



IP PARIS



# Récupération d'énergie (Energy Harvesting)

Principes et applications

Germain Pham - Reda Mohellebi

dpham@telecom-paris.fr

Juin 2024







# Plan

## Introduction

### Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF



# "Energy Harvesting"

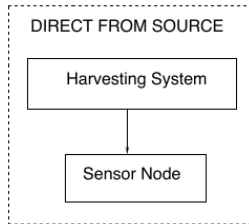
- "Récupération d'énergie" (pour l'électronique)
  - Micro ( $\mu$ ) / Milli (m) / Watts
- Application : Réseaux de capteurs communicants
  - Capteurs sans fils autonomes
  - Ne peut être branché au secteur
    - Alimentation locale
    - Batterie / Pile : Pratique et peu coûteux
    - Énergie limitée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

Exemples ?

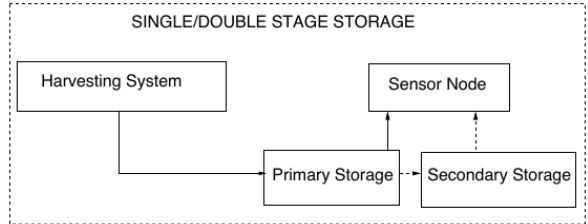


# Différentes stratégies de consommation d'énergie

## ■ Consommation immédiate ou stockage



(a) Harvest-Use

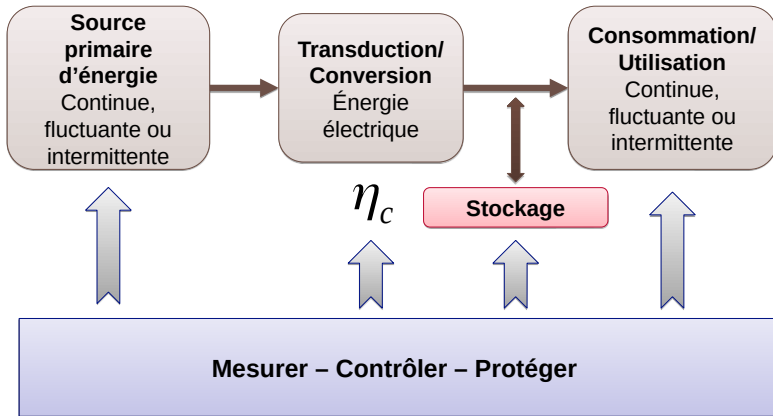


(b) Harvest-Store-Use



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

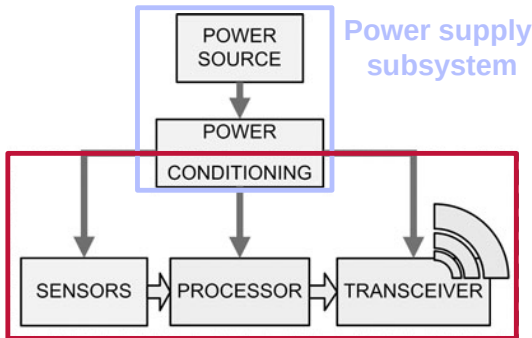
- Découpler source et consommation / énergie et puissance



