



Récupération d'énergie (Energy Harvesting)

Principes et applications

Germain Pham - Reda Mohellebi

dpham@telecom-paris.fr

Mai 2023





Plan

Introduction

Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF

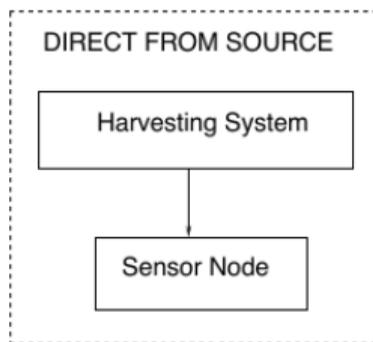
"Energy Harvesting"

- "Récupération d'énergie" (pour l'électronique)
 - Micro (μ) / 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 complémente les batteries

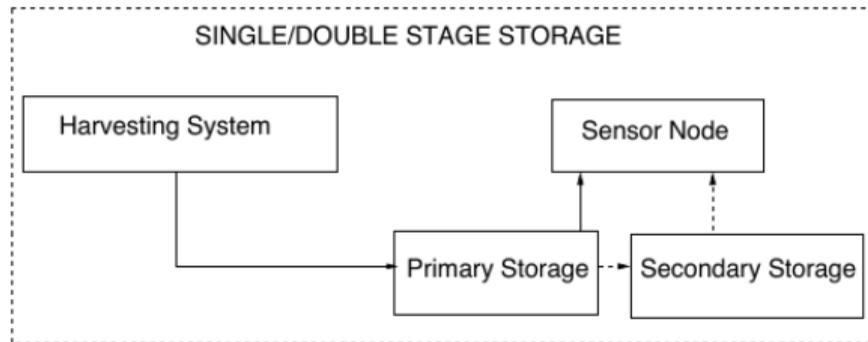
Exemples ?

