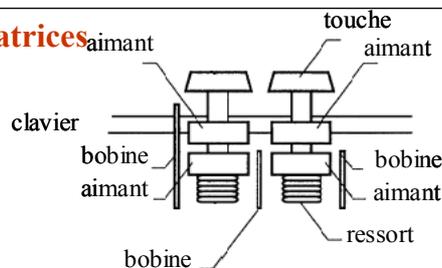
- Manivelle (Stockage à ressort)
- Module photovoltaïque
- chargeur secteur



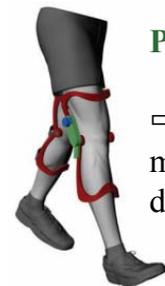
Clavier à touches génératrices

Compaq 1999

Brevet N° US 5911529



Genouillère (Canada)

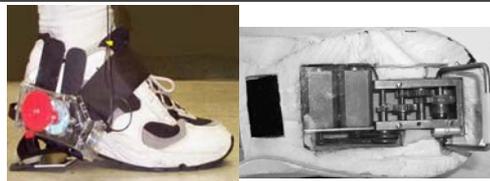


$P_{\text{moy}} = 5W$

⇒ 1 minute de marche = 10 minutes de téléphone

Chaussures génératrices

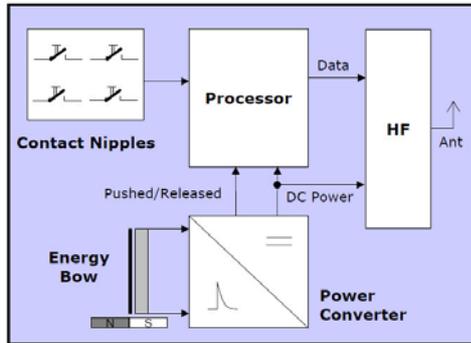
MIT media lab.



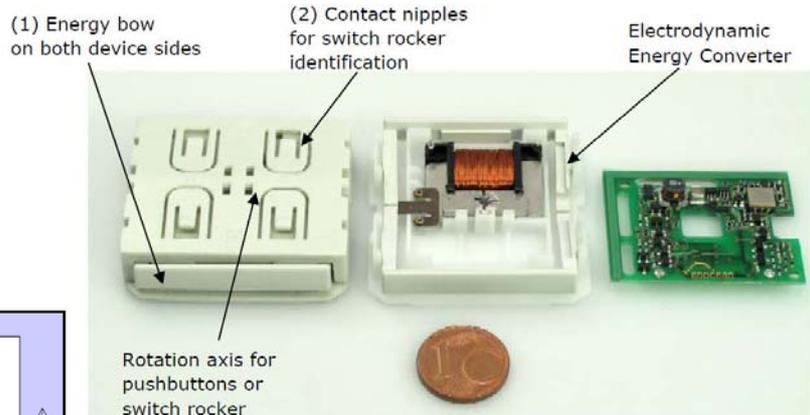
B. Multon et al

Interrupteur sans fils

PTM200 EnOcean
à convertisseur
électromagnétique



Prix du pack complet (bouton émetteur + récepteur) : environ 100 €



B. Multon et al

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



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.



B. Multon et al

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



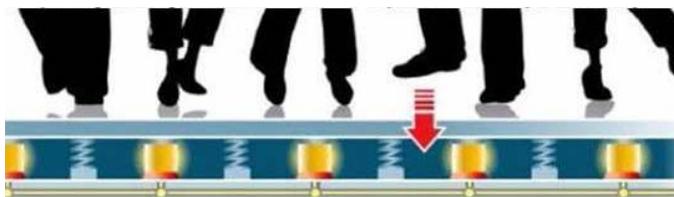
Bizmate, masse + 20 g,

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

B. Multon et al

Discothèque :

une personne $\Rightarrow P=20 \text{ mW}$

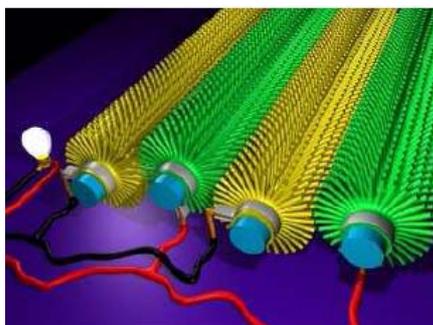


Sac à dos (Université de Technologie du Michigan):