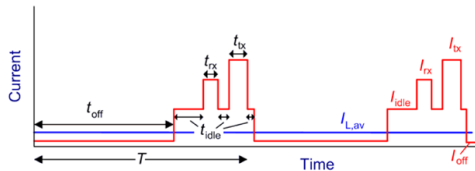


# Conception d'un capteur autonome

## ■ Le nerf de la guerre : gestion de l'énergie



**Charge (load)**



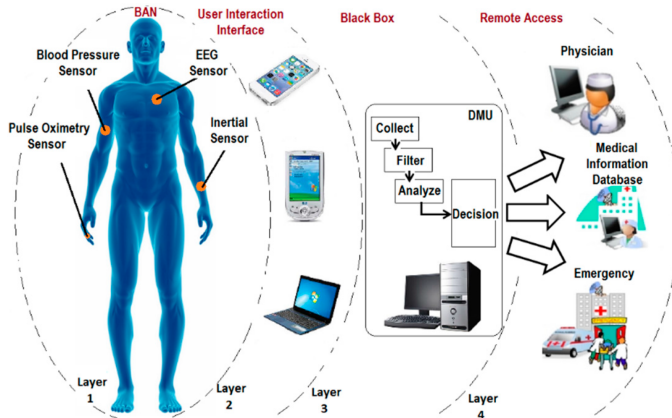
## ■ Modélisation de la charge

- Capteurs
- Microcontrôleurs
- Transmetteur radio



# Exemples d'applications

## ■ Santé

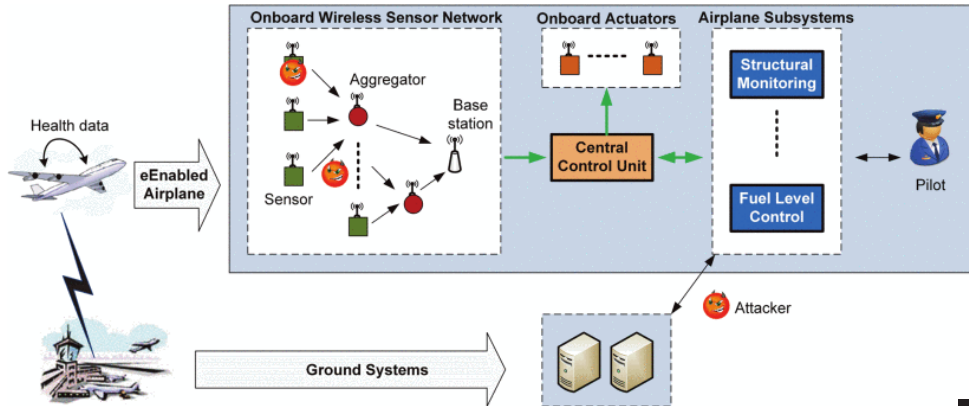


A Survey on Wireless Body Area Networks for eHealthcare Systems in Residential Environments



# Exemples d'applications

## ■ Aérospatial



Secure wireless collection and distribution of commercial airplane health data



## Exemples d'applications

### ■ Surveillance de l'environnement

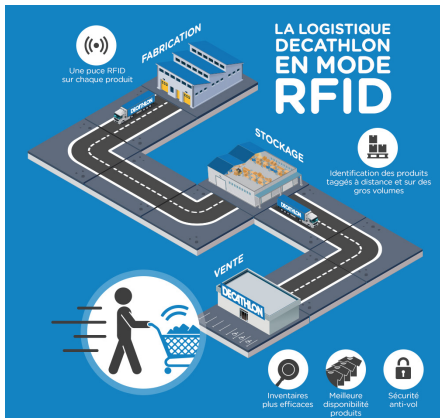


Environmental Wireless Sensor Networks

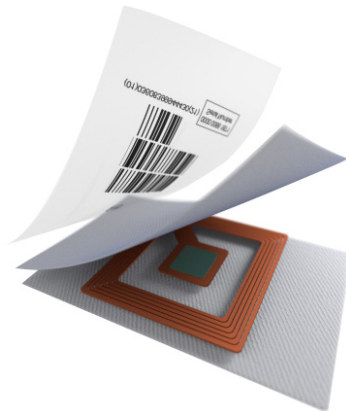


# Exemples d'applications

## ■ Détection d'objets



Decathlon: RFID







# Plan

## Introduction

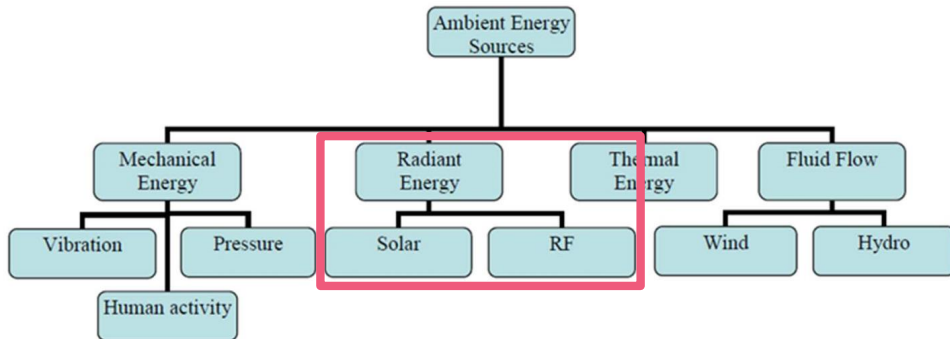
### Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF



# Énergies de l'environnement ambiant





## Quelques chiffres (Ordres de grandeur)

Energy	Category	Harvested power
Human	Vibration/Motion	$4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
Industry	Vibration/Motion	$100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
Human	Temperature	$25 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
Industry	Temperature	$1-10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
Indoor	Light	$10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
Outdoor	Light	$10 \text{mW}/\text{cm}^2$
GSM/3G/4G	RF	$0.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
Wi-Fi	RF	$1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