Différentes stratégies de consommation d'énergie

■ Consommation immédiate ou stockage



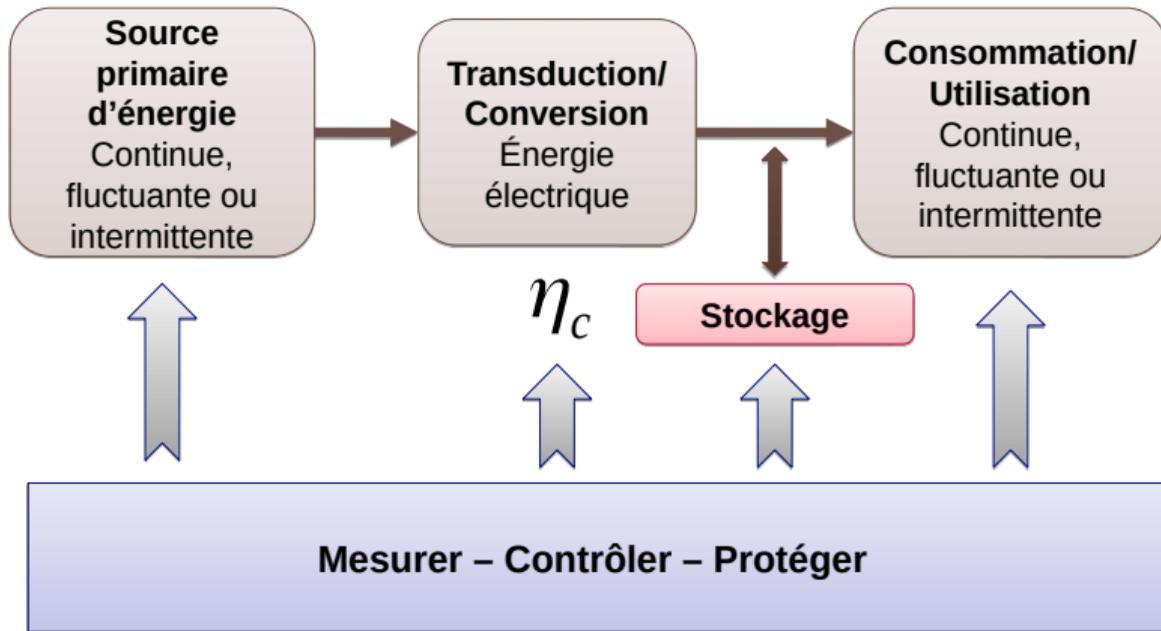
(a) Harvest-Use



(b) Harvest-Store-Use

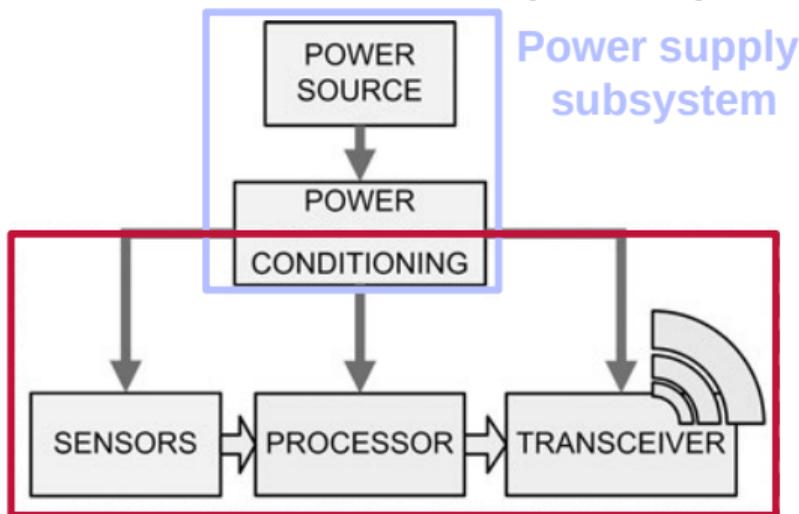
Enjeux de la production et de la gestion d'énergie

- Découpler source et consommation / énergie et puissance

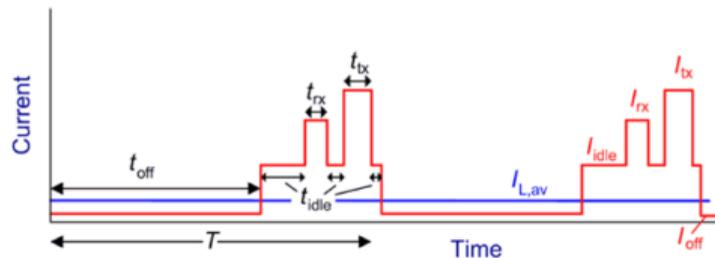


Conception d'un capteur autonome

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



Charge (load)

