



# Récupération d'énergie (Energy Harvesting/EH)

Principes et applications

Germain Pham - Reda Mohellebi - Yayi Lu

[yayi.lu@telecom-paris.fr](mailto:yayi.lu@telecom-paris.fr)

Mai 2026





# Plan

## Introduction

### Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF

Énergie thermique

Énergie mécanique

### Récupération d'énergie hybride

### Exercice

## "Energy Harvesting"

- "Récupération d'énergie" (pour l'électronique)
  - Micro ( $\mu$ ) / Milli (m) / Watts
- Application : Réseaux de capteurs communicants
  - Capteurs sans fils autonomes
  - Ne peut être branché au secteur
    - Alimentation locale
    - Batterie / Pile : Pratique et peu coûteux
    - Énergie limitée
    - Remplacement et/ou recharge périodique
- $\implies$  Récupération d'énergie
  - Remplace ou complète les batteries

Exemples ?

## Ordre de grandeur

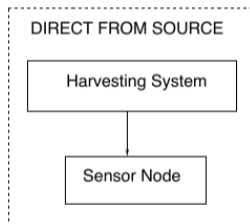
L'énergie récupérée pour faire fonctionner des électroniques est de l'ordre de  $\mu\text{W}$  ou même  $\text{mW}$ . Voici quelques exemples indicatifs :

**Table 1.1** Indicative harvested power values from different transducer types [8].

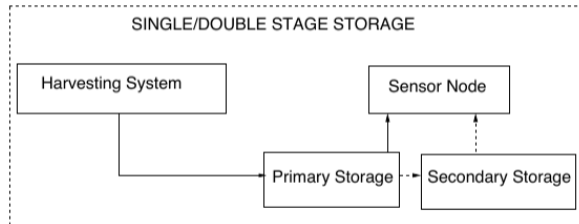
Energy source	Harvested power	Conditions / available power
Light / solar	60 mW	6.3 cm $\times$ 3.8 cm flexible a-Si solar cell AM1.5 Sunlight (100 mW/cm <sup>2</sup> ) [9]
Kinetic	8.4 mW	Shoe-mounted piezoelectric [10]
Thermal	0.52 mW	Thermoelectric generator (TEG), $\Delta T = 5.6 \text{ K}$ [11]
Electromagnetic	1.5 $\mu\text{W}$	Ambient power density 0.15 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ [12]

## Différentes stratégies de consommation d'énergie

### ■ Consommation immédiate ou stockage



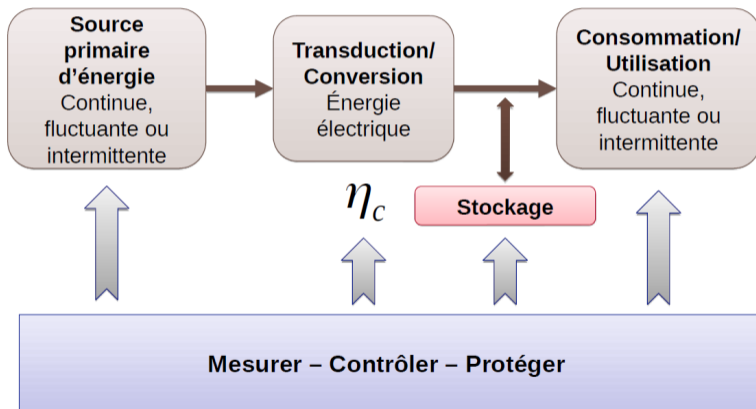
(a) Harvest-Use



(b) Harvest-Store-Use

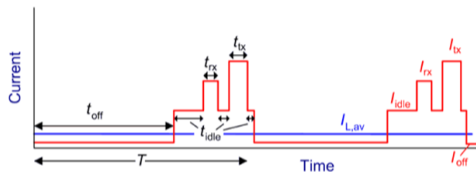
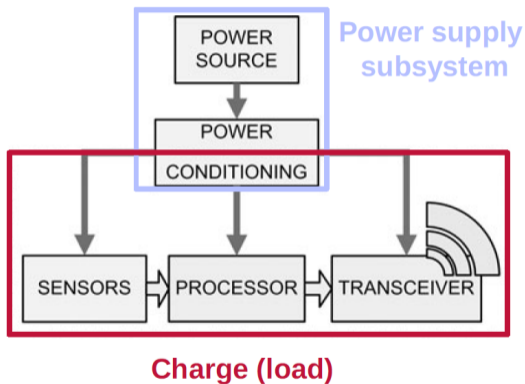
## Enjeux de la production et de la gestion d'énergie