The Fundamentals of Energy Harvesting





# Plan

Introduction

Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

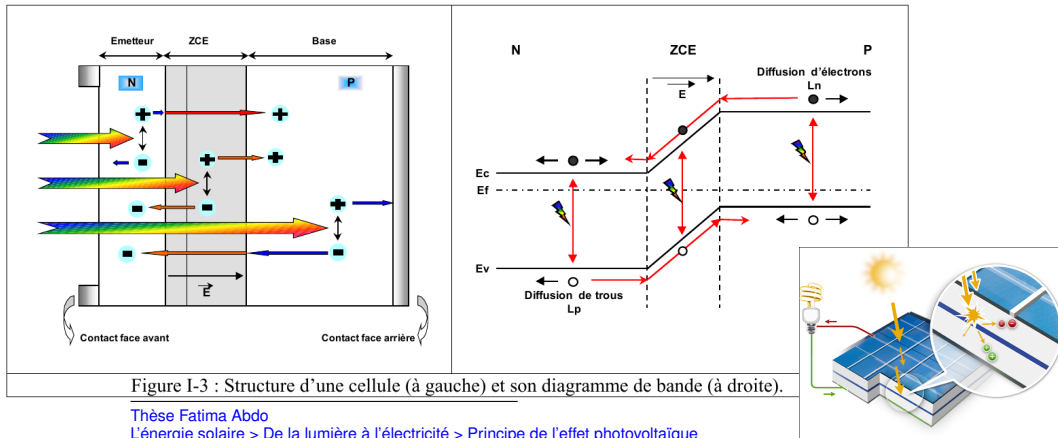
Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF



# Caractéristiques des cellules photovoltaïques

## ■ L'effet photovoltaïque





# Caractéristiques des cellules photovoltaïques

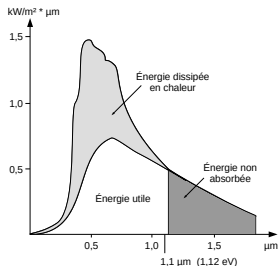
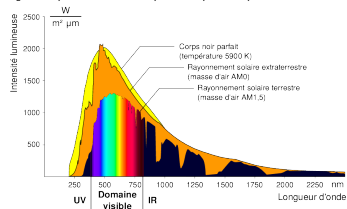


Fig. 3.4 – Spectre solaire AM0 et portions exploitables par le silicium cristallin



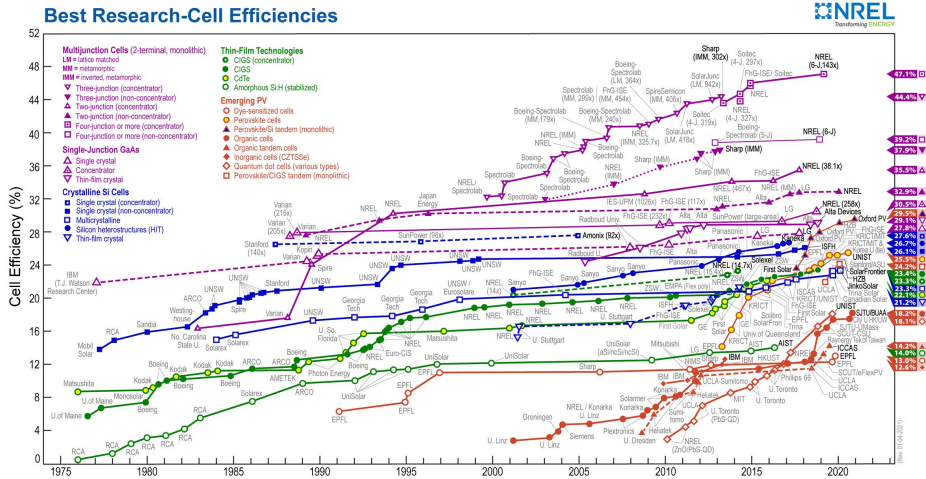
- Performances théoriques maximales des semi-conducteurs pour un rayonnement AM0 d'une puissance de  $1350 \text{ W/m}^2$