$V_{\text{marche}} = 5 \text{ km/h} \Rightarrow P = 45 \text{ mW}$



Nanofils d'oxyde de zinc (Université de Georgie):



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

Analyse quantitative expérimentale d'un dispositif commercial radio Freeplay

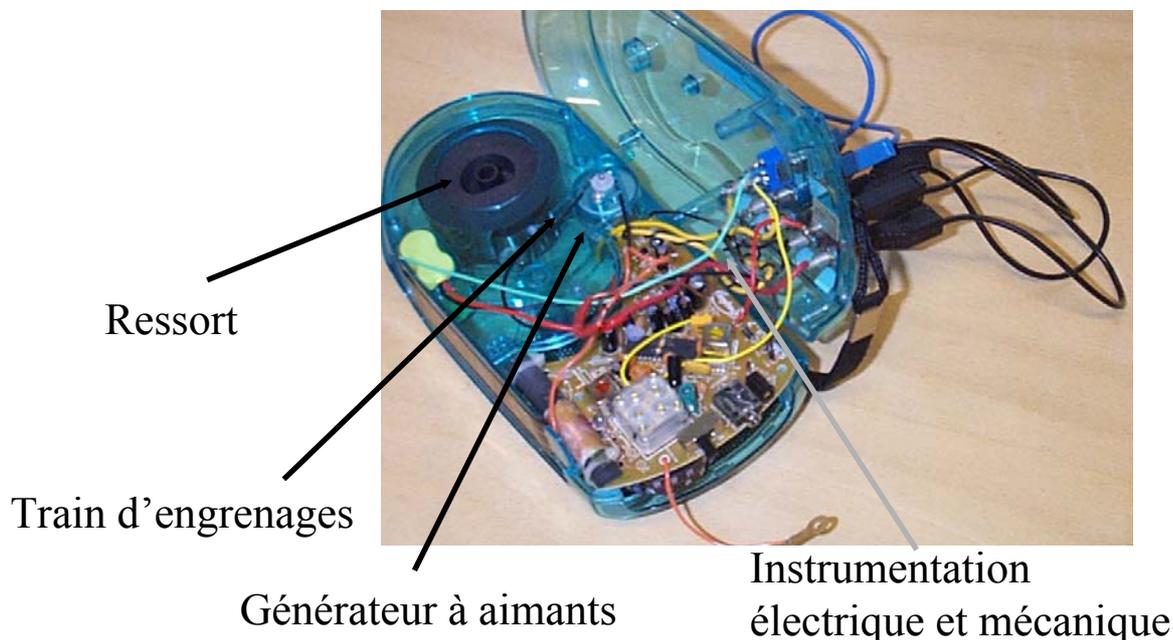


Travaux menés en collaboration avec le
LPBM Laboratoire de physiologie et de biomécanique de l'exercice musculaire (Rennes)
Participation LPBM : F. Multon et P. Delamarche – SATIE : S. Turri, D. Miller, B. Multon, H. Ben Ahmed

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



Partie mécanique :