- Découpler source et consommation / énergie et puissance



## Conception d'un capteur autonome

- Le nerf de la guerre : gestion de l'énergie

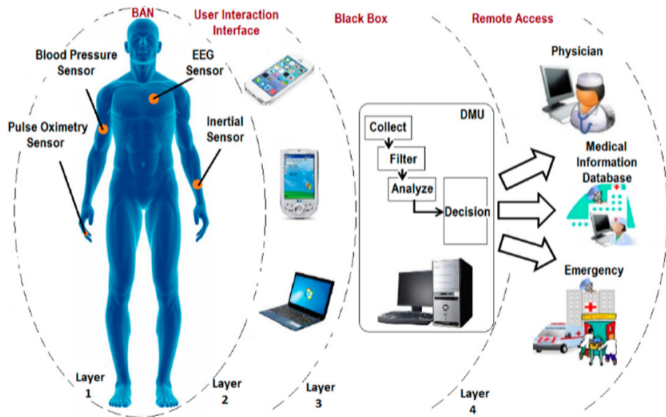


- Modélisation de la charge

- Capteurs
- Microcontrôleurs
- Transmetteur radio

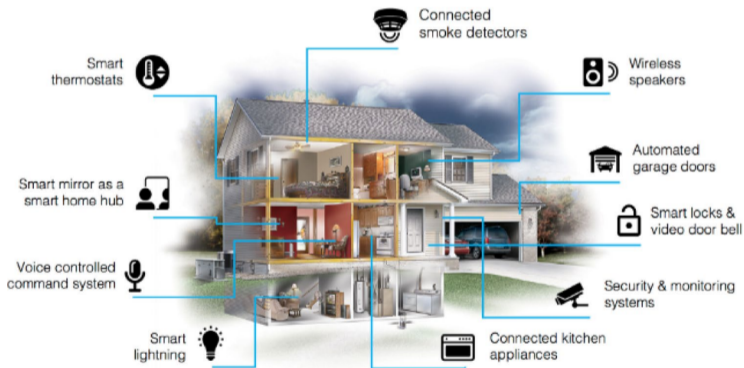
# Exemples d'applications

## ■ Santé



# Exemples d'applications

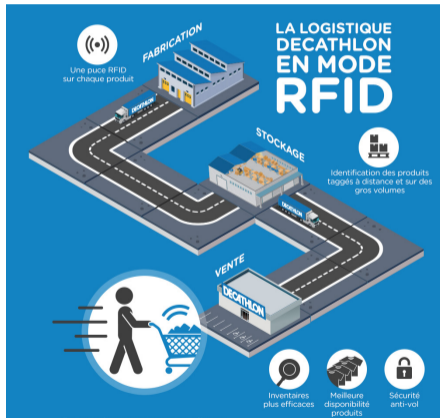
## ■ Bâtiment Intelligent



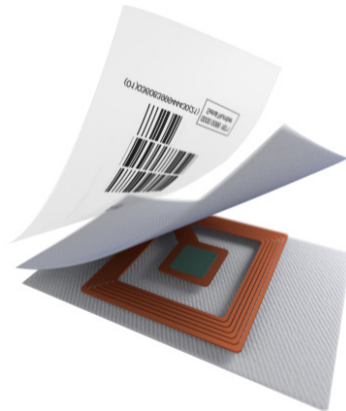
A Review on WSN Based Resource Constrained Smart IoT Systems (Section 2.4)  
Green Energy Harvesting and Management Systems in Intelligent Buildings for Cost-Effective Operation

## Exemples d'applications

### ■ Détection d'objets : Radio Frequency Identification/RFID



Decathlon: RFID



## Exemples d'applications

TABLE 1 – Différents modes de fonctionnement des systèmes RFID.

Mode	Passif	Actif	Semi-passif
Alimentation	pas de batterie, alimenté uniquement par le lecteur	batterie utilisée pour émettre le signal	batterie pour l'électronique, mais communication passive
Fréquence	860-960MHz	433MHz ou 2.4GHZ	plusieurs bandes possibles
Portée	jusqu'à 12m	jusqu'à 200m	entre les deux
Coût	≈<1\$ par tag	≈>5\$ par tag	entre les deux
Taille	plus compact	plus encombrant	entre les deux
Avantages	-> taille compacte & faible coût -> durée de vie plus longue (20 ans ou plus)	-> une surveillance indépendante -> capacité à initier des communications -> bande passante de données plus élevée	neutre
Inconvénients	-> distance de lecture plus courte -> usage unique / non réutilisable	-> durée de vie limitée -> plus encombrant	neutre
Types d'usage	gestion d'articles aux magasins	suivi des articles de grande valeur	surveillance de la température

Vidéo : Active vs Passive RFID Tags - All About RFID - Episode 3

& EE5308 Antenna Engineering enseigné par Prof. Zhining Chen à l'Université Nationale de Singapour



# Plan

Introduction

Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF

Énergie thermique

Énergie mécanique

Récupération d'énergie hybride

Exercice

# Plan

Introduction

Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF

Énergie thermique

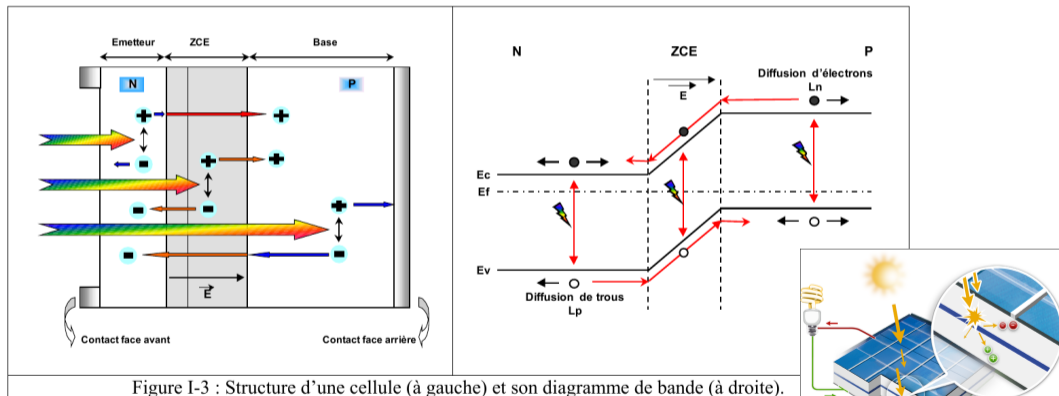
Énergie mécanique

Récupération d'énergie hybride

Exercice

# Caractéristiques des cellules photovoltaïques

## ■ L'effet photovoltaïque



Thèse Fatima Abdo

L'énergie solaire > De la lumière à l'électricité > Principe de l'effet photovoltaïque

