

CRESITT INDUSTRIE

Centre de Ressources
Technologiques en Électronique



ÉLECTRONIQUE ET TRANSITION ÉCOLOGIQUE

« Récupération et transfert d'énergie dans les systèmes connectés : vers une autonomie durable »

S. ROUXEL – 17/09/2026 – v1.0

Réf du document : SemElecTransEco_PPT_SR_RecEnr_v1p0_20260917

Le CRT CRESITT est soutenu par :



Cofinancé par
l'Union européenne

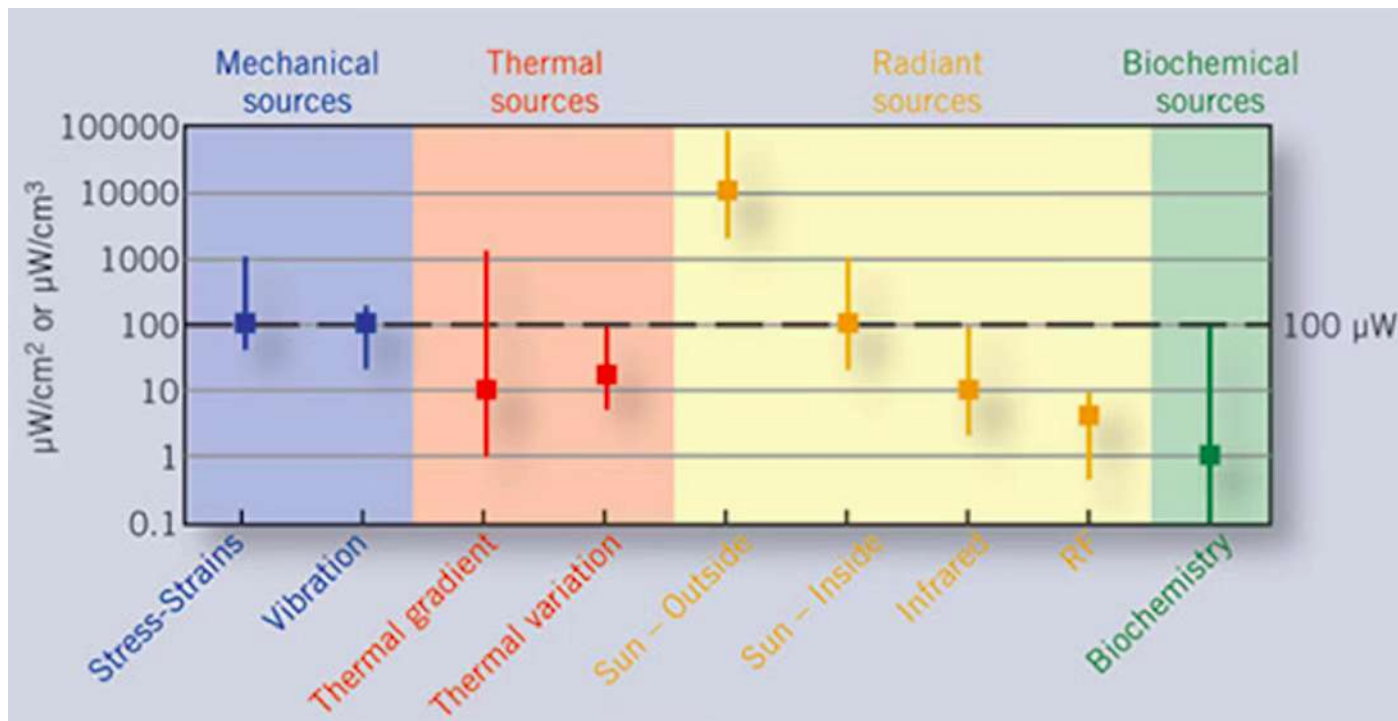


L'action de diffusion technologique est cofinancée par l'Union européenne.
L'Europe s'engage en région Centre-Val de Loire avec le Fonds européen de développement régional.



- Sources :
 - Énergie mécanique / cinétique
 - Énergie thermique
 - Énergie lumineuse
 - Énergie magnétique rayonnée
 - Énergie radiofréquence
 - Énergie biochimique

- Champs des possibles



Src: CEA-LETI - Comparison of energy density for the different energy sources in our surroundings. (Boisseau Sébastien, et al., Boisseau (2012). Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting. Intech.)

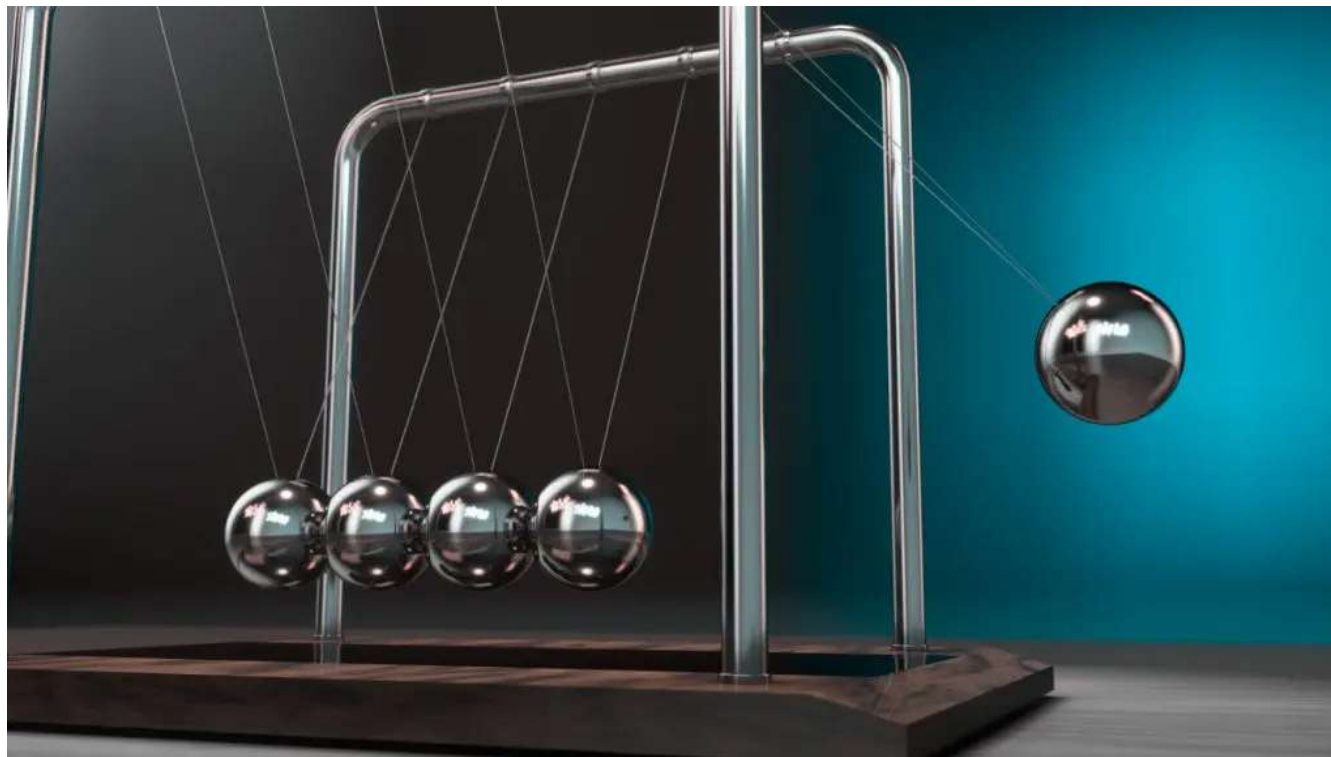
- Besoins

Tableau 1. Consommations électriques de systèmes électroniques courants et implantés

Systèmes électroniques	Consommations moyennes	Systèmes électroniques implantés [2]	Consommations moyennes [2]
Lecteur MP3	50mW-70mW	Implant auditif	145μW-5.16mW
Récepteur GPS	70mW	Pompe à médicament	400μW
Smartphones	0.5W-1W	Neurostimulateur	50μW
Accéléromètre 3 axes	30μW	Stimulateur musculaire	1.3mW
Montre	1-5μW	Pacemaker	8μW
Capteur de température	30μW		
Récepteur RF	30mW-50mW		
Emetteur RF	40mW-90mW		
LED	1mW-10mW		
Microcontrôleur (actif)	1mW		
Microcontrôleur (standby)	3μW		

Src: URSI-France

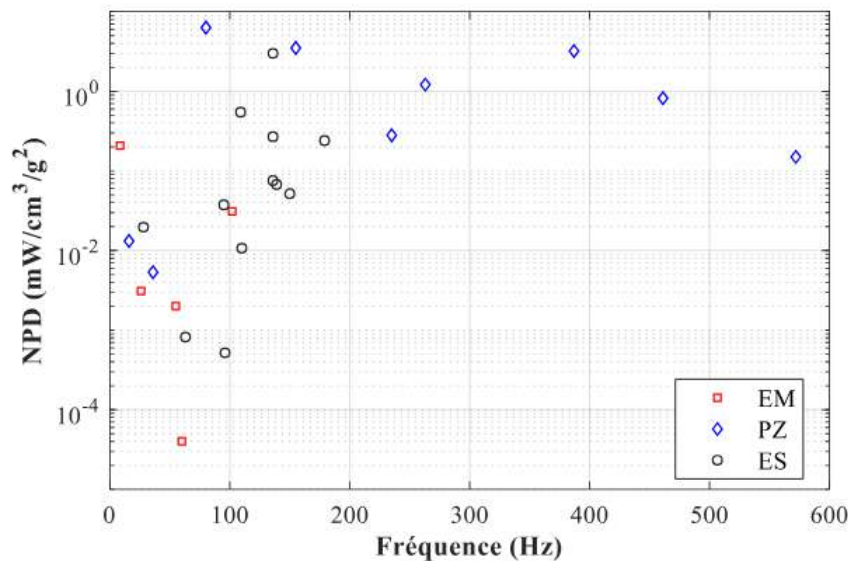
Énergie mécanique – cinétique



Énergie mécanique – cinétique

- Déplacements, vibrations, ou force, convertis en énergie électrique par l'utilisation de :
 - Piézoélectriques : transducteur composé de matériaux électriquement polarisés et avec un fort couplage électromécanique.
 - Mécanismes électrostatiques : capacité variable par déplacement
 - Mécanismes électromagnétiques : modification du champs magnétique dans un solénoïde (Faraday)