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

60 tours

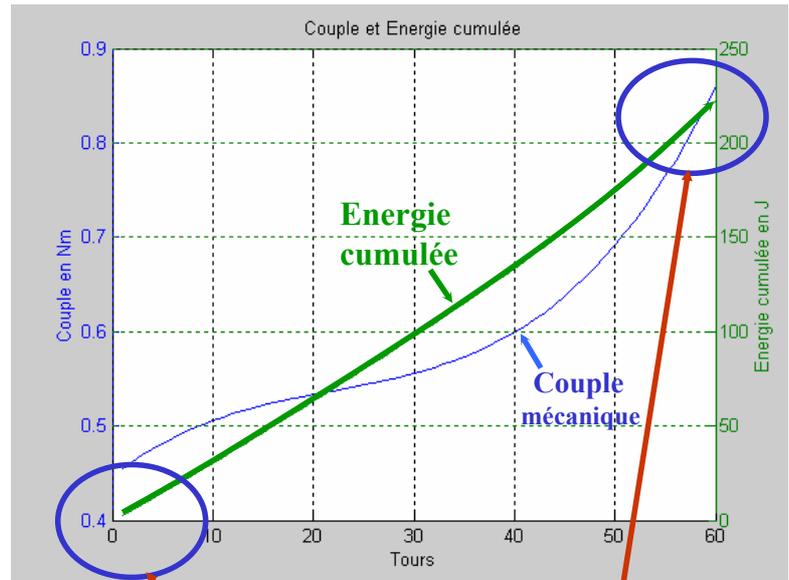
ressort : 360 g, 220 J
environ 0,17 Wh/kg

Remontage direct : 60 tr/mn

Déroulement lent : 5 tr/mn

à travers multiplicateur

à 3 trains d'engrenages : $m = 326$



à 1 tr/s : 2,5 W

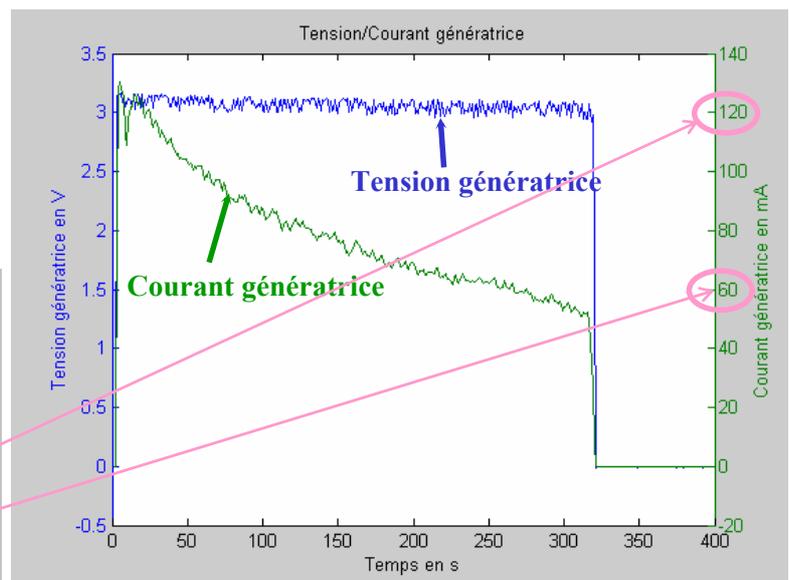
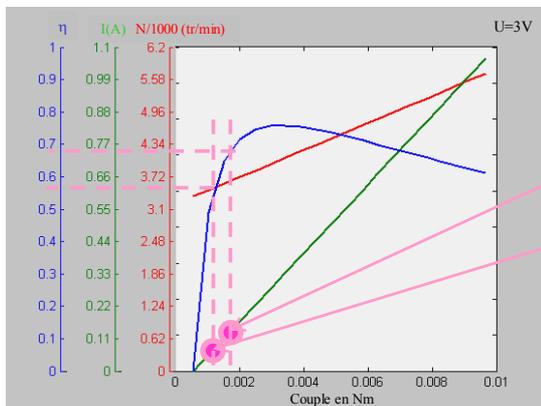
à 5,4 W

B. Multon et al.

Partie électromécanique :