# Caractéristiques des cellules photovoltaïques

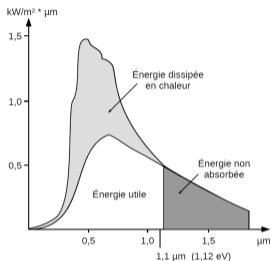
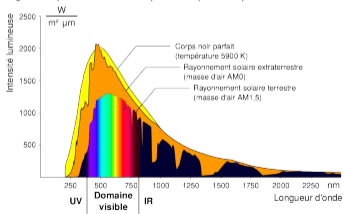


Fig. 3.4 – Spectre solaire AM0 et portions exploitables par le silicium cristallin

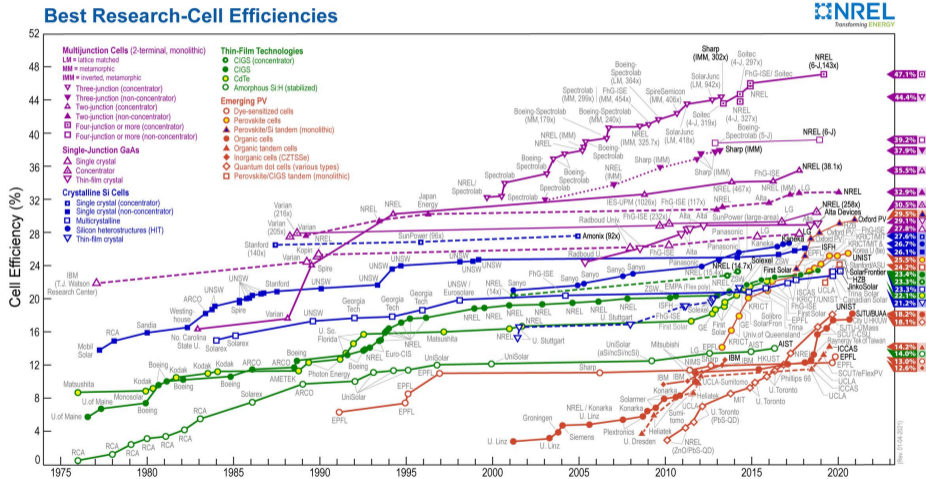


- Performances théoriques maximales des semi-conducteurs pour un rayonnement AM0 d'une puissance de  $1350 \text{ W/m}^2$

	Silicium Cristallin $E_g = 1.1 \text{ eV}$	Arséniure de gallium $E_g = 1.4 \text{ eV}$
Courant ( $\text{mA/cm}^2$ )	53.5	39
Puissance ( $\text{mW/cm}^2$ )	58.5	55
Rendement	0.44	0.41

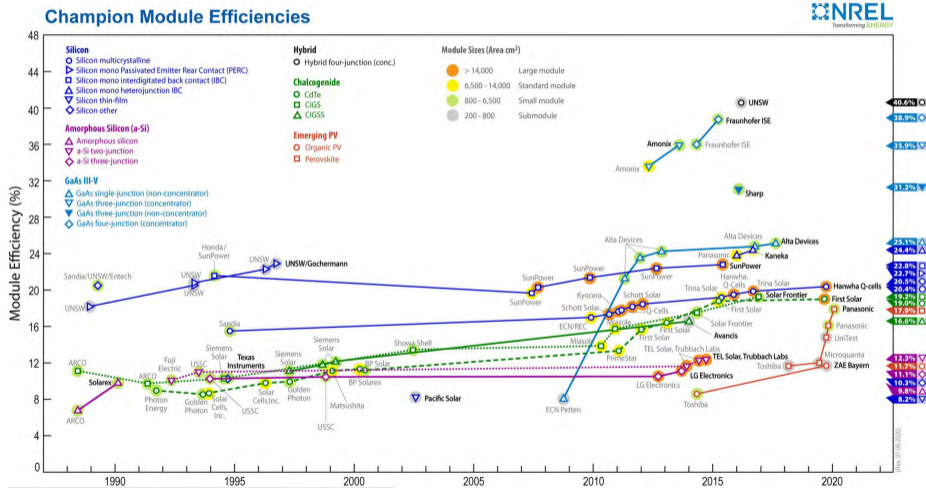
Energie solaire photovoltaïque ; Anne Labouret, Michel Villos

# Best Research-Cell Efficiency Chart



Best Research-Cell Efficiency Chart

# Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart

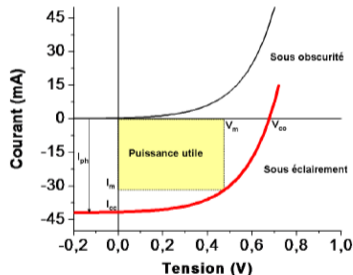


Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart

# Caractéristiques des cellules photovoltaïques

## ■ Propriétés électriques

- Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairement et sous obscurité.