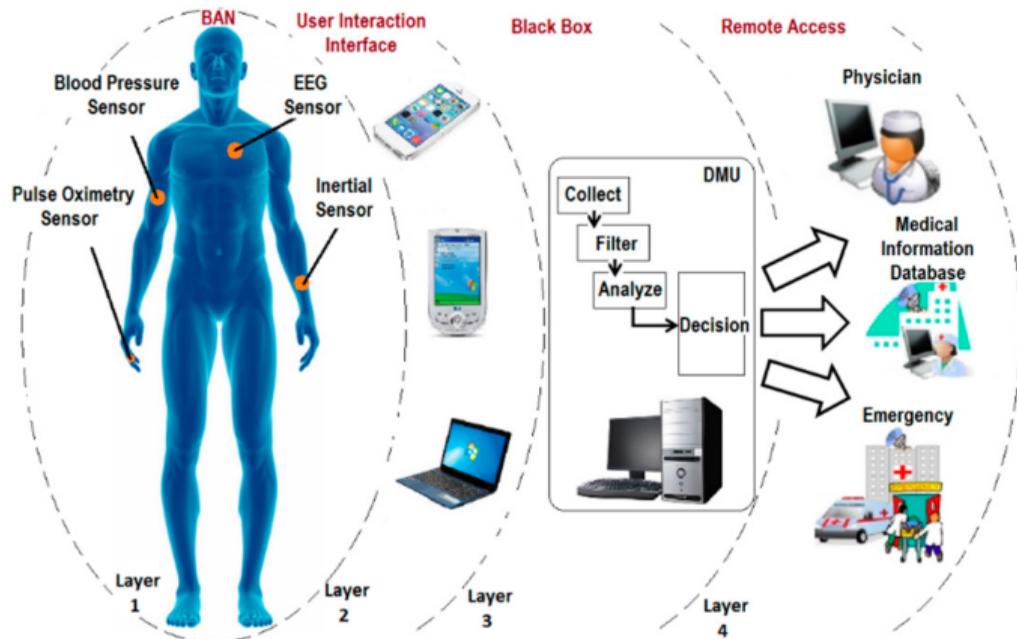


- Modélisation de la charge

- Capteurs
- Microcontrôleurs
- Transmetteur radio

Exemples d'applications

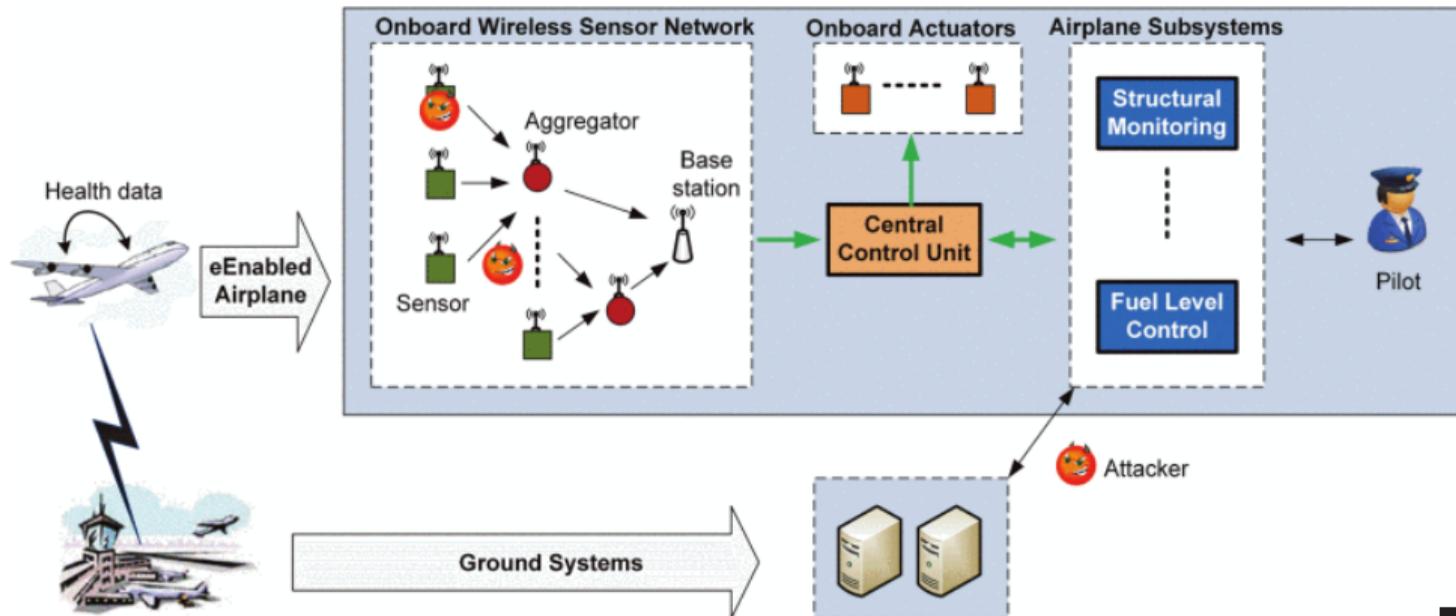
■ Santé



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

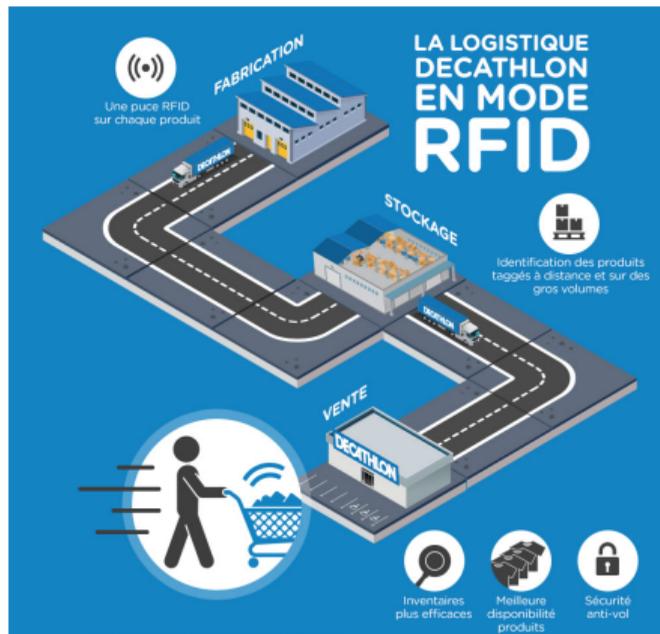
- Surveillance de l'environnement



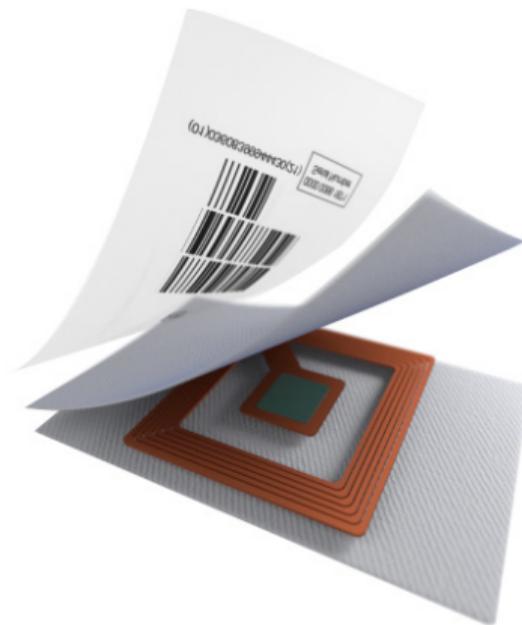