Énergie mécanique – cinétique



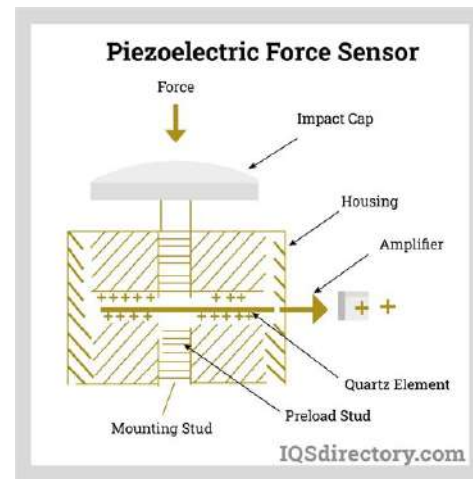
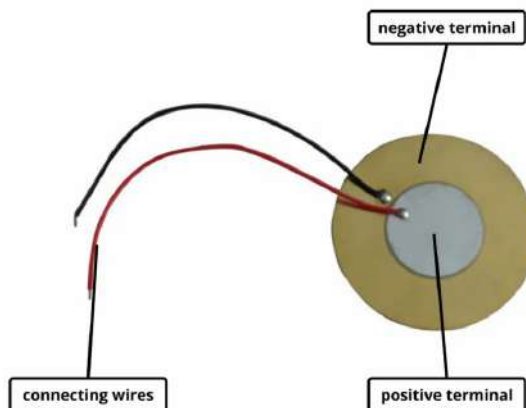
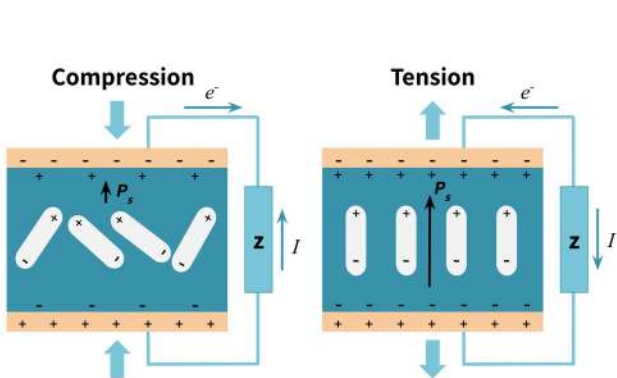
NPD : puissance récupérée normalisée par le volume et l'accélération au carré

Figure 1.9 : NPD en fonction de la fréquence des différents types de générateurs d'énergie vibratoire (EM : électromagnétique, PZ : piézoélectrique, ES : électrostatique).

Src: Thèse Thien Hoang, Dispositif de récupération d'énergie piézoélectrique modélisation, fabrication et caractérisation, 2019

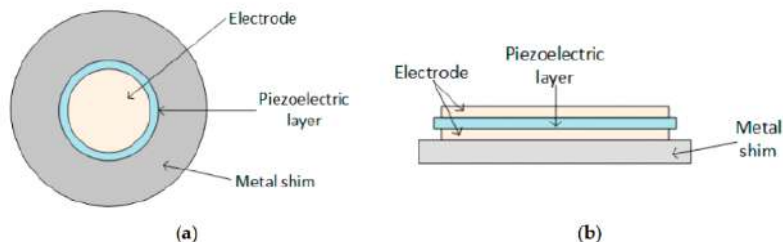
Énergie mécanique – cinétique

- Piézoélectriques :

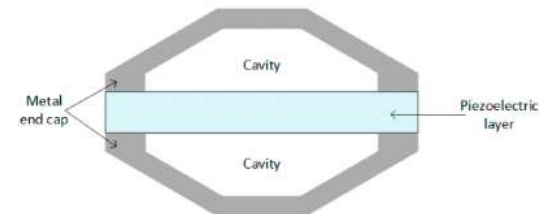


Énergie mécanique – cinétique

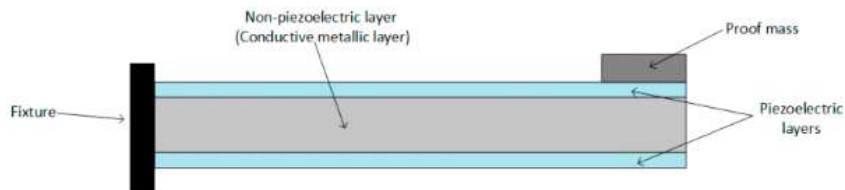
- Architecture de piézoélectriques :



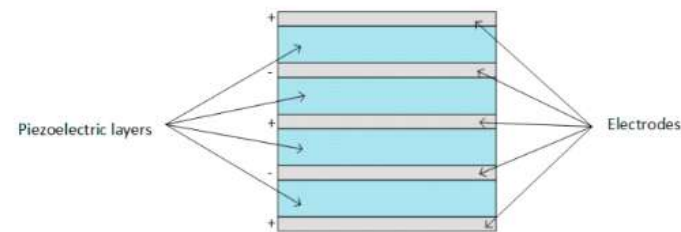
Transducteur en diaphragme circulaire : (a) Vue de face ; (b) Vue de profil
Ex : $\varnothing 30\text{mm}$, accélération 1G, 113Hz $\Rightarrow$ 12mW



Transducteur en cymbale
supporte les fortes intensités (chaussure ,
autoroute, suspension)
ex : 29mm, 70N, 200hz $\Rightarrow$ 100mW



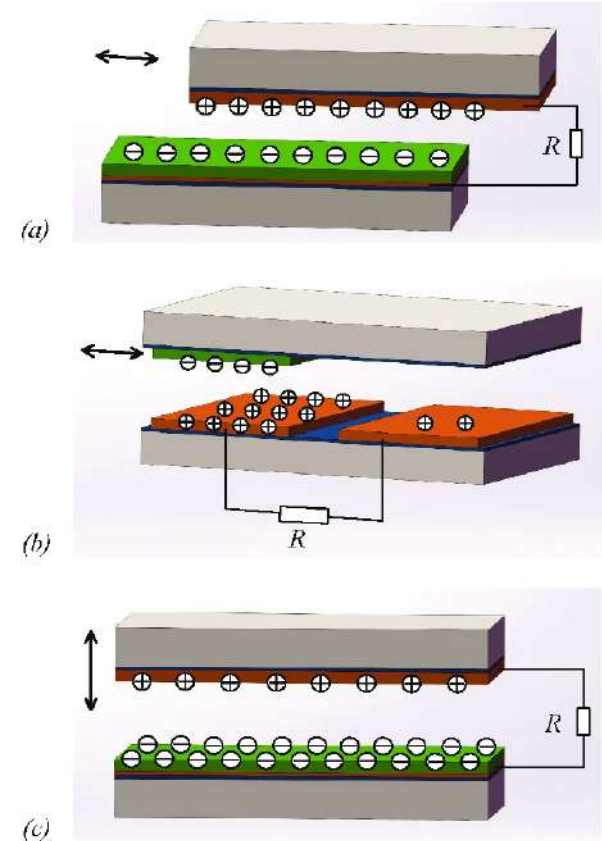
Poutre en porte-à-faux (cantilever beam)
Pas de grande charge, vibration faible, fréquence
10-200Hz)



Transducteur piézoélectrique en pile (stack)
Idem cymbale
ex : 32,4x7,1x7,6mm, 22.15N, 1204Hz $\Rightarrow$ 324mW

Énergie mécanique – cinétique

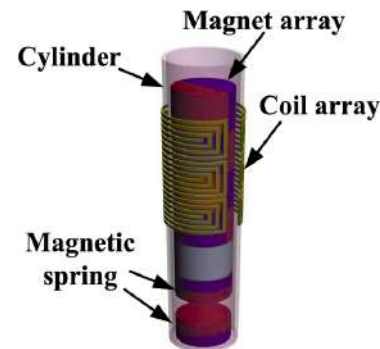
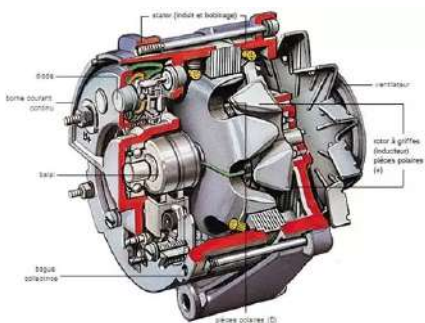
- Mécanismes électrostatiques :
 - Capacité variable :
 - (a) chevauchement entre les électrodes supérieures et inférieures
 - (b) chevauchement entre les électrodes de gauche et de droite
 - (c) distance de l'entrefer
- Privilégié dans les micro-electromechanical system (MEMS)



Src: *Micro Energy Harvester With Dual Electrets on Sandwich Structure Optimized by Air Damping Control for Wireless Sensor Network Application*