$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{qV}{\nu kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

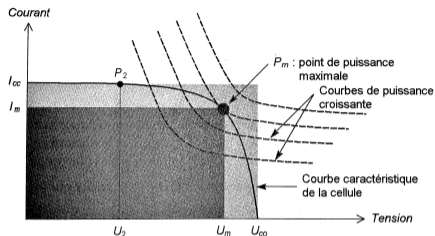


Figure 3.10 – Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension

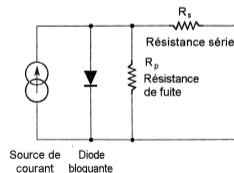
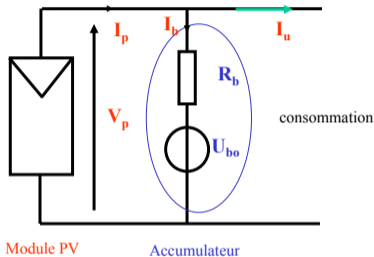


Figure 3.9 – Schéma équivalent d'une cellule solaire

Thèse Nordine Sahouane ; Energie solaire photovoltaïque ; Anne Labouret, Michel Villosi

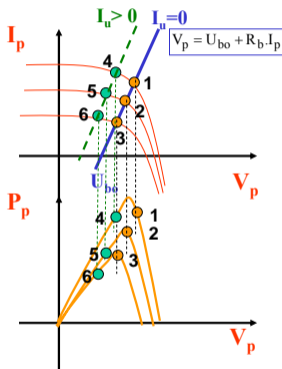
# Chaîne de conversion

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

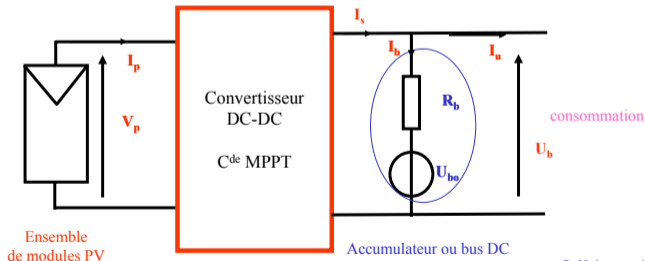
Récupération d'énergie pour les systèmes autonomes, Bernard Multon

# 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...



Récupération d'énergie pour les systèmes autonomes, Bernard Multon

# Applications

## Faibles besoins d'énergie en faible éclairement : Si amorphe

### Calculatrice *(source: Solems)*



Cellule de 3 à 4 cm<sup>2</sup>  
Fonctionnement direct sans accu  
qq  $\mu$ A sous 1.5V  
Seuil d'éclairement env. 50 lux  
(0,5 W/m<sup>2</sup>)

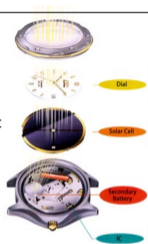
### Montres

Accumulateur nécessaire  
6 mois d'autonomie possible

Consommation d'une montre :  
< 1  $\mu$ A sous 1,5 V (1,5  $\mu$ W)

Avec un rendement de 4%,  
et une surface de 3 cm<sup>2</sup> :  
 $P_{PV} = 12 \text{ mW}$  à 120  $\mu$ W  
(11 s/jour à 18 min/j)

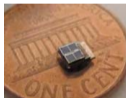
*(Source : Citizen)*



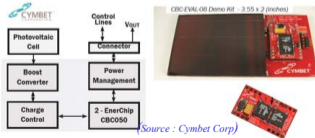
## Faibles encombrements, plus forts besoins : Si cristallin

### 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



# Applications

Silicium cristallin :