Génératrice à collecteur 3 V
débit direct

à travers une diode série,
sur accumulateur NiCd



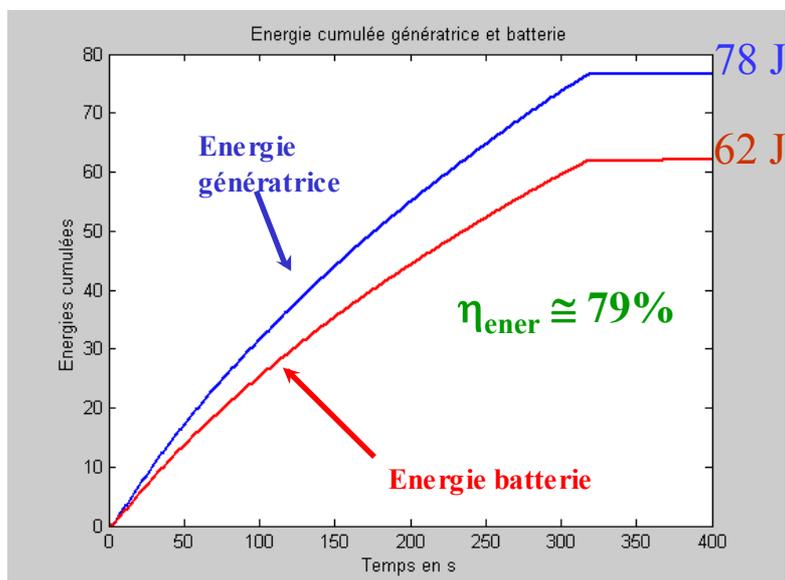
Energie électrique produite par le générateur :
sur un cycle 78 J

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

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

B. Multon et al.

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



B. Multon et al.

Accumulateur électrique :