Énergie mécanique – cinétique

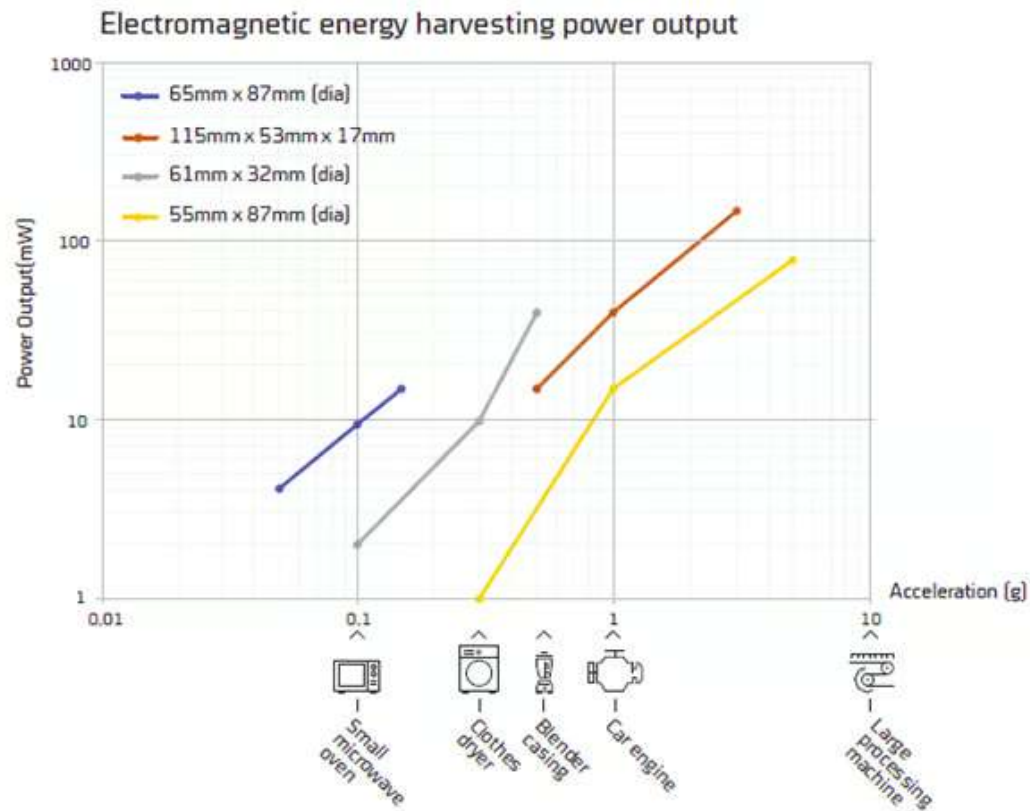
- Mécanismes électromagnétiques :
 - Solénoïde en mouvement dans un champs magnétique (ou inverse) crée un courant (Faraday)
 - aimant permanent et bobine (conducteur)



Src: Larousse

Electromagnetic Energy Harvester With Flexible Coils and Magnetic Spring for 1–10 Hz

Énergie mécanique – cinétique



Src: <https://forcetechnology.com>

Énergie mécanique – cinétique - Exemples



AUTO-ALIMENTÉ

Énergie mécanique – cinétique - Exemples

- Enocean :
 - ECO 260
 - 1.6N à 2.7N
 - 120 à 210μJ
- Avidsen (37)
 - Carillon avec bouton sans fil/sans pile
 - Portée 100m
- Philips
 - Philips Hue Tap



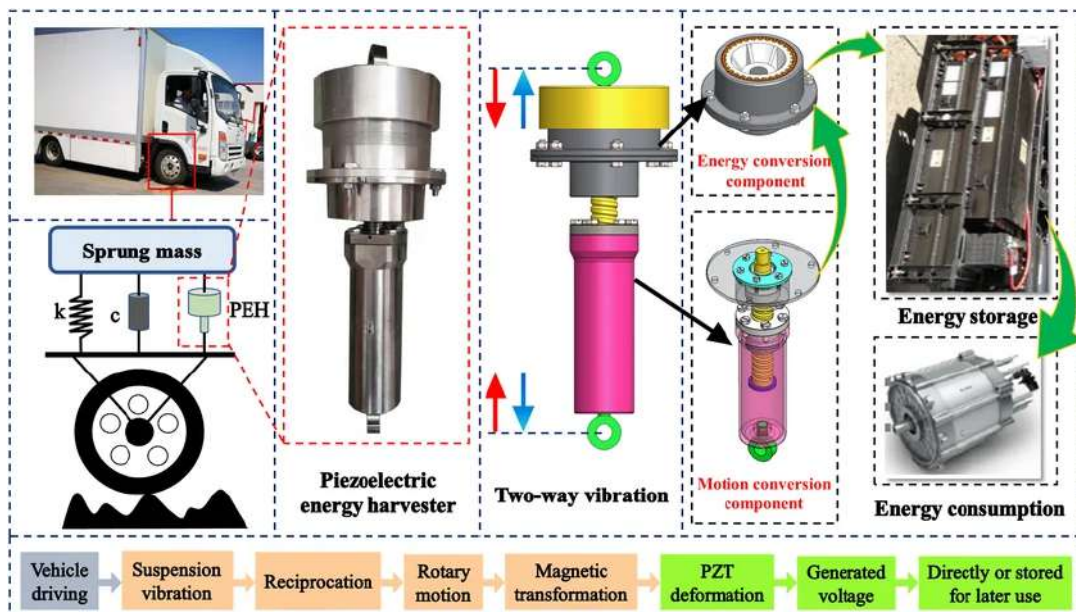
- Emetteur radio 868.3Mhz
 - +5dBm
 - ASK
 - 125kbps
 - AES-128 encryption and authentication
 - 26.2 +- 0.3 mm x 21.15 +-0.3 mm



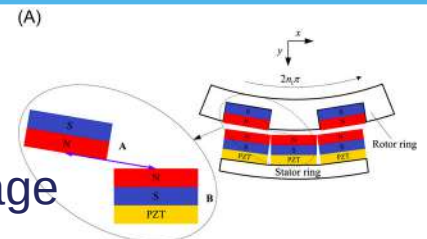
EnOcean : PTM 535

Énergie mécanique – cinétique - Exemple

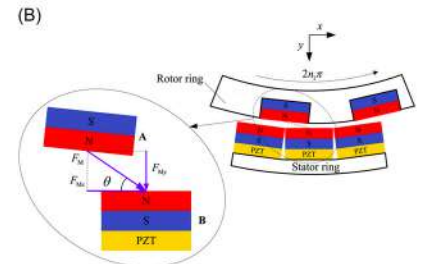
- Jusqu'à 24.28 W à 60 km/h sur une route quelconque
- Jusqu'à 3.346KW à 30km/h avec des alternances accélération, freinage



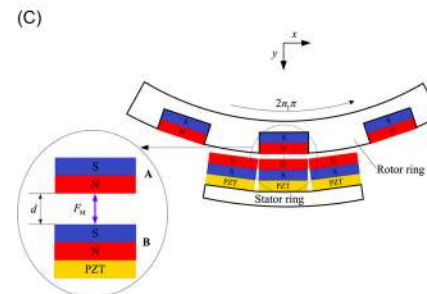
Src: A novel piezoelectric energy harvester of noncontact magnetic force for a vehicle suspension system, Zao & al., Energy Science & Engineering, vol 11, 12 2022.



Magnetic interaction force is 0.



Magnetic interaction force is $F_M \sin \theta$.



Magnetic interaction force is F_M .

Énergie mécanique – cinétique – Exemple

- MicroGen System (US)
 - Piezo MEMS
 - Format pile 9V
 - 3.3V (25-500 μ W)
 - 100 microWatts à 120 Hz à 0.1G
 - 900 microWatts à 600Hz à 0.5G

BOLT™ Energy Harvesting Products



- Kinergizer (Pays-Bas) -
 - Micro générateurs électromécanique
 - *Model DICE : Size: 42 x 33 x 26 mm. Weight: 75 gram. Power: 0.5 – 2.5 mW**
 - *Model Hiper-D : Size: ø35-75 mm. Weight: 90 gram. Power: 1-5 mW**
 - *Model Silverstone : 70 x 60 x 30 mm. Weight: 250 gram. Power: 1.5 – 15 mW**
- application ferroviaire*
- *Depending on vibration level*



- ReVibe Energy (Suède)
- Micro générateurs électromagnétique

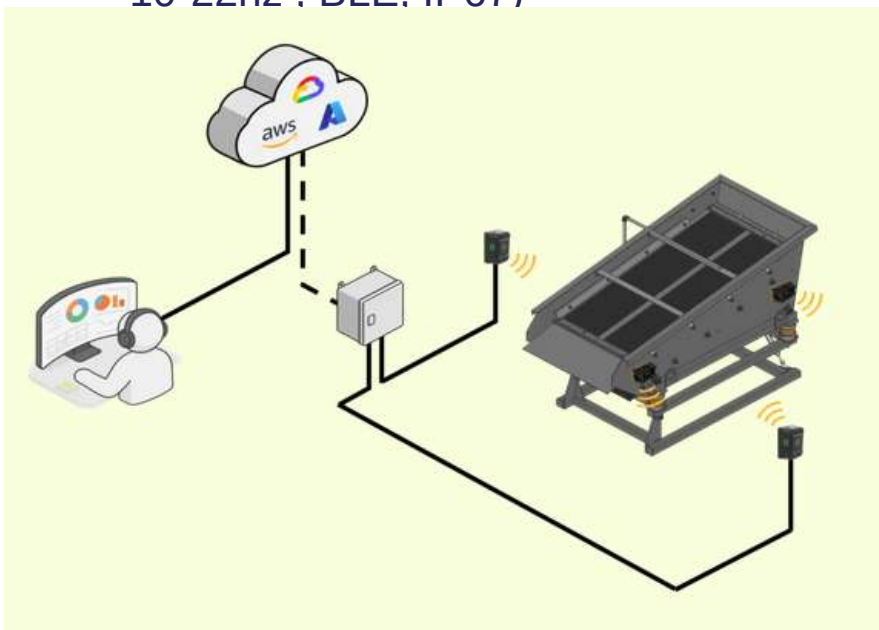
- Dimensions:
modelD: 61 mm (height) x 32 mm (diameter)
modelQ: 25 mm x 25 mm x 25 mm (1x1x1")
modelA: 155 mm x 53 mm x 17 mm
- Weight:
modelD: 120 g
modelQ: 60 g
modelA: 300g
- Operating temperature: -20 °C – +85 °C
- Service life:
> 10 yrs. (estimated, depending on application)
- Output Voltage
Standard: Unregulated AC
Optional: 2.8 - 5V DC
- Energy storage with super capacitor or rechargeable battery (optional)