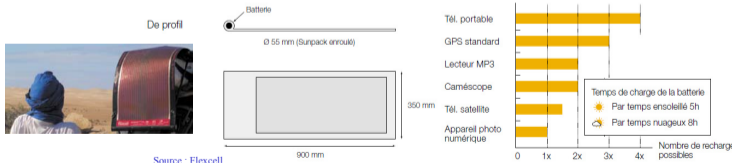
**Professional (13.8 Watts)**

0,1 m<sup>2</sup> @ 1000W/m<sup>2</sup> et 14% => 14 W



ICP Global Technologies : iSun Solar charger

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



Récupération d'énergie pour les systèmes autonomes, Bernard Multon



# Plan

Introduction

Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF

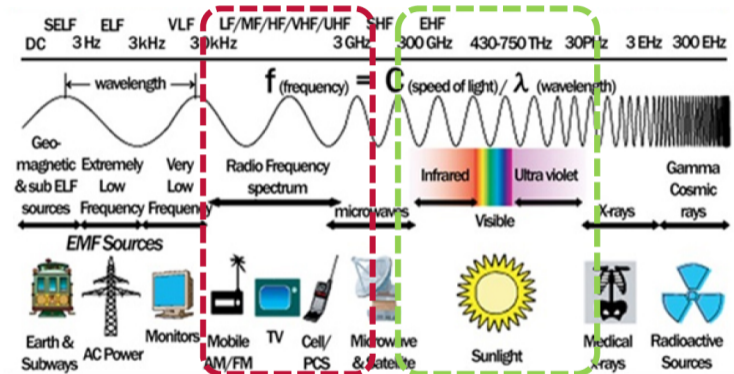
Énergie thermique

Énergie mécanique

Récupération d'énergie hybride

Exercice

# Le spectre électromagnétique et son exploitation



Source artificielle

Source naturelle

$$E = h\nu \rightarrow 12.4 \text{ feV} - 1.24 \mu\text{eV}$$

$$E = h\nu \rightarrow 1.24 \text{ meV} - 1.7 \text{ eV}$$

Radiation (beaucoup) moins énergétiques

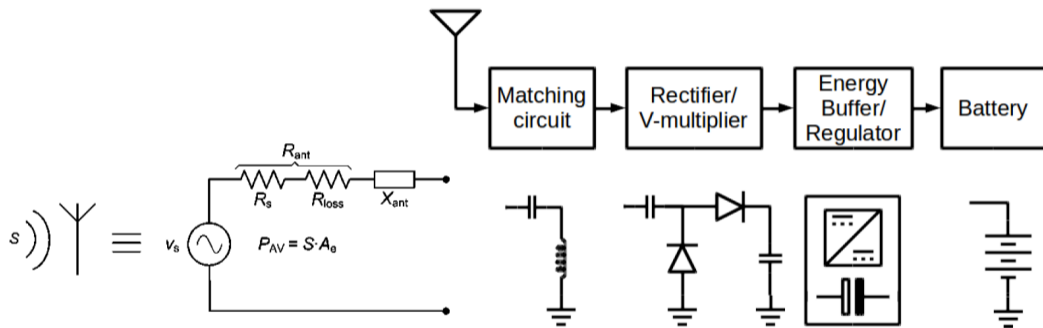
## Intérêt de la récupération d'énergie RF

- Circuits à intégration à très grande échelle (VLSI)
  - Circuits RF passifs  $\approx 2 - 100 \mu\text{W}$
- Systèmes embarqués hyperspécialisés
  - Nombre de tâches limités
    - Implémentation en ASIC  $\implies$  Conso Circuits génériques
- Beaucoup de matériaux sont transparents aux ondes radios
  - Peut être placé dans une zone fermée (vent, lumière)

---

Ambient Backscatter Communications: A Contemporary Survey  
RF Energy Harvesting for Embedded Systems: A Survey of Tradeoffs and Methodology

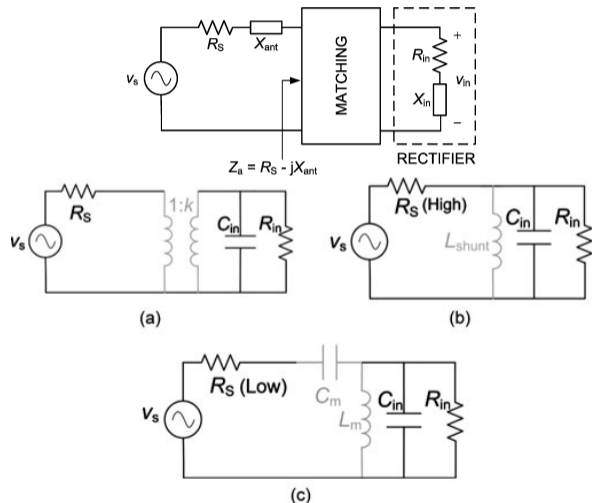
## Constitution classique



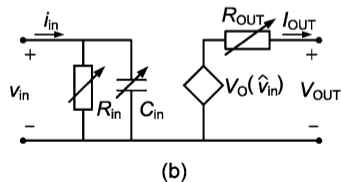
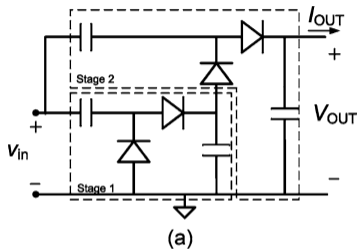
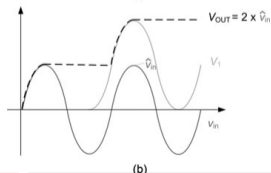
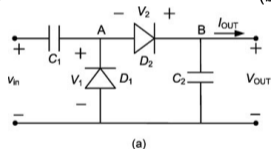
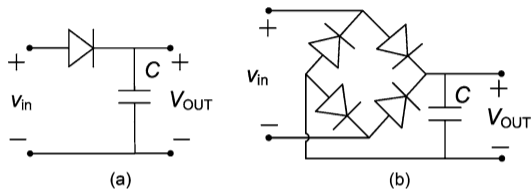
### ■ Conception sur mesure

- Applications extrêmement diverses
- Affecte la philosophie de conception des différents éléments du circuit.

## Constitution classique – Adaptation d'impédance



## Constitution classique – Redresseur





## Contraintes de conception

### ■ Distances de transmission :

- NF : couplage transfo
- FF : ondes planes

### ■ Fréquence centrale

- Basse fréquence
  - Grandes antennes
  - Bonne propagation
  - Adaptation d'impédance robuste
- Haute fréquence
  - Petites antennes
  - Mauvaise propagation
  - Adaptation d'impédance sensible aux parasites des circuits  $\implies$  IC

$$\lambda = \frac{c}{f} \implies \left\{ \begin{array}{ll} r \leq \frac{\lambda}{2\pi} & \text{Near Field Inductive} \\ \frac{\lambda}{2\pi} > r \leq 2\lambda & \text{Near Field Radiative} \\ r > 2\lambda & \text{Far Field Radiative} \end{array} \right.$$

$$\frac{\lambda}{10} < D < \frac{\lambda}{2} \left\{ \begin{array}{ll} r \leq 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} & \text{NF Inductive} \\ 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} > r \leq \frac{2D^2}{\lambda} & \text{NF Radiative} \\ r \gg \lambda, r \gg D & \text{FF Radiative} \end{array} \right.$$

Table 2.  
Commonly used Radio frequencies (RF) and corresponding wavelengths.  
 $\lambda/2\pi$  indicates the end of the inductive near field region.  
 $\lambda/4$  plays an important role in RFID antenna design.