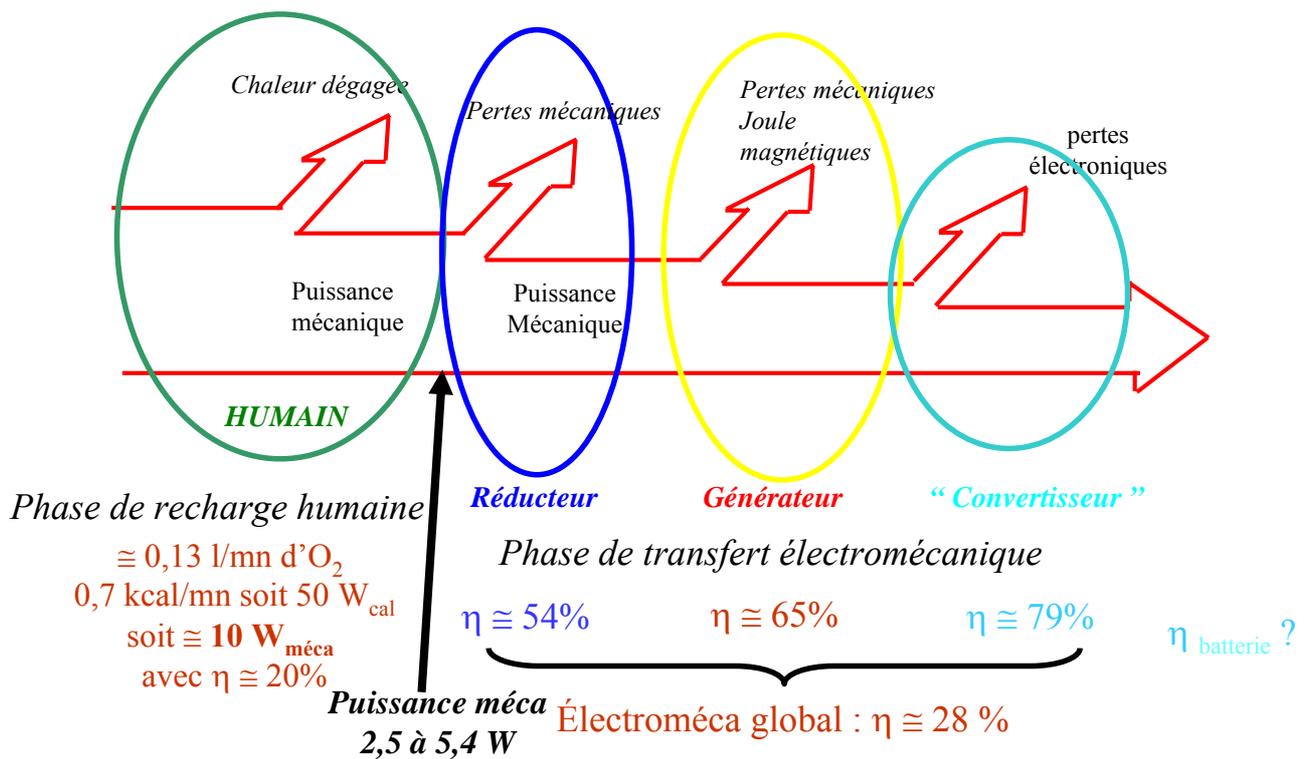
NiCd : 2 éléments 600 mAh

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)

B. Multon et al.

Bilan énergétique global



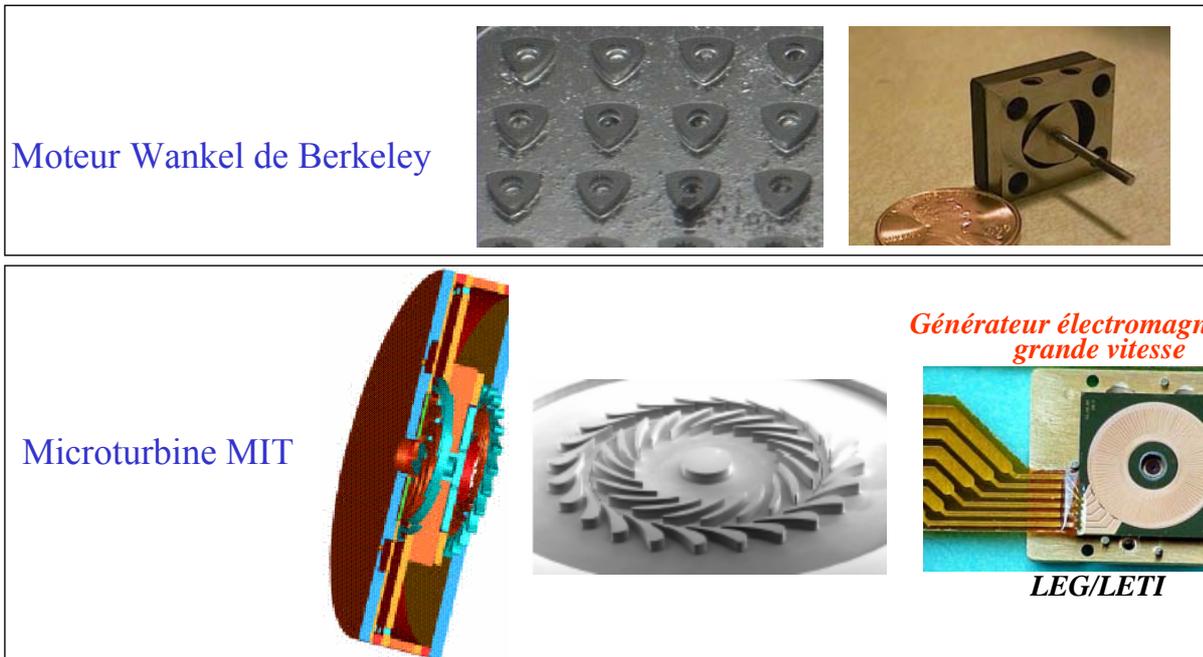
B. Multon et al.