Performance Parameters	
Input acceleration @ 60Hz	Power output
0.05 <i>g</i>	1 mW
0.1 <i>g</i>	4.5 mW
0.5 <i>g</i>	70 mW
1 <i>g</i>	150 mW
3 <i>g</i>	300 mW

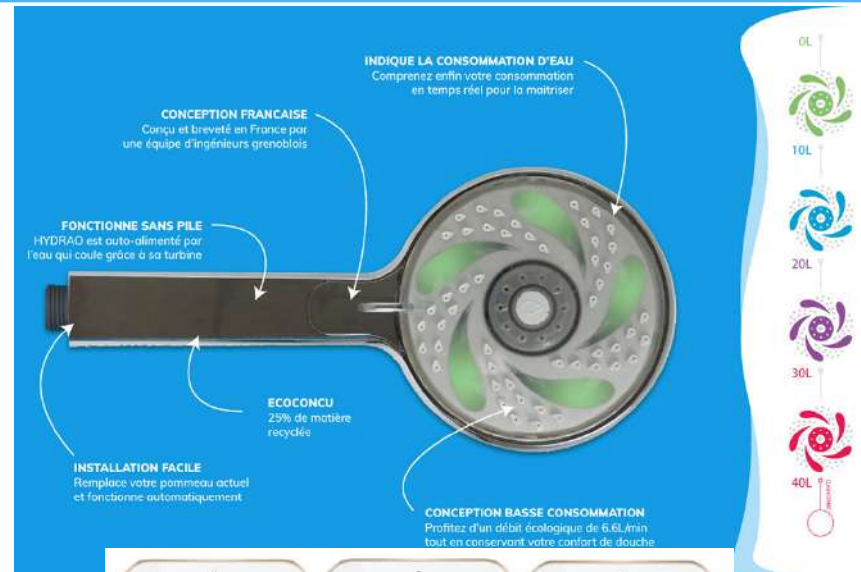
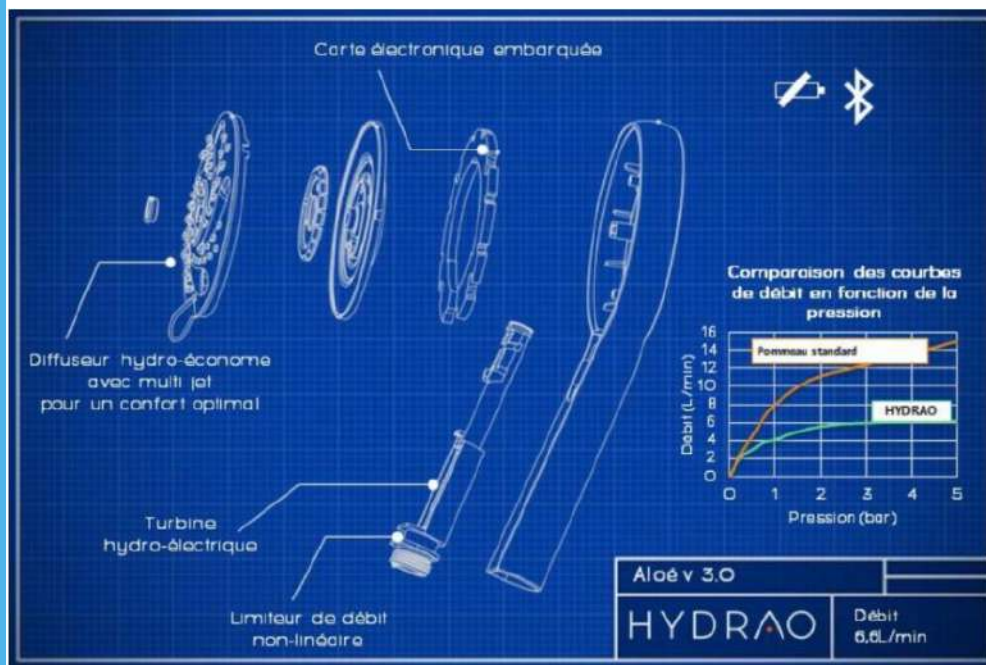
Input Vibration		
	Frequency	Acceleration
modelD	20 – 100 Hz (factory tuned)	0.05 – 1 <i>g</i> _{rms}
modelQ	20 – 100 Hz (factory tuned)	0.05 – 1 <i>g</i> _{rms}
modelA	15 – 100 Hz (factory tuned)	0.5 – 10 <i>g</i> _{rms}



- ReVibe Energy (Suède)
- Capteur de vibrations : ANURA™ Remote (piezoelectric)
- VS1 (accéléromètre 3axes +/-16G, ech 16Khz 10-22hz . BLE. IP67)



- Hydrao (38)
- microturbine



- Molleau (75)

- microturbine
- sans batterie, dès 4.5L/min
- remontée des données en Bluetooth



- Kinetron (Pays-Bas)
- Turbines
 - Démarre à partir de 2.6L/min pour 850mW max
 - Démarre à partir de 1.8L/min pour 350mW max
- Solutions à base de turbine
 - Timer (CoVid)
 - Température, volume de liquide
 - Alimentation 1.5V à 12V
 - *Communication sans fil en option*



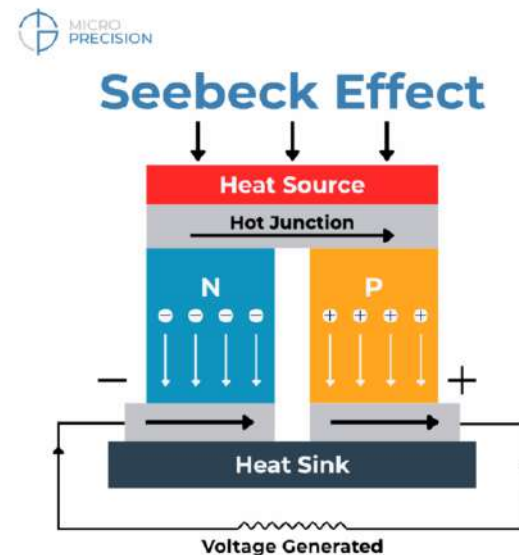
Énergie thermique



Énergie thermique

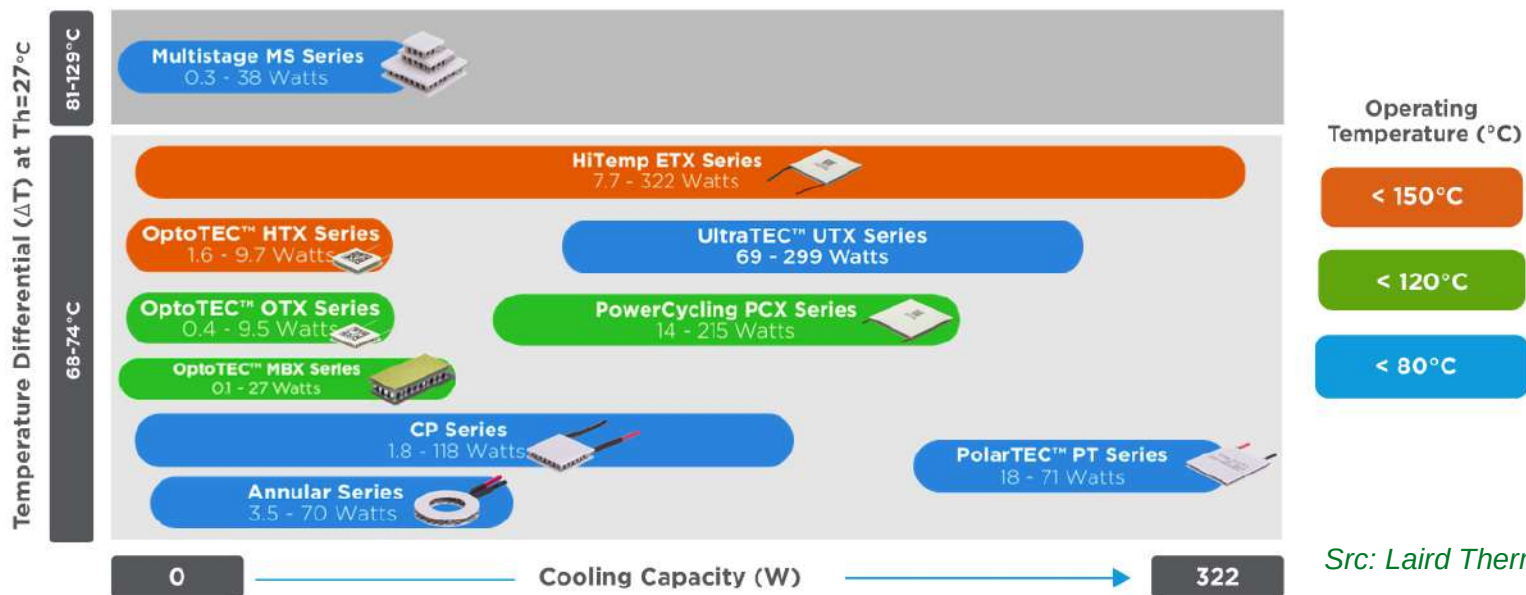
- Effet Seebeck

- Différence de température à une jonction de deux conducteurs (métaux) différents génère une tension
- Migration des porteurs de charge de la jonction chaude vers la froide.