Frequency	Band	Notes	$\lambda$	$\lambda/2\pi$	$\lambda/4$
125–134 KHz	LF	unregulated	2.3 km	367 m	577 m
13.56 MHz	HF	ISM global	22 m	3.5 m	5.5 m
865–868 MHz	UHF	EU: ISM	35 cm	5.5 cm	8.7 cm
902–928 MHz	UHF	USA: ISM	33 cm	5.2 cm	7.2 cm
2.4–2.48 GHz	UHF	ISM	12 cm	2 cm	3 cm
5.8 GHz	SHF	ISM	5.1 cm	0.8 cm	1.3 cm
5.8 GHz	SHF	ISM	5.1 cm	0.8 cm	1.3 cm

RF Energy Harvesting for Embedded Systems: A Survey of Tradeoffs and Methodology

## Contraintes de conception

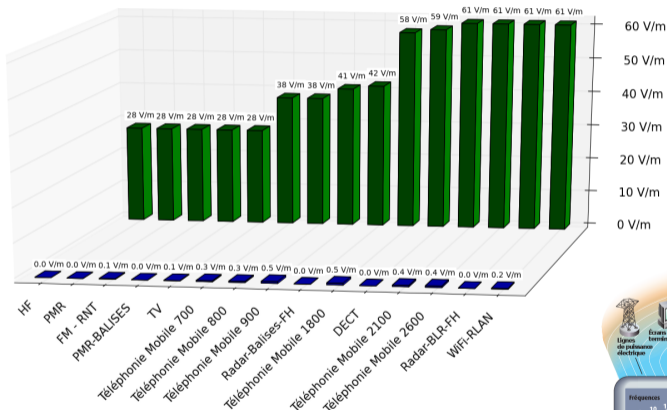
- Un émetteur (artificiel) obligatoire
  - Nœud unique dédié : « RFID reader »
  - Émetteurs décorrélés
- Puissance de transmission
  - Puissance d'émission : LIMITÉE !
    - Equivalent Isotropically Radiated Power (EIRP)
    - Ex : US : EIRP = 4 W (ISM 900 & 2.4)
  - Puissance à la réception (**équation des télécoms – Friis**)

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi r)^2}$$

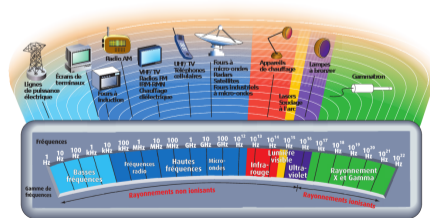
(2)

- Espace libre
- Utile pour définir une limite max
- En pratique l'atténuation est supérieure :  $\frac{1}{r^3}$  voire  $\frac{1}{r^4}$

# Récupération d'énergie RF ambiante



$$P \approx \mu W/cm^2$$

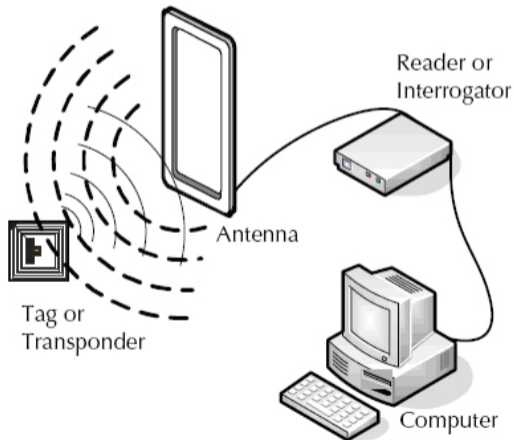


## Récupération d'énergie RF à source dédiée

- Émetteur conçu pour transmettre la puissance
  - A courte distance

$$P \approx 50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$$

- Exemple
  - RFID
  - Wireless sensor networks (WSN)
  - Wake up radios (WUR)



## Petit exo : étude de scénario

*Les spécificités de propagation des ondes radio sont telles qu'on ne peut pas utiliser la formule de l'atténuation en espace libre, mais une forme modifiée (en présence d'obstacles) :*

$$P_r = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 \left( \frac{d_0}{d} \right)^n \quad (3)$$

*avec  $n = 3$  et  $d_0$  une distance de référence (1 m dans notre cas).*

On considère que les gains des antennes sont de 3 dB. La puissance d'un émetteur Wi-Fi est de 20 dBm (rappel : la fréquence du signal Wi-Fi est de 2.4 GHz). On suppose que la distance entre un émetteur Wi-Fi et le récepteur de récupération d'énergie est de 7 m.

- Quelle est la puissance moyenne radio reçue au niveau du récepteur de récupération d'énergie (en considérant une seule borne d'émission Wi-Fi) ? Donnez le résultat en Watt et en dBm.

# Plan

Introduction

Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF

Énergie thermique

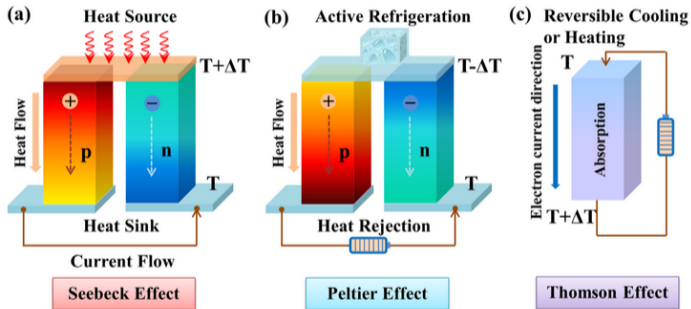
Énergie mécanique

Récupération d'énergie hybride

Exercice

## Énergie thermoélectrique

- Trois phénomènes régissent la conversion de l'énergie thermique en électricité et vice versa :



**Effet Seebeck** : le gradient de température entre deux matériaux semi-conducteurs différents mis en contact crée une tension.