Environmental Wireless Sensor Networks

Exemples d'applications

■ Détection d'objets



Decathlon: RFID



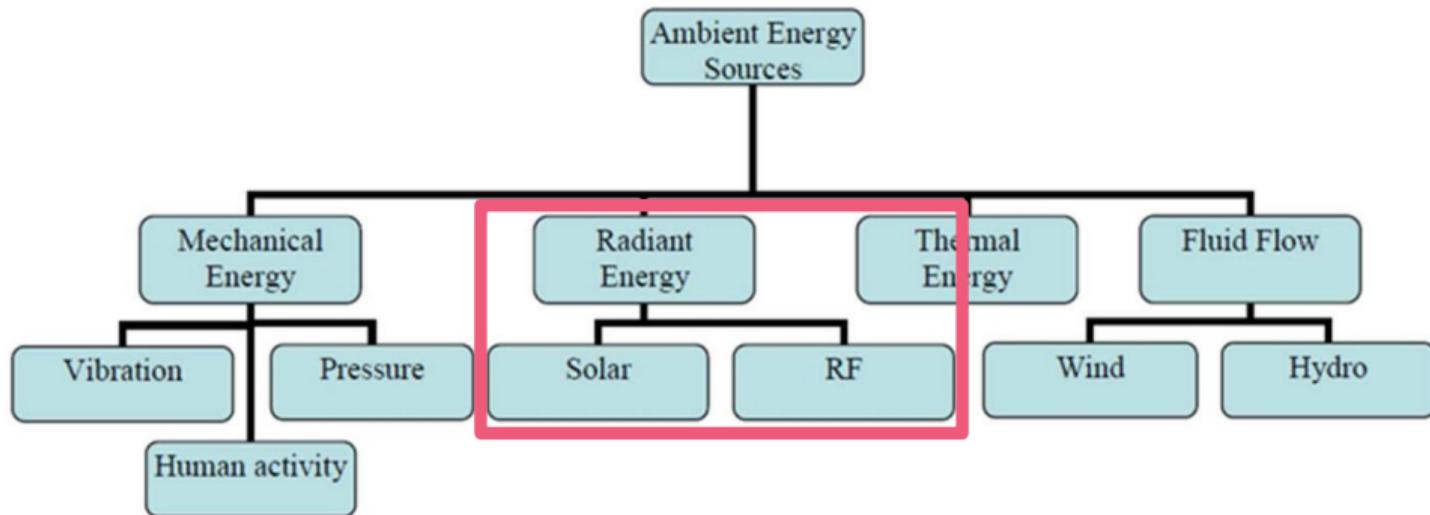
Introduction

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

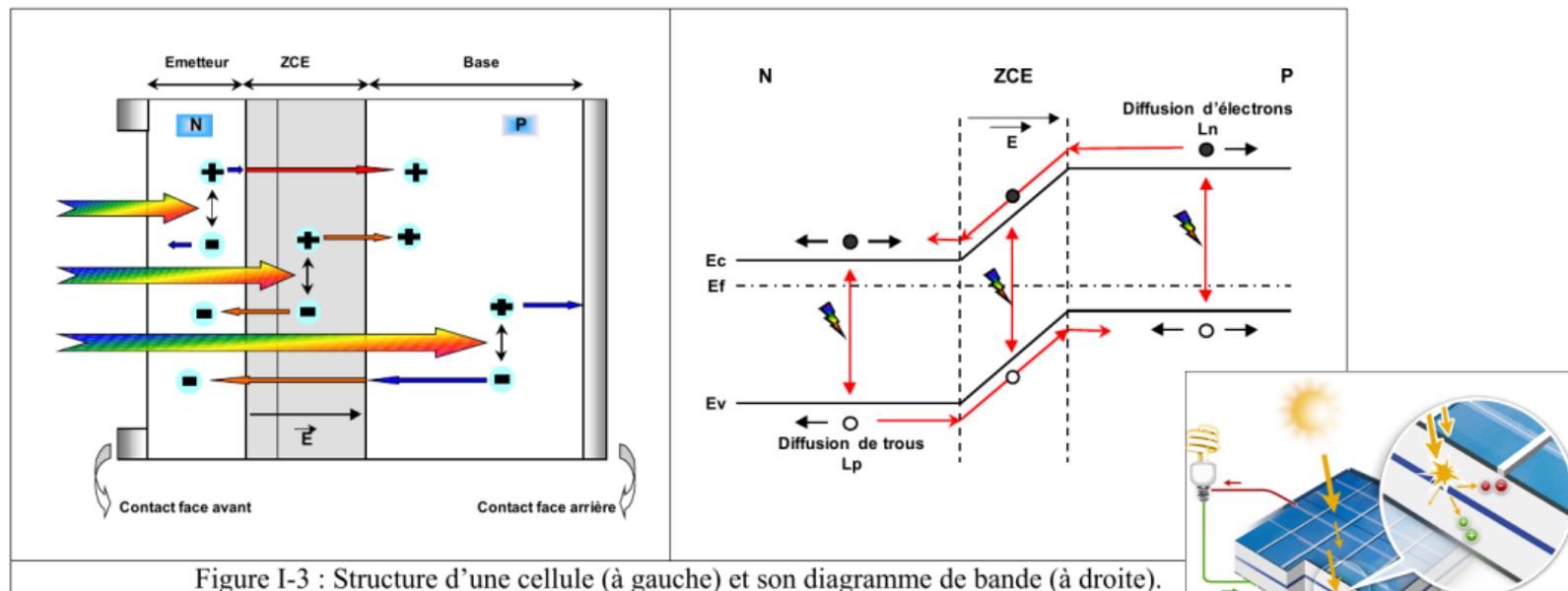
Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Énergie de rayonnement Lumineuse