Énergie thermique

- ThermoElectric Generator
 - Fabricants : Laird Thermal System, Eureka, European Thermodynamics Limited, Marlow Industrie, Sheetak, MicroPelt...

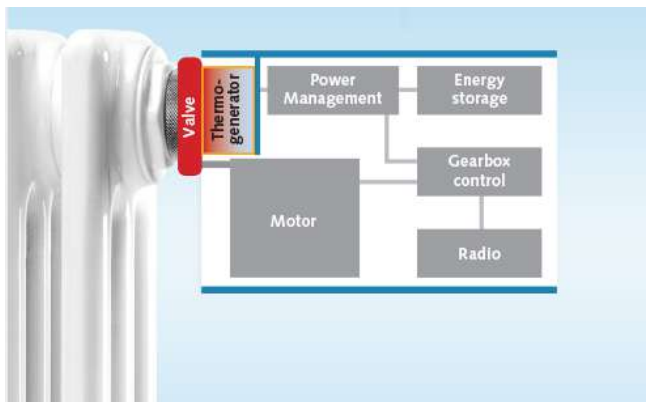


Src: Laird Thermal System

Énergie thermique

- Générateur thermoélectrique
 - MicroPelt

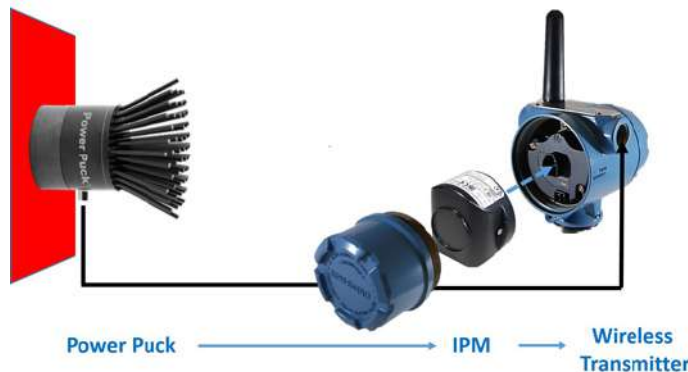
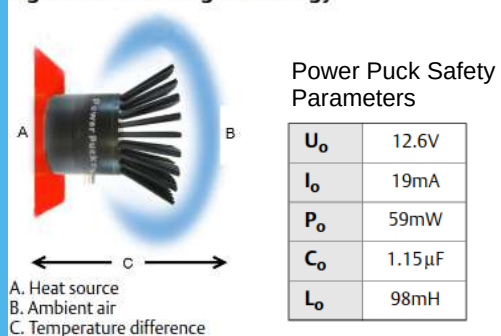
ITRV MVA-004



Énergie thermique

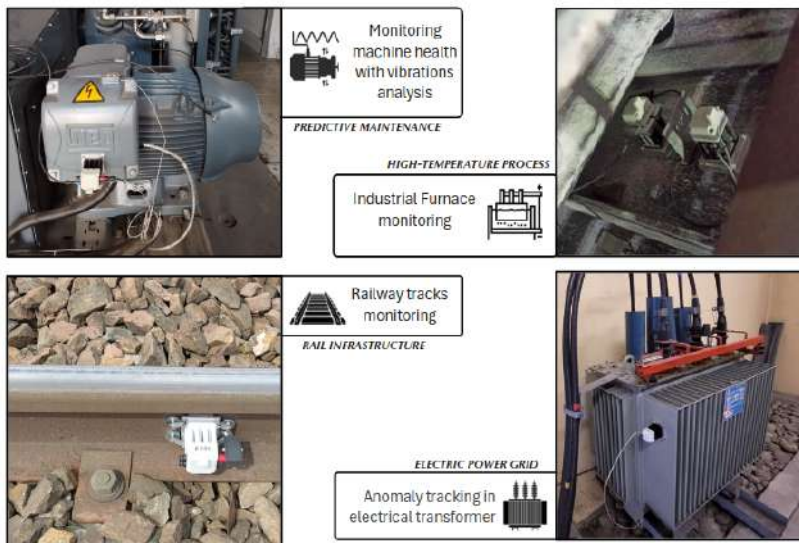
- Perpetua Power by Grace Technologies, Inc (US)
 - Power Pucks / Power Tile
 - Solution de montage sur des surfaces -45°C jusqu'à 450°C avec extensions
 - Class I Div 1 (équivalent ATEX Zone0/20 - gaz)
 - Alimente
 - des transmetteurs de données sans fil d'emerson
 - des solutions 24V 4/20mA (Power Tile)
 - des solutions jusqu'à 11,5V (Power Pucks)
 - Efficacité maximisée à partir d'un $\Delta T \geq 40^\circ\text{C}$

Figure 1. Converting into Energy



Énergie thermique

- Moiz (38)
 - Harvestree
 - À partir $\Delta T \geq 7^{\circ}\text{C}$
 - Solution de montage sur des surfaces -40°C jusqu'à 180°C
 - ATEX: Ex II 2 G Ex ib



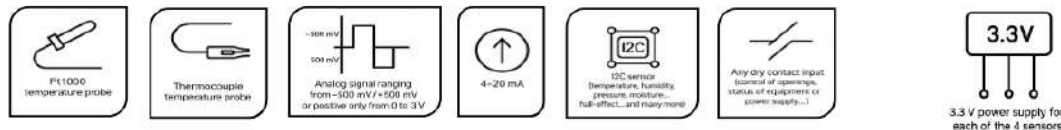
Énergie thermique

- Moiz (38)

The Harvestree module is natively compatible with a wide range of industrial sensor types:



It can supply up to 3.3 V to external sensors, making it compatible with virtually any physical quantity you may need to monitor and unlocking thousands of possible use cases. Please refer to our catalog of compatible sensors.



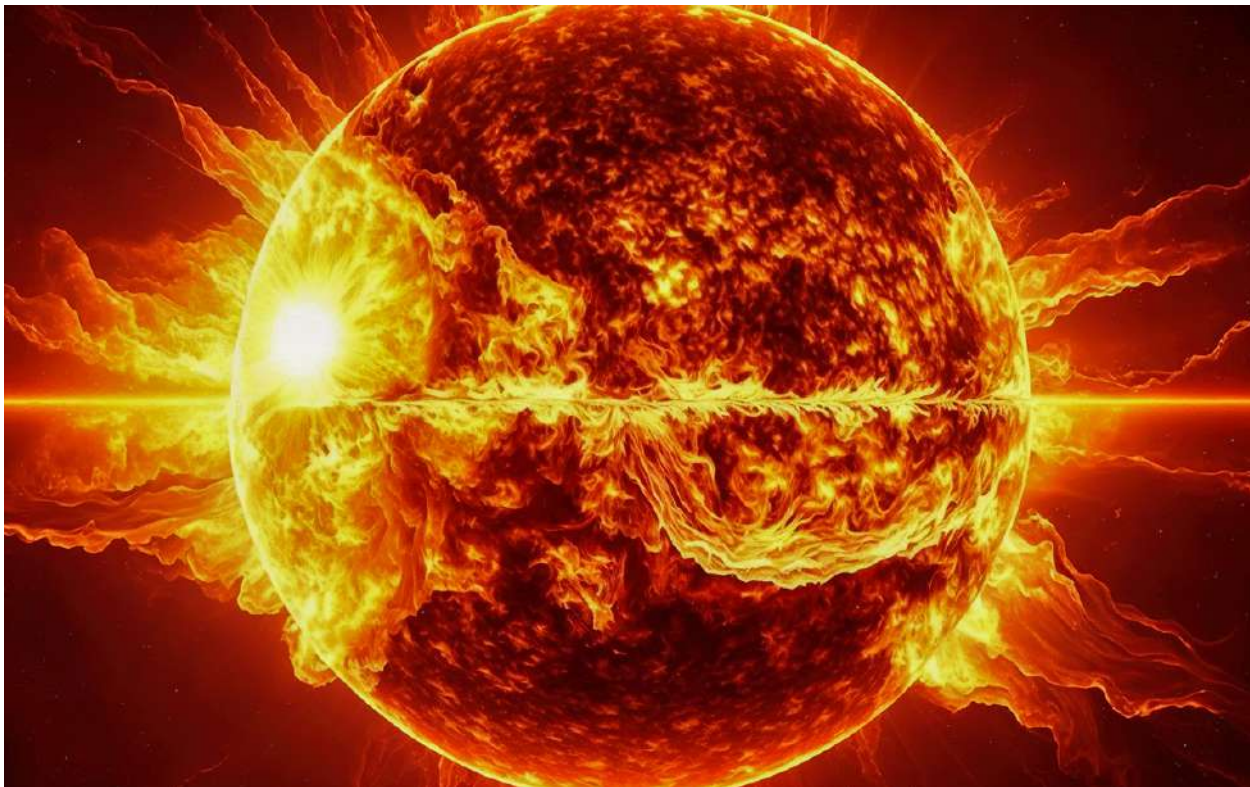
Énergie thermique

- Escom Enhance Solution (Turquie)

01 POWER SOURCE Thermoelectric Energy Harvesting ($\Delta T \geq 5^{\circ}\text{C}$)	02 SENSOR OPTIONS RTD, Thermocouple, Digital Probes	03 MEASUREMENT SPANS From -193°C up to $+1200^{\circ}\text{C}$ (Probe Variant Dependent)
04 COMMUNICATION PROTOCOL BLE (via Wi-GaTe Gateway Connection)	05 TELEMETRY REFRESH RATE $\geq 500\text{ms}$ (Dynamic / Customizable)	06 OPERATING TEMPERATURE -40°C to $+105^{\circ}\text{C}$
07 PROTECTION AND COMPLIANCE IP68, CE (ATEX Certification In Progress)	08 DIMENSIONS 55 x 55 x 87.80 mm + probe length	09 WEIGHT 425 g + probe weight
10 RF TRANSMIT POWER +8 dBm	11 PROBE LENGTH Customizable to Application	