	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



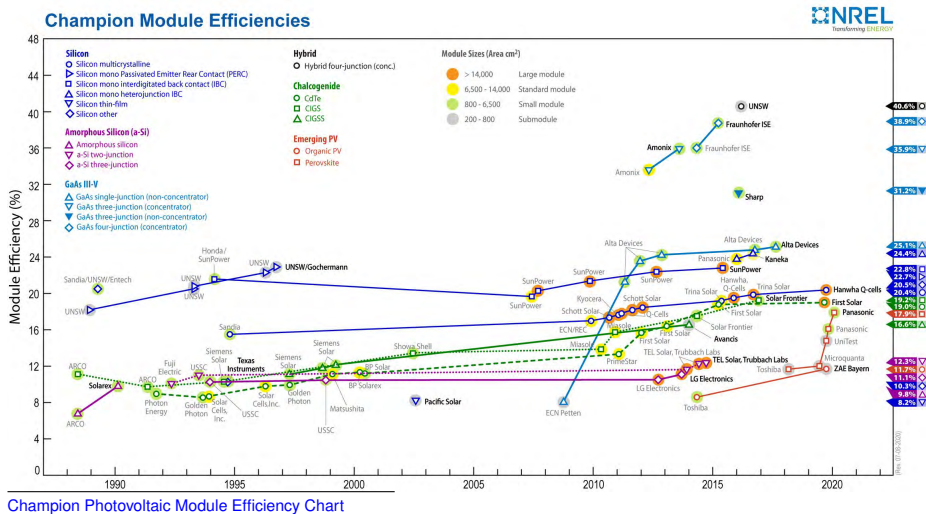
# Best Research-Cell Efficiency Chart



Best Research-Cell Efficiency Chart



# Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart

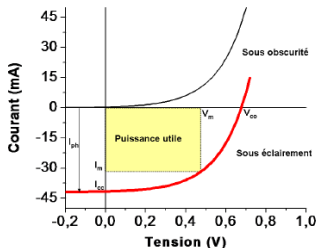




# Caractéristiques des cellules photovoltaïques

## ■ Propriétés électriques

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



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

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

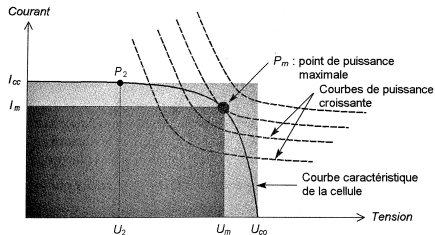


Figure 3.10 – Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension

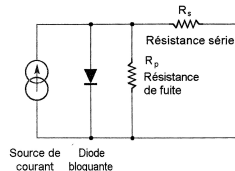
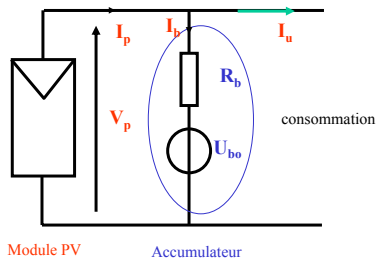


Figure 3.9 – Schéma équivalent d'une cellule solaire



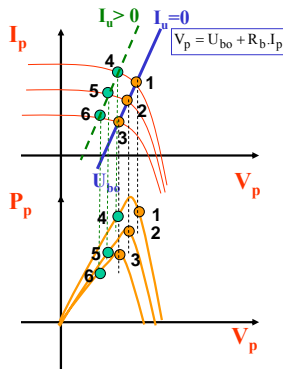
# Chaîne de conversion

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

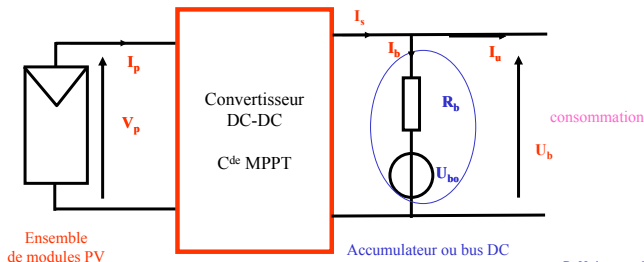


# Chaîne de conversion

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>)

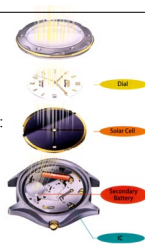
### Montres

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> :  
 $P_{PV} = 12 \text{ mW à } 120 \mu\text{W}$   
(11 s/jour à 18 min/j)

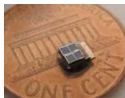
(Source : Citizen)