Énergie de rayonnement RF

Caractéristiques des cellules photovoltaïques

■ L'effet photovoltaïque



Thèse Fatima Abdo

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

Caractéristiques des cellules photovoltaïques

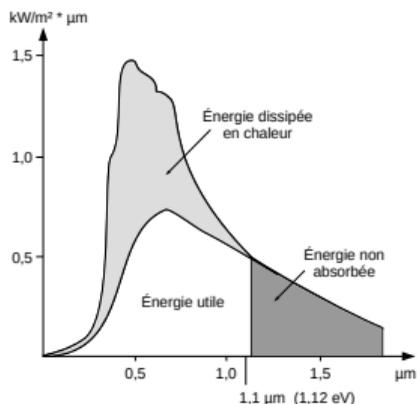
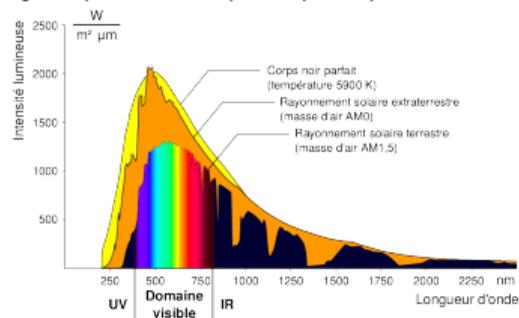


Fig. 3.4 – Spectre solaire AM0 et portions exploitables par le silicium cristallin