Énergie lumineuse

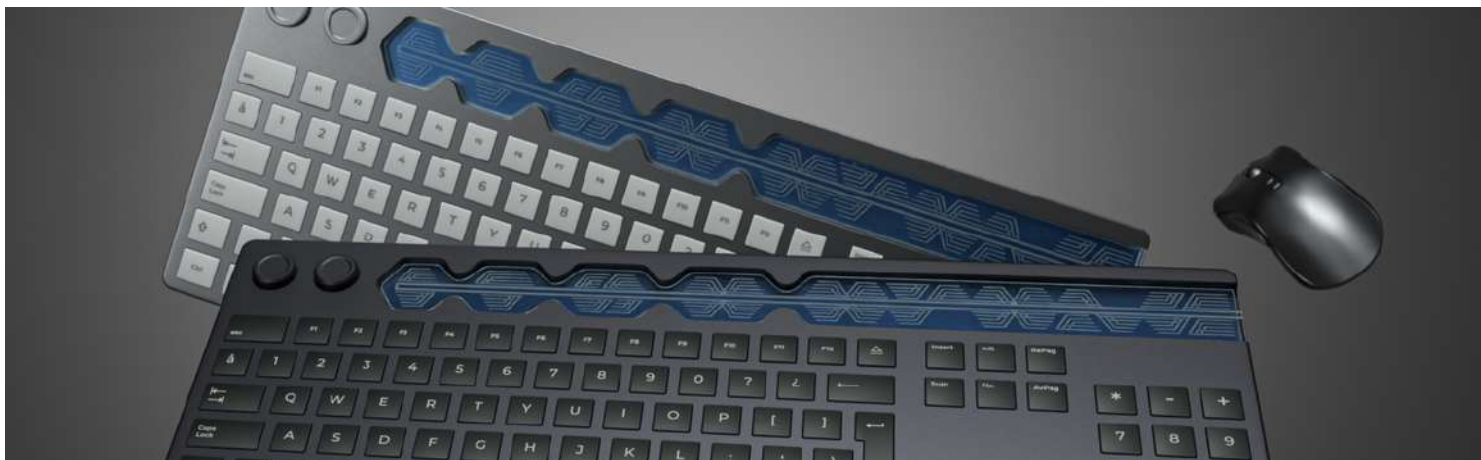


Énergie lumineuse

- Utilisation de panneaux solaires
 - silicium poly/mono cristallin
 - silicium amorphe
 - HJT
 - organic (OPV)
 - en cours de développement à base de pérovskite imprimée (Halogénure de Pb ou Sn)
 - Société : Perovskia Solar
 - $80 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ à 1000 lux, rendement $25\% < \eta < 30\%$
 - Sensible à un spectre solaire plus large (et en intérieur)

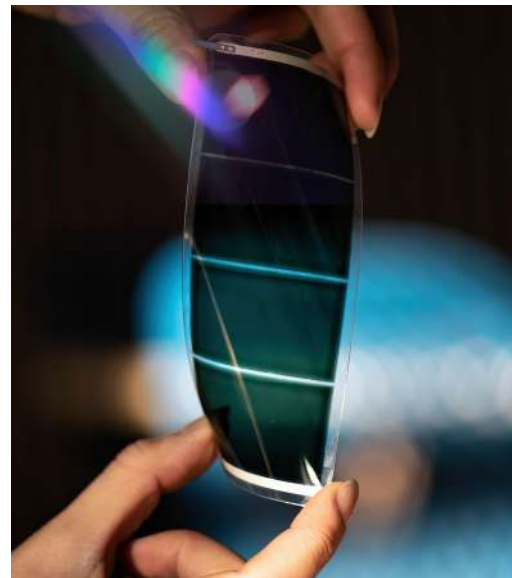
Énergie lumineuse

- Ex : Clavier autonome
 - Asca de Armor group (44)
 - Alimentation via OPV à partir de 100 lux
 - 90cm² de cellules



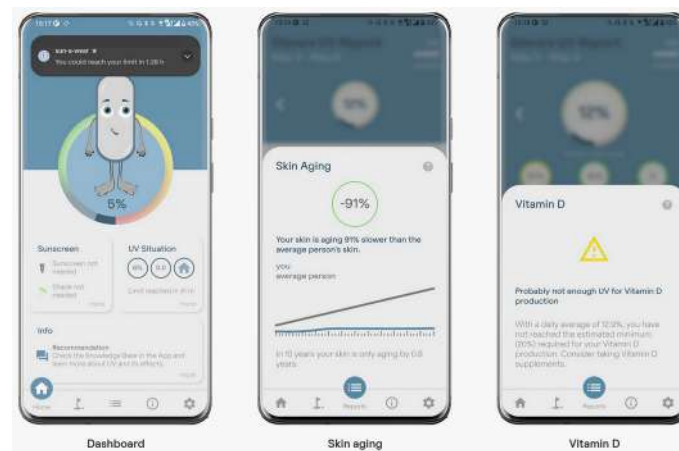
Énergie lumineuse

- Ex : XgenTag-L : Tag autonome pour la traçabilité temps réel
 - Paragon ID (18) & Dracula Technologie (26)
 - Alimentation via OPV à partir de 5 lux
 - Localisation via BLE



Énergie lumineuse

- Ex : Sun-a-wear : capteur d'UV
 - Sans batterie

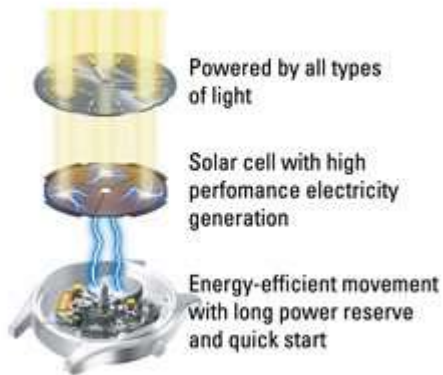


Énergie lumineuse

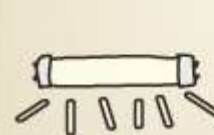
- Ex : Extension d'autonomie :



No Battery Change Required



SEIKO Solar watches can use any type of light.
They start to work in just after;



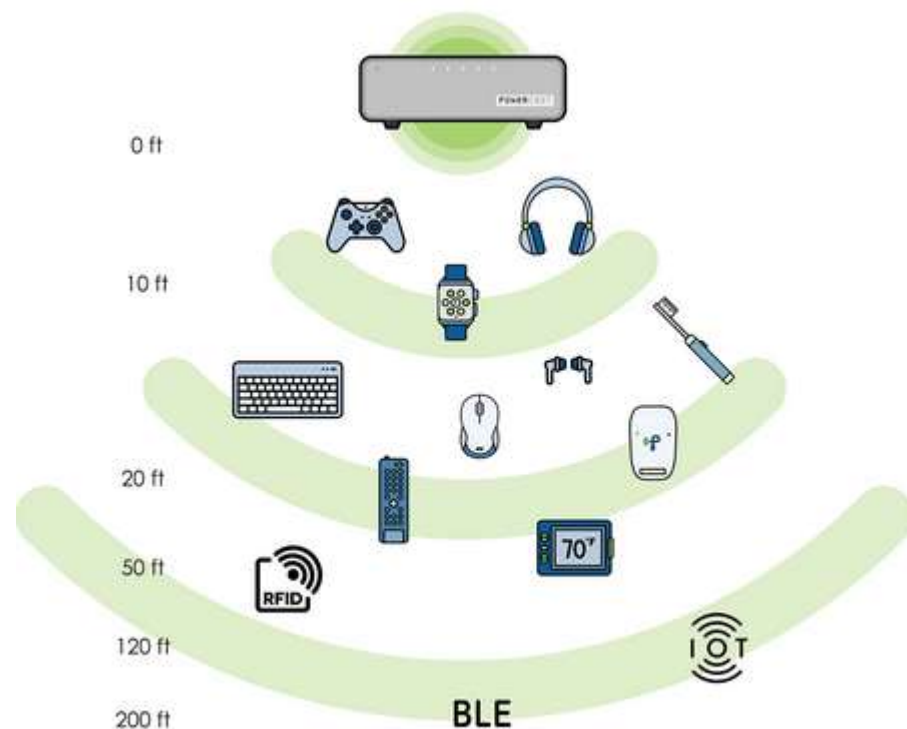
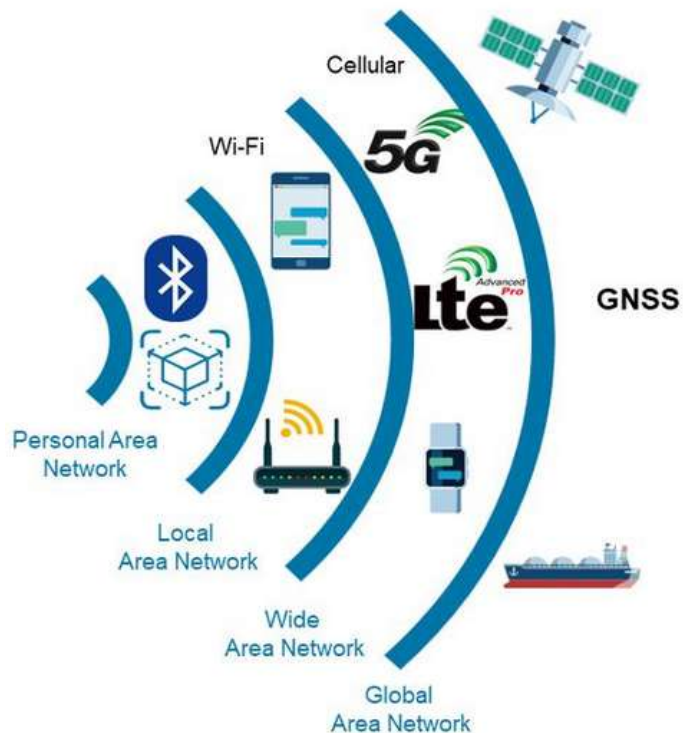
eleven minutes
of fluorescent light



one minute
of sun light

*30W 20 cm

Énergie magnétique rayonnée



Src: MathWorks, PowerCast

Énergie magnétique rayonnée

- Électromagnétique
 - Rectenna : Rectifying-Antenna : redresseur & antenne
 - RFID