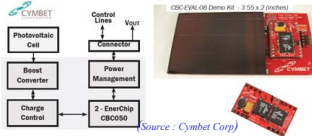
## Faibles encombrements, plus forts besoins : Si cristallin

### Capteur autonome

Dans 2,5 x 3,5 x 1 mm :  
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 :



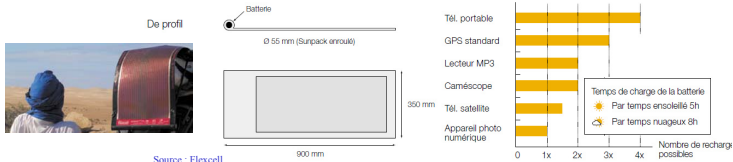
**Professional (13.8 Watts)**

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

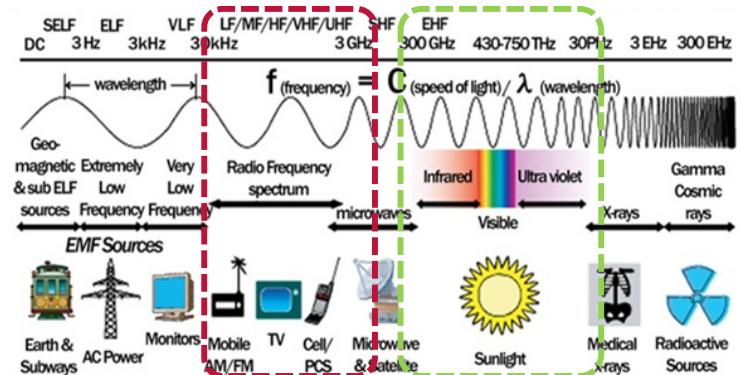
Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF



# Le spectre électromagnétique et son exploitation



Source artificielle

Source naturelle

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

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

Radiation (beaucoup) moins énergétiques



## Intérêt de la récupération d'énergie RF

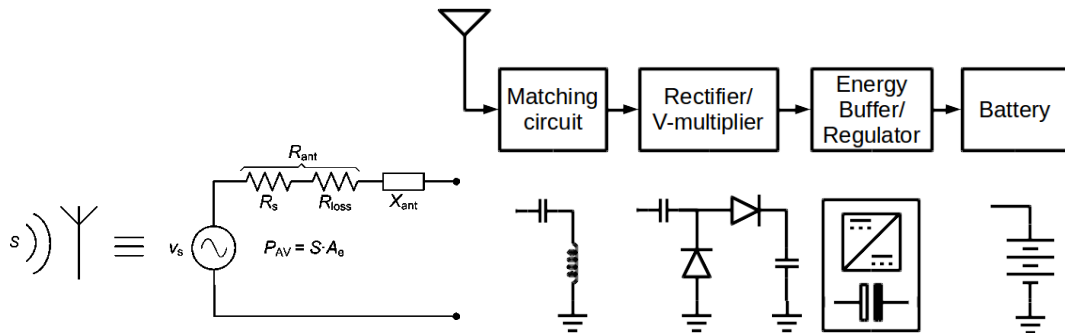
- Circuits à intégration à très grande échelle (VLSI)
  - Circuits RF passifs  $\approx 2 - 100 \mu\text{W}$
- Systèmes embarqués hyperspécialisés
  - Nombre de tâches limités
    - Implémentation en ASIC  $\Rightarrow$  Conso Circuits génériques
- Beaucoup de matériaux sont transparents aux ondes radios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