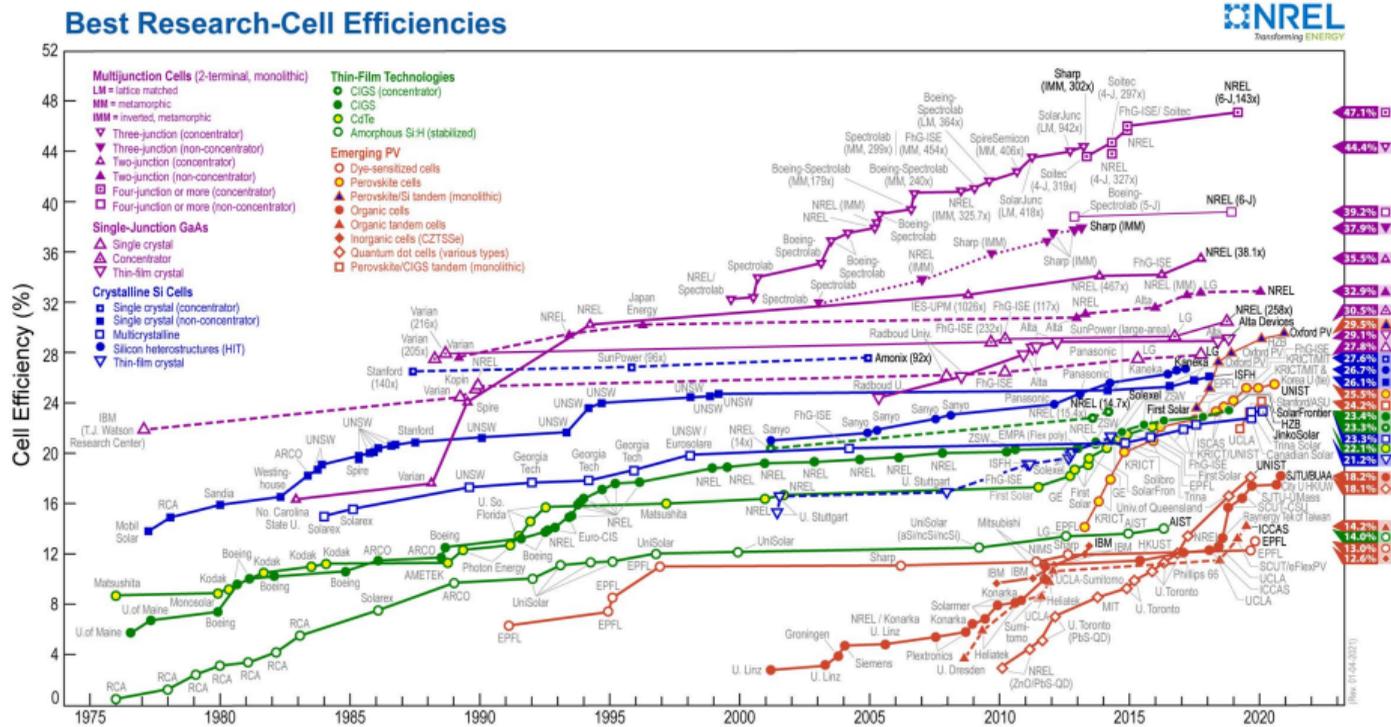


- Performances théoriques maximales des semi-conducteurs pour un rayonnement AM0 d'une puissance de 1350 W/m^2

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

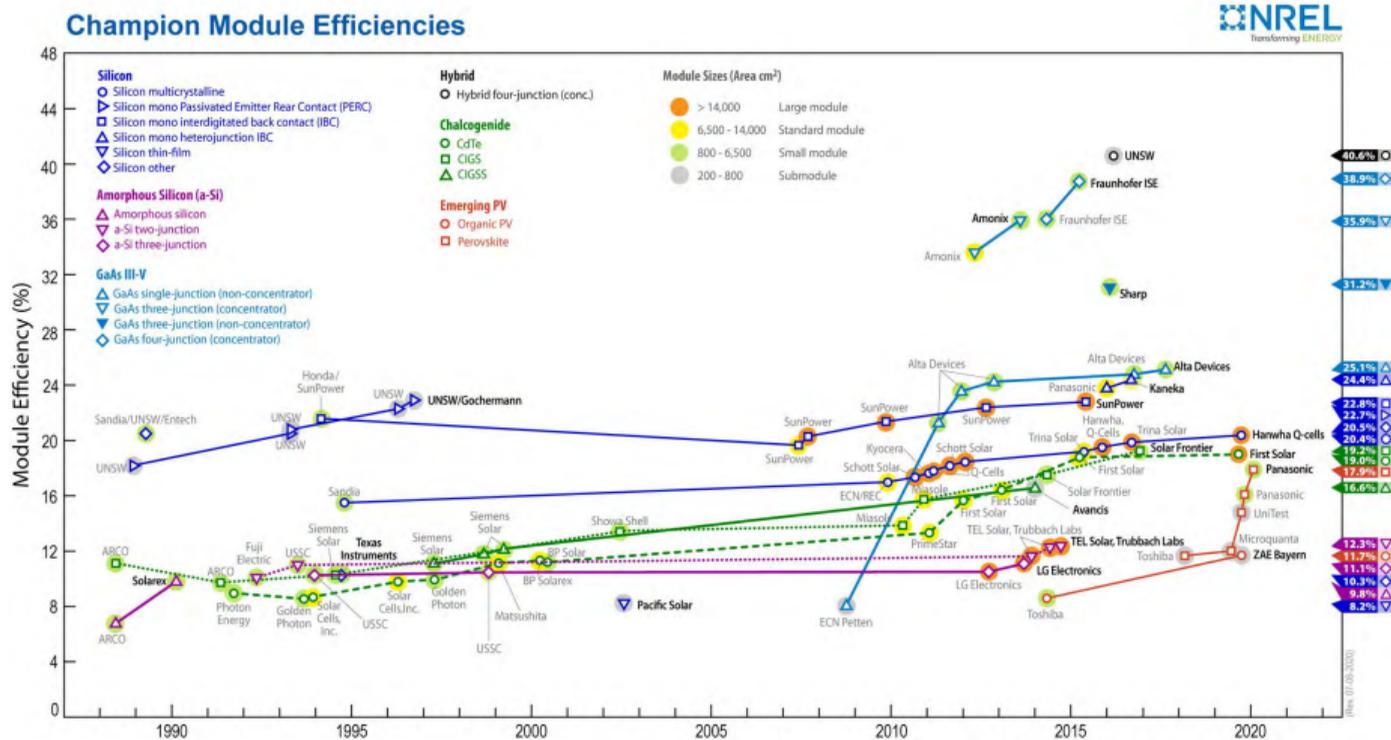
Energie solaire photovoltaïque ; Anne Labouret, Michel Villos