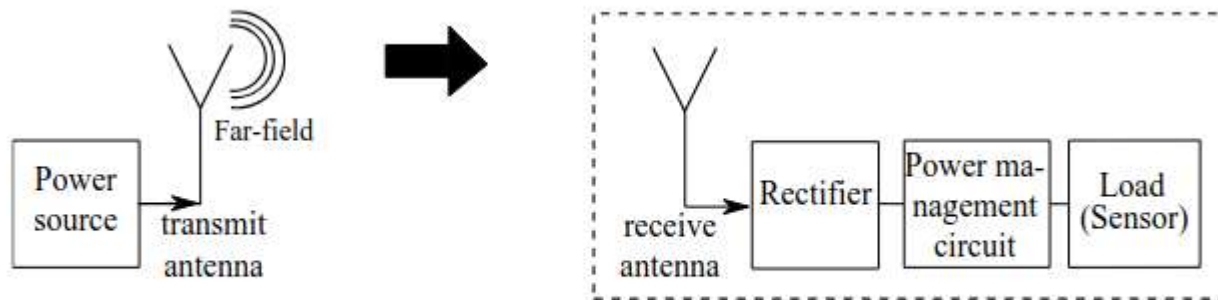


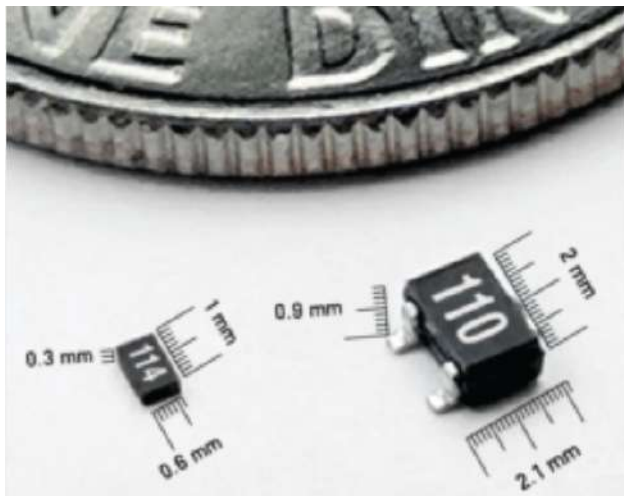
Figure 1.4. Radiative RF energy transfer system. The dashed box is commonly denoted rectenna.

Énergie magnétique rayonnée

- Utilisation de l'énergie des ondes émises
Convertisseur RF → DC



PCC110/PCC210
Powerharvester® Chipset



Features

- 10MHz to 6GHz Operating Range
- High conversion efficiency, up to 80%
- Wide RF operating range: -17dBm to +20 dBm
- Wide frequency range: 10MHz – 6GHz
- Commercial temperature range: -40°C to +85°C
- SC-70 package
- RoHS Compliant
- Compatible with multiple RF energy sources including RFID readers, NFC devices, WiFi routers, and Powercast Edge Hubs

PCC210

- High efficiency, up to 95%
- Operation down to 0.4V input
- Capable of 5.5V @ 50mA output
- Resistor settable output voltage
- SOT23-6 package
- RoHS compliant

Énergie magnétique rayonnée

- Utilisation de l'énergie des ondes émises
- Tag RFID ex : PCT100

=> UHF

=> mesure température, humidité et luminosité



Features

- EPC Class 1 Gen 2 compliant
- ISO/IEC 18000-6C compliant
- 10 meter read range
- High sensor accuracy
- "Find Tag" feature – locate one specific tag by illuminating an on-board LED
- Wide RF range: -17dBm to +20dBm
- Frequency range: 860MHz to 960MHz
- Compact hard case packaging
- RoHS compliant
- High RF to DC conversion efficiency – up to 75%
- -40 to +85C operational temperature range
- Completely battery-free
- Data accessible in user memory
- Fast read rate

Applications

- Medical Asset Tracking and Monitoring
- Smart Grid
- Building Automation
- Logistics
- Asset Monitoring
- Supply Chain Management
- Materials Management
- Industrial Monitoring



Énergie magnétique rayonnée

- Tags RFID
 - Asygn (38)
 - => UHF



RAIN RFID
compliant



Internal / external Sensors
Temperature, Strain, ALS, RH...



Battery free



Up to 7 meters reading range
Including sensor supply



Internal Analog Sensor Interface
Low Noise Amplifier and 10 bits
ADC



Fully configurable
Amp Gain, Sampling Frequency,
Averaging...



512 bits of memory for
configuration and data storage



Sense in EPC feature

Énergie radiofréquence

- Wiliot (Israël) : Williot IoT Pixels
 - Tag auto-alimentés par les ondes radio ambiantes
 - Connectivité Bluetooth
- Usage : chaîne d'approvisionnement, suivi temps réel, température, localisation..

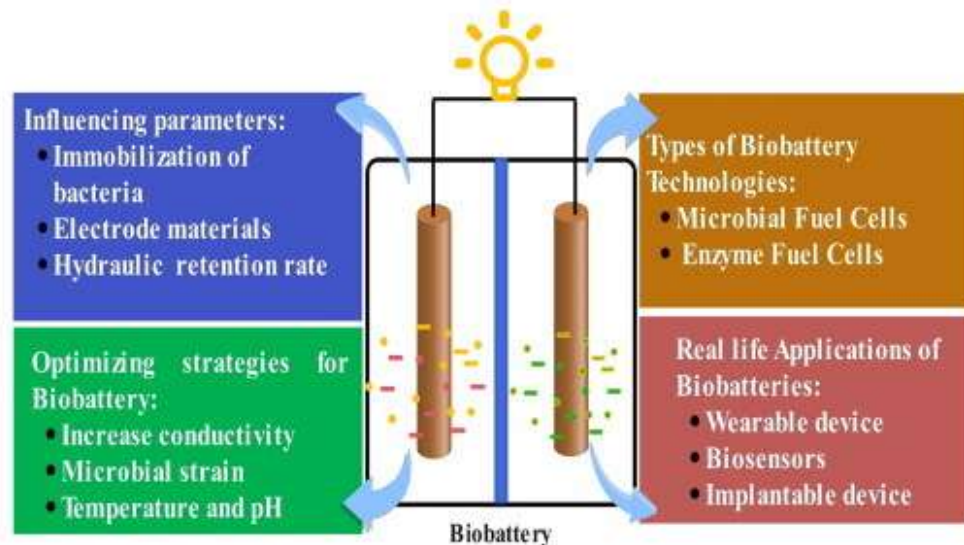


Énergie biologique



Énergie biologique

- Bio-batterie
 - Pile à combustible microbienne (MFC)
 - Pile à combustible enzymatique (EFC)
- Usage
 - Batterie portable
 - Biocapteur
 - Dispositifs médicaux



Src: <https://doi.org/10.1080/17597269.2025.2539584>

Énergie biologique

- Bio-batterie
 - Pile à combustible microbienne (MFC)
 - Bactéries issues environnement humide ou intestin humain
 - Shewanella oneidensis
 - Geobacter sulfurreducens
 - Des bactéries marines modifiées génétiquement
 - Des consortia microbiens pour augmenter la stabilité
 - Génèrent de l'électricité de part leur activité (électrogène)
 - Non pathogène



Src: généré par [IA muryou-aigazou.com](http://IA.muryou-aigazou.com)

Énergie biologique

- Bio-batterie

- Prototype de pile à combustible microbienne (MFC)
 - 2025 - Institut des technologies avancées de Shenzhen
 - *Shewanella oneidensis* MR-1 dans matrice d'alginate
 - Imprimée en 3D
 - $8.31 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, capacité de 0.4 mAh/g, 0.008 Wh/L
 - 99.5 % de rendement, auto-rechargeable 10 fois
 - Bactérie toujours en bonne santé après
 - Format pile CR2032

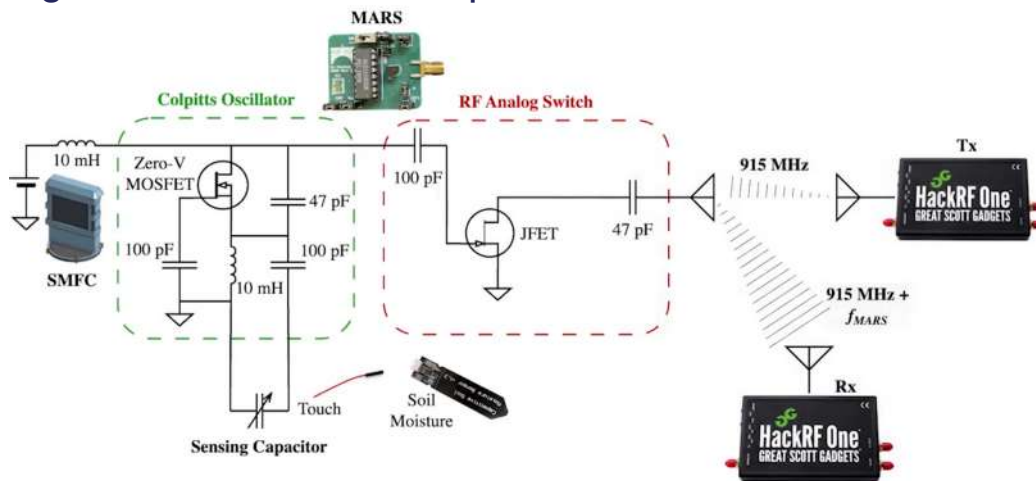


Src: généré par [IA muryou-aigazou.com](https://www.muryou-aigazou.com)