Compléments

Conversion à partir de carburant (on ne peut pas vraiment parler de récupération)

Conversion à partir de carburants

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

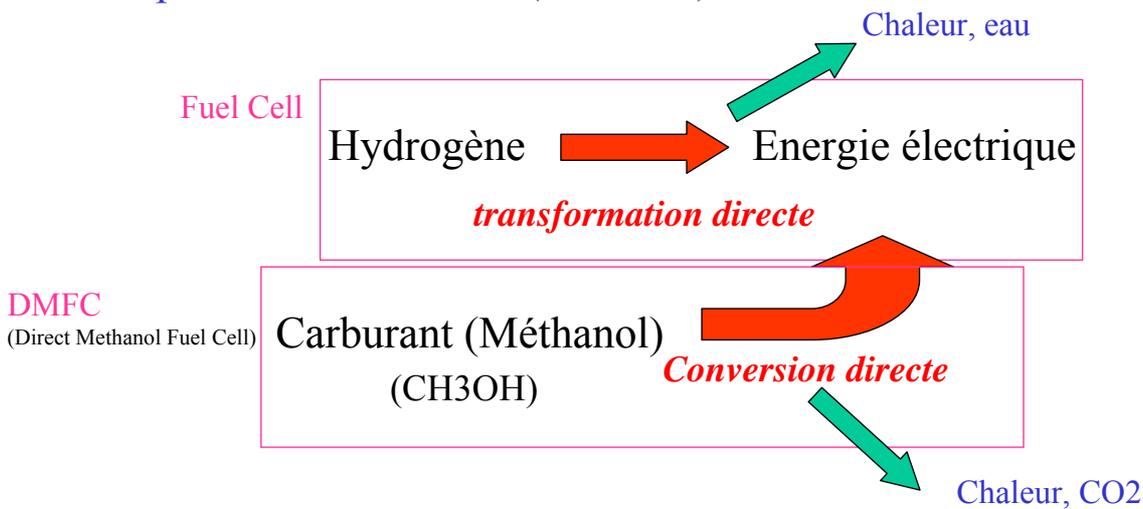


Source : Jérôme DELAMARE, Orphée CUGAT, « Micro sources d'énergie thermo-mécaniques », JEEA 2002, Cachan

B. Multon et al

Conversion à partir de carburants

Micro-piles à combustibles (infos CEA)



Possibilités de bon rendement électrique : plus de 50%
Compromis rendement – densité de puissance (compacité – échauffement)

Source : Paul LUCHESE (CEA), « Piles à combustible. Possibilités de miniaturisation », JEEA 2002, Cachan

B. Multon et al

Conversion à partir de carburants

Mini-piles à combustibles

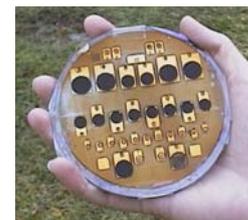
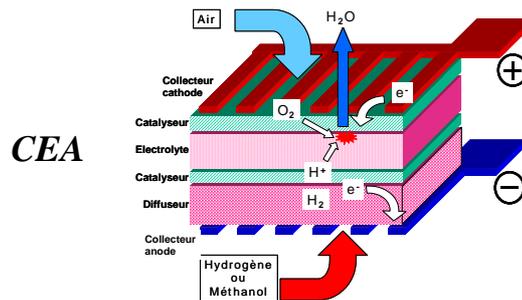


DMFC Ballard 25 W



DMFC Motorola 0,1 W

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



Réalisation CEA sur tranche silicium

Source : Paul LUCCHESI (CEA), « Piles à combustible. Possibilités de miniaturisation », JEEA 2002, Cachan

B. Multon et al

Exemples à pile à combustible

Chargeur Mobion (MTI MicroFuel Cells)



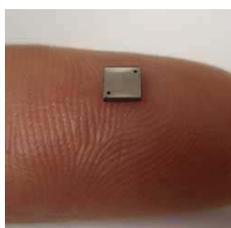
Technologie DMFC, $P=62\text{mW}/\text{cm}^2$, $E=1,8\text{kWh}/\text{kg}$
 ⇒ Permet de recharger 10 fois son téléphone

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
 ⇒ $P=1,3\text{W}/\text{cm}^2$

Micro-piles à combustibles:

CEA: filière hydrogène, technologie des couches minces



$P=150-400\text{mW}/\text{cm}^2$
 Objectif: $1\text{W}/\text{cm}^2$