Best Research-Cell Efficiency Chart



Best Research-Cell Efficiency Chart

Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart

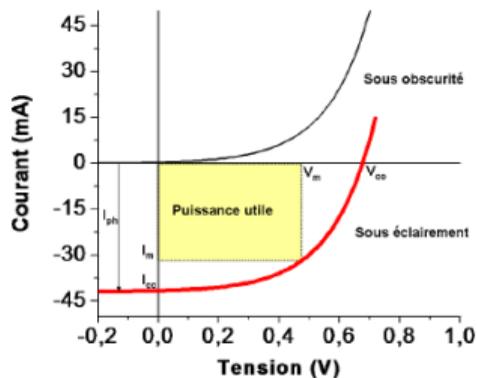


Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart

Caractéristiques des cellules photovoltaïques

■ Propriétés électriques

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



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

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

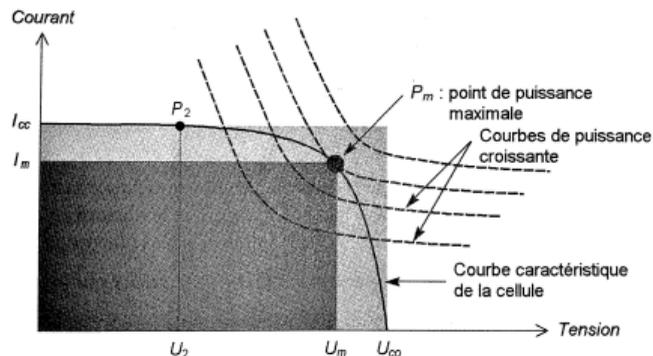


Figure 3.10 - Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension

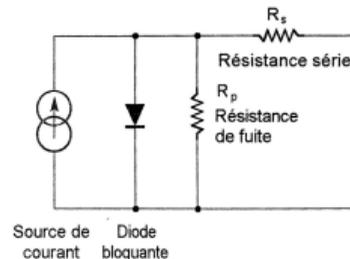
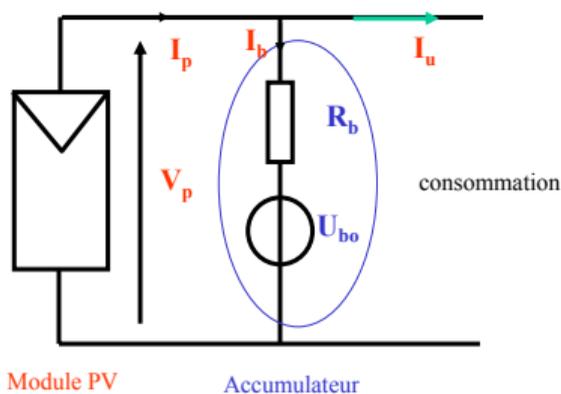


Figure 3.9 - Schéma équivalent d'une cellule solaire

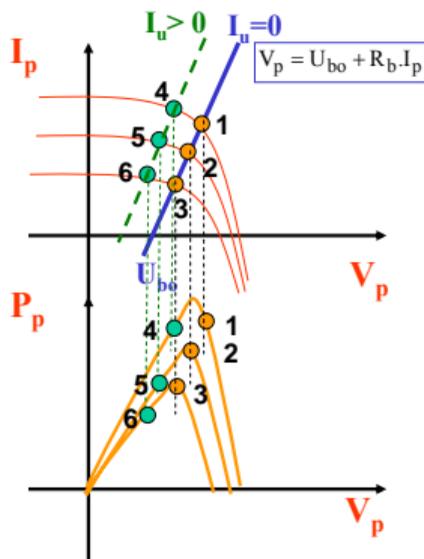
Chaîne de conversion

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

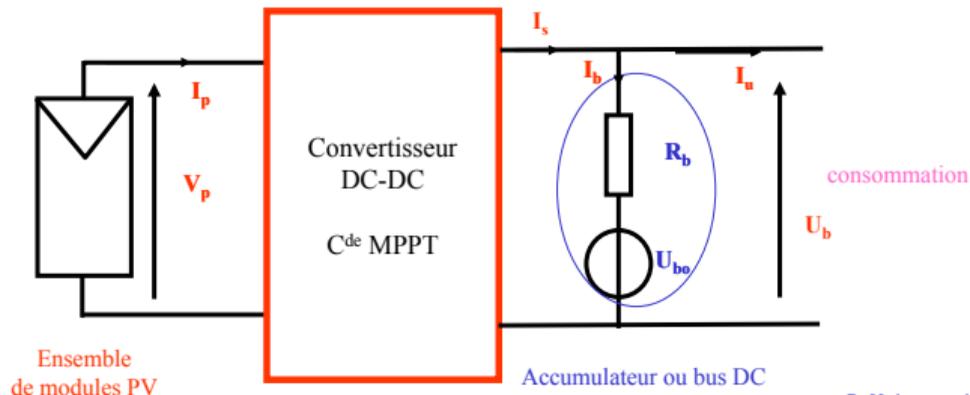
Récupération d'énergie pour les systèmes autonomes, Bernard Multon