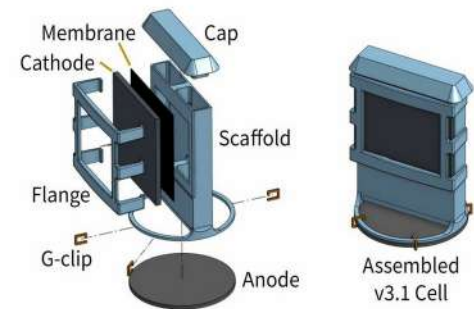
- Usage : stimulation nerveuse (au niveau du nerf vague ou du nerf sciatique par exemple)

Énergie biologique

- Bio-batterie
 - Prototype de pile à combustible microbienne (MFC)
 - 2024 - Université de Northwestern (US)
 - Format livre de poche
 - Usage : alimentation de capteur d'humidité de sol



SYSTEM DIAGRAM



Src: Bill Yen/Northwestern University

Énergie biologique

- Bio-batterie
 - Prototype de pile à combustible microbienne (MFC)
 - 2025 – Laboratoire suisse Empa
 - Anode : levure et sucre, cathode : champignon de pourriture blanc
 - $12.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ par cellule
 - Pile sur mesure (taille forme), imprimante 3D
 - Biodégradable
 - Activation en ajoutant de l'eau et des nutriments
 - Alimentation 65 heures, capteur de 4.35W (290mV , $10\text{-}15\mu\text{A}$) via 4 cellules en parallèles
 - Usage : capteur low power



Src: Empa

Énergie biologique

• Bio-batterie

- Pile à combustible enzymatique (EFC)
 - 2020 – Bioenzymatic Fuel Cell (38)
 - Papier + enzyme + sucre + électrolyte
 - Transformation du glucose en sucre
 - Durée de vie limitée à quelques heures ou 10 jours
 - Produit : électronique imprimée avec la pile papier et le fluide



Usage :

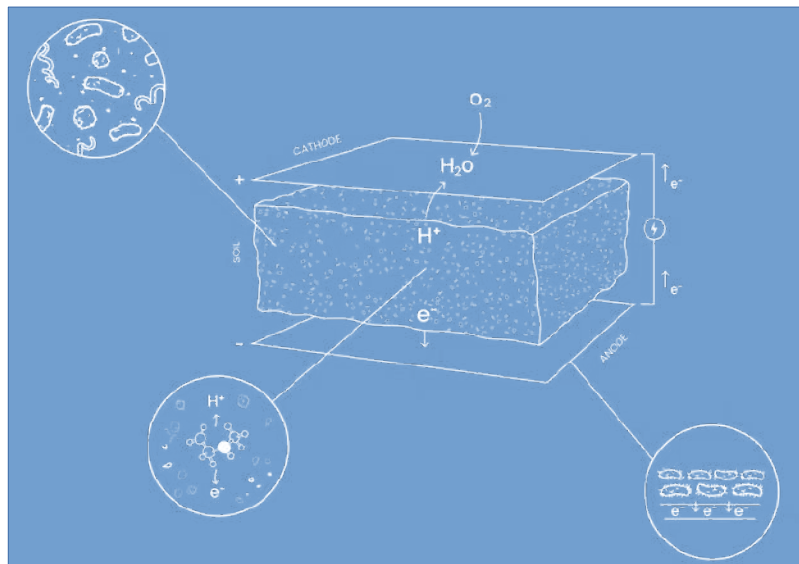
- patch diabétique,
- test de grossesse
- traçabilité dans le transport de marchandises (T°, hum, luminosité, choc)

Énergie biologique

- Réacteur biologique (Biootech)
 - Décomposition de la matière en électrons et en ions hydrogène
 - Contact de l'air génération vapeur d'eau
 - Micro-organismes créent un bio-film à la surface de l'anode tout en conduisant les électrons. Ils génèrent le courant électrique



WATER SAVINGS FROM IRRIGATION	48 %
HEAT COMPENSATED REDUCTION/INCREASE	4 °c
ENERGY SAVINGS FROM COOLING & HEATING	20 %
MAINTENANCE SAVINGS FROM AUTOMATION	60 %
ENERGY GENERATION IN 7X7 METERS	15 Wh/day
CO2 YEARLY ABSORPTION	8 Kg/m2
ROI AV. RETURN OF INVESTMENT	7 years

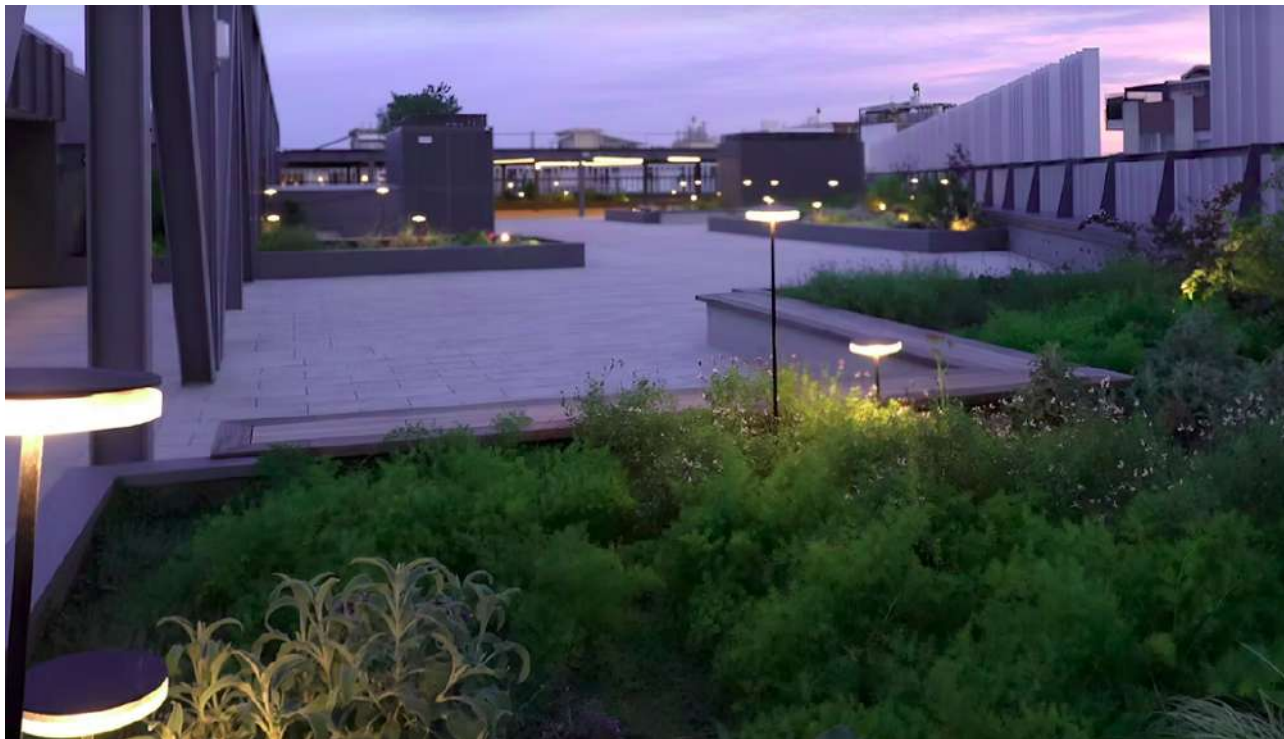


Src: www.biootech.com

Énergie biologique

- Réacteur biologique
 - En place à Barcelone

Src: www.biootech.com



Énergie éolien

- New World Wind (93)
 - AEROLEAF (Micro générateur)
 - 600x1000mm
 - 300W à 1000W
 - 48VDC
 - Démarre à partir de 2.5m/s
 - Structure arbre pour monter jusqu'à 36KW

Src: www.newworldwind.com

Vue éclatée — conception mécanique



Amélioration continue

Table 2. Comparison between energy harvesting sources [7, 8, 62].

Source type	Harvesting method	Power density
Solar	Photovoltaic	15 mW cm ⁻²
Wind	Electromechanical conversion	0.1–6 mW cm ⁻³
Vibrational	Piezoelectric/electromagnetic/ electrostatic/magnetoelectric/ triboelectric vibration conversion	0.1–300 mW cm ⁻³
Thermal	Thermoelectric conversion	15–40 μW cm ⁻³
Radio frequency	Electromagnetic conversion	1 μW cm ⁻² (WiFi)

Src:
*A comparative evaluation of IoT electronic
solutions for energy harvesting, Guerino
Avallone et al 2024 Nano Ex. 5 032001*

Src :
Indoor Energy Harvesting With Perovskite Solar Cells for IoT Applications A Full Year Monitoring Study, Matija Pirc et al. 2024 ACS, Vol7 issue 2

	Purpose	Peak Power [mW]	Min. Energy [mJ]
Wi-Fi	high speed	730	667
NB-IoT	long-range, low power	2000	200–12000
SigFox	long-range, low power	91	340
LoRa	long-range, low power	274	140
ZigBee	short-range, low power	125	152
BLE	short-range, low power	60	44
Passive Wi-Fi	ultra low power	15	30 <u>b</u>
Backscatter LoRa	ultra low power	9.25	16 <u>c</u>