---

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



## Constitution classique

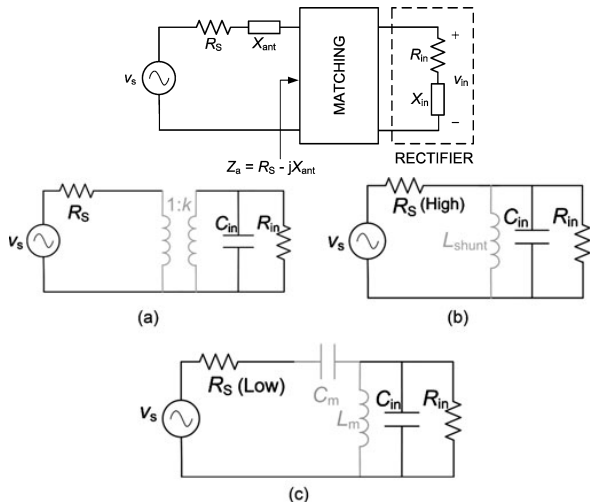


### ■ Conception sur mesure

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

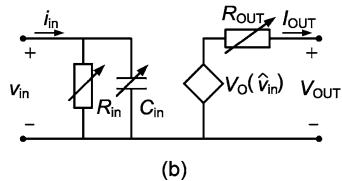
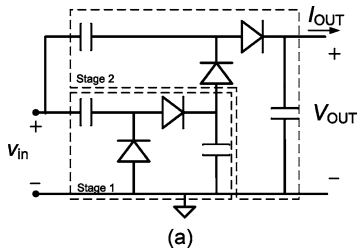
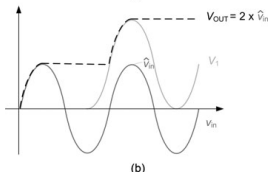
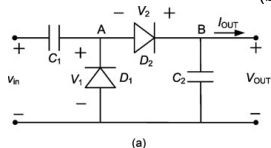
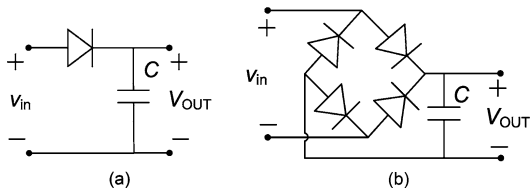


# Constitution classique – Adaptation d'impédance





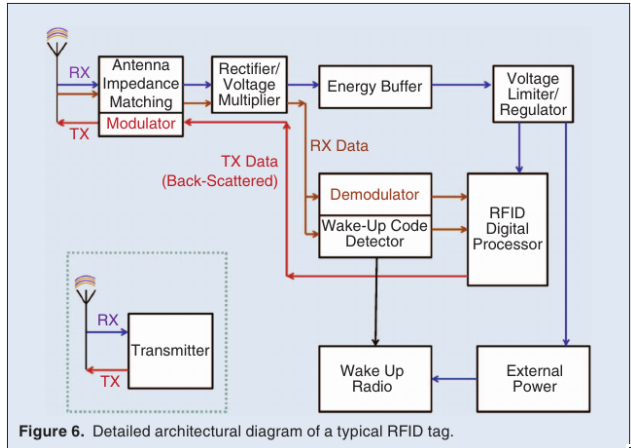
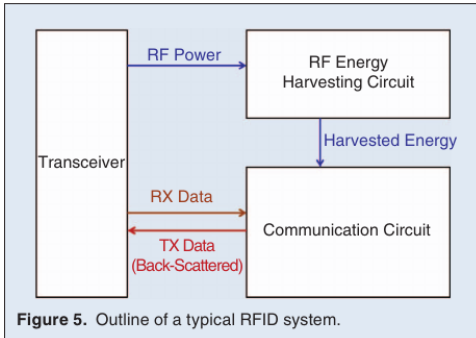
## Constitution classique – Redresseur



Powering Autonomous Sensors



## Constitution classique – Quelques détails supplémentaires





## 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  $\Rightarrow$  IC

$$\lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow \begin{cases} r \leq \frac{\lambda}{2\pi} & \text{Near Field Inductive} \\ \frac{\lambda}{2\pi} > r \leq 2\lambda & \text{Near Field Radiative} \\ r > 2\lambda & \text{Far Field Radiative} \end{cases}$$

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

**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



## 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  $\frac{1}{r^4}$





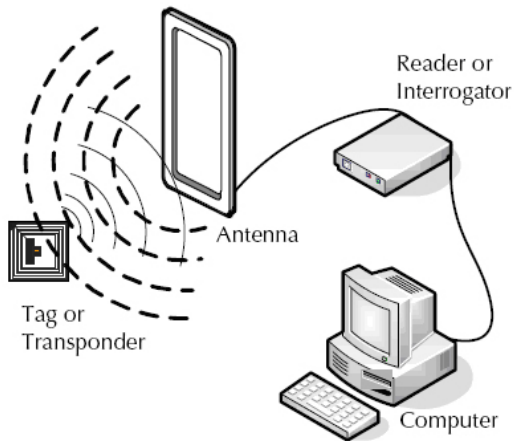


## Récupération d'énergie RF à source dédiée

- 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)







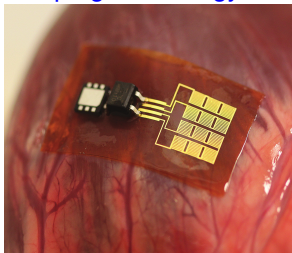
## Exercice

- 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