# Énergie pyroélectrique

- Pyroélectricité (basée sur la variation temporelle de température)  $\neq$  Thermoélectricité (grâce au gradient spatial de température)

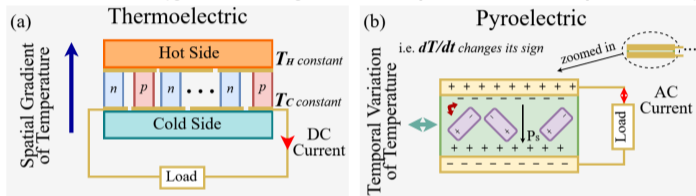


TABLE 2 – Comparison between thermoelectric and pyroelectric EH

	Thermoelectric	Pyroelectric
<b>Principle</b>	spatial gradient of $T$	temporal variation of $T$
<b>Transducer size</b>	thicker	thinner
<b>Output current</b>	DC	AC
<b>Efficiency</b>	lower	higher
<b>Power output</b>	$\mu W \sim kW$	$\mu W \sim mW$



# Plan

Introduction

Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF

Énergie thermique

Énergie mécanique

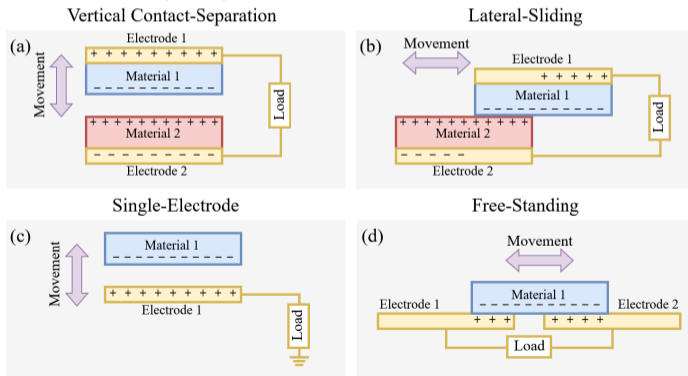
Récupération d'énergie hybride

Exercice

# Énergie triboélectrique

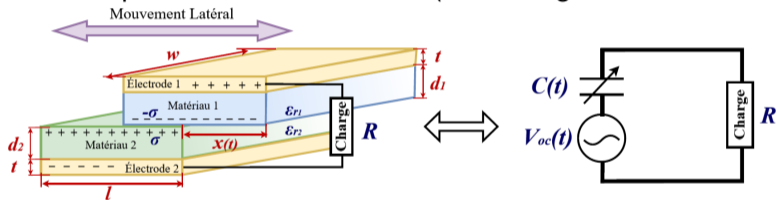
## ■ Une nouvelle technique prometteuse

- Un phénomène qui génère de l'électricité par frottement ou déformation de matériaux polarisés différents en contact. Il existe quatre modes de fonctionnements principaux :



## Énergie triboélectrique

- Transducteurs dédiés : **nanogénérateur triboélectriques (TENGs)**. Le 1<sup>er</sup> TENG date de 2012
- Circuit équivalent d'un LS-TENG (TENG à glissement latéral) :



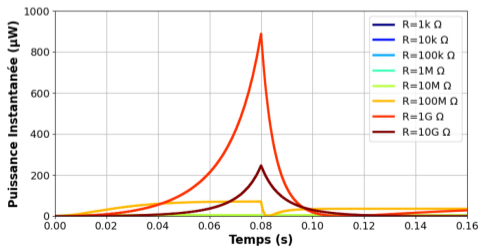
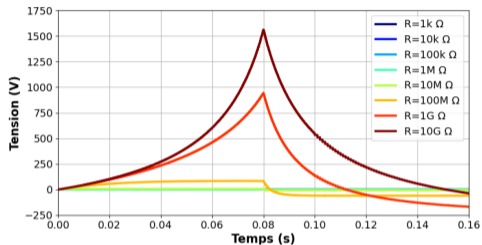
$$V(t) = -\frac{1}{C(t)} Q(t) + V_{oc}(t)$$

$$= -\frac{d_0}{w\epsilon_0(l-x(t))} Q(t) + \frac{\sigma d_0 x(t)}{\epsilon_0(l-x(t))},$$

avec  $d_0 = d_1/\epsilon_{r1} + d_2/\epsilon_{r2}$ .

(4)

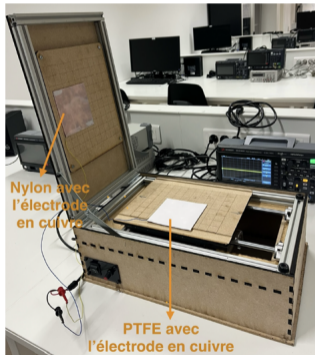
## Optimisation de la charge (LS-TENGs)



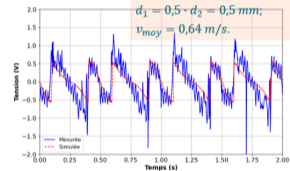
# Tests expérimentaux (LS-TENGs)

- Deux plaques de 10 cm × 10 cm (teflon & nylon) mises en contact ; un support mécanique (merci à M. Karim Ben Kalaia :) génère un mouvement latéral quasi-sinusoidal.

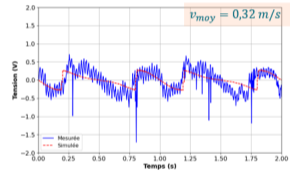
Montage mécanique



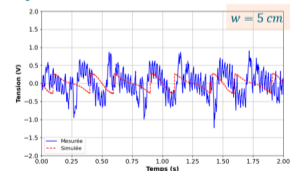
Cas de référence  $w = l = 10 \text{ cm}$ ;  $t = 0,035 \text{ mm}$ ;



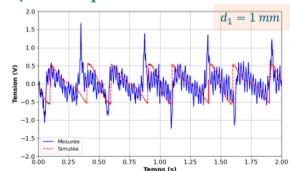
Vitesse réduite à moitié



Surface de contact réduite à moitié



Épaisseur  $d_1$  doublée





# Plan

Introduction

Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF

Énergie thermique

Énergie mécanique

Récupération d'énergie hybride

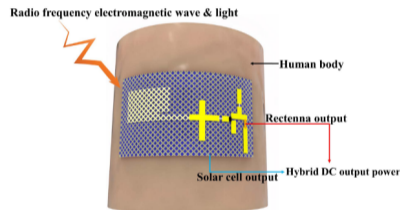
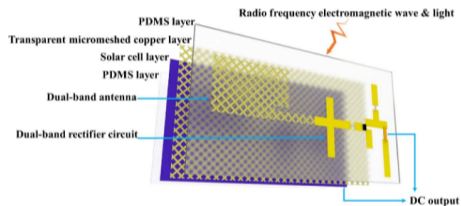
Exercice

## Limites d'une récupération mono-source

- **Intermittence de la source d'énergie** : une source n'est généralement pas disponible en permanence.  
*Exemple : l'énergie solaire n'est pas disponible la nuit.*
- **Hétérogénéité de la distribution spatiale** : la densité de puissance récupérable n'est pas uniforme.  
*Exemple : l'énergie solaire est plus abondante à l'extérieur. La densité de puissance RF varie entre les villes et les banlieues.*
- **Manque de flexibilité** : forte dépendance à une seule source.

# Exemples

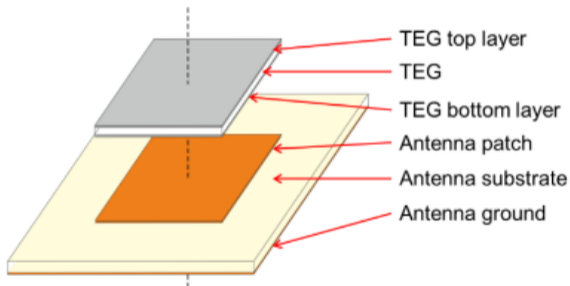
## RF-solaire



Flexible and Wearable Hybrid RF and Solar Energy Harvesting System

## Exemples

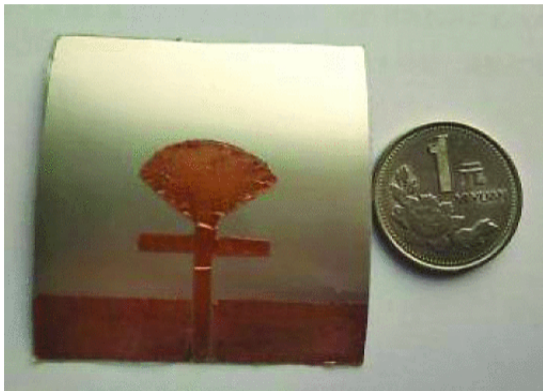
### ■ RF-thermoélectrique



Design and optimization of an antenna with Thermo-Electric Generator (TEG) for autonomous wireless nodes

## Exemples

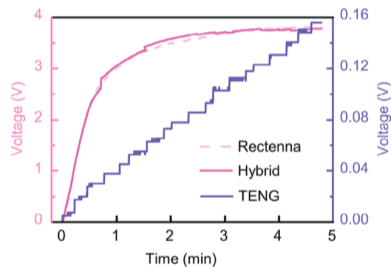
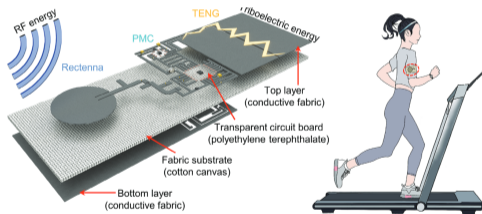
### ■ RF-piézoélectrique



Dual-band energy harvesting antenna based on PVDF piezoelectric material

# Exemples

## RF-triboélectrique



Wearable All-Fabric Hybrid Energy Harvester to Simultaneously Harvest Radiofrequency and Triboelectric Energy



# Plan

Introduction

Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF

Énergie thermique

Énergie mécanique

Récupération d'énergie hybride

Exercice

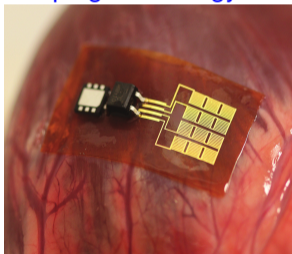


## Exercice

- Récupération d'énergie
  - Exercice 1 : Capsule cardiaque (Suite et fin)

## Conclusion

- La récupération d'énergie est un domaine très exploré et en constante évolution
  - Progrès technologiques en microélectronique
  - Ex : [Reaping the Energy Harvest](#)



- Améliorer les performances des solutions existantes permet d'accroître les fonctionnalités des capteurs sans fils autonomes