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'insolation...
 - 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 cm²
Fonctionnement direct sans accu
qq μ A sous 1.5V
Seuil d'éclairement env. 50 lux
(0,5 W/m²)

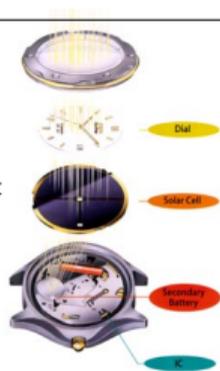
Montres

Accumulateur nécessaire
6 mois d'autonomie possible

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

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

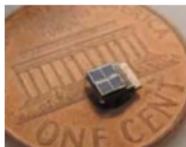
(Source : Citizen)



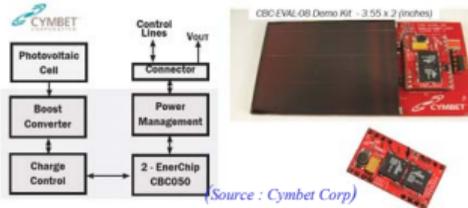
Faibles encombrements, plus forts besoins : Si cristallin

Capteur autonome

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



Kit capteur communicant 90 x 50 mm



Applications

Silicium cristallin :



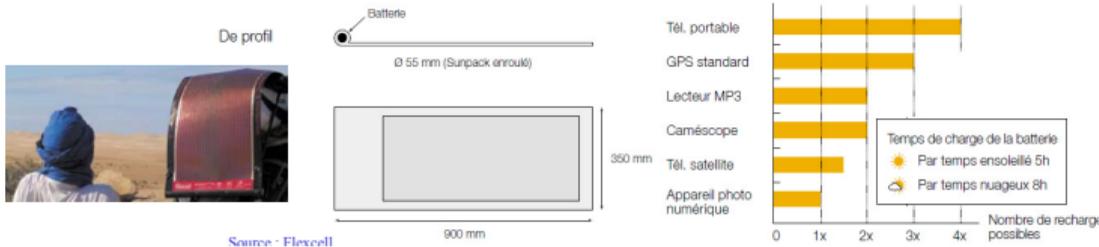
Professional (13.8 Watts)

0,1 m² @ 1000W/m² et 14% => 14 W



ICP Global Technologies : iSun Solar charger

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



Récupération d'énergie pour les systèmes autonomes, Bernard Multon



Plan

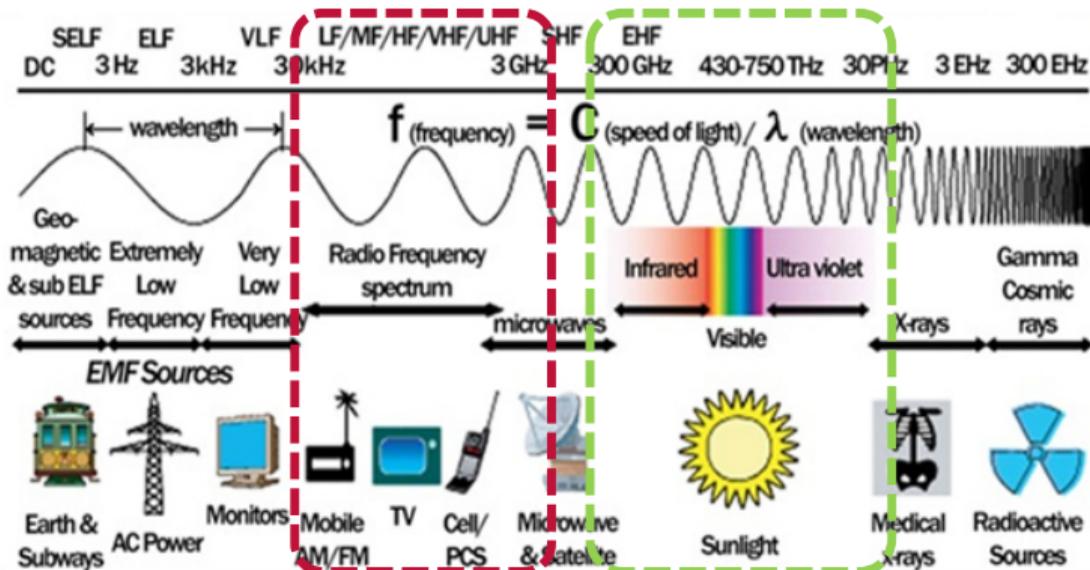
Introduction

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

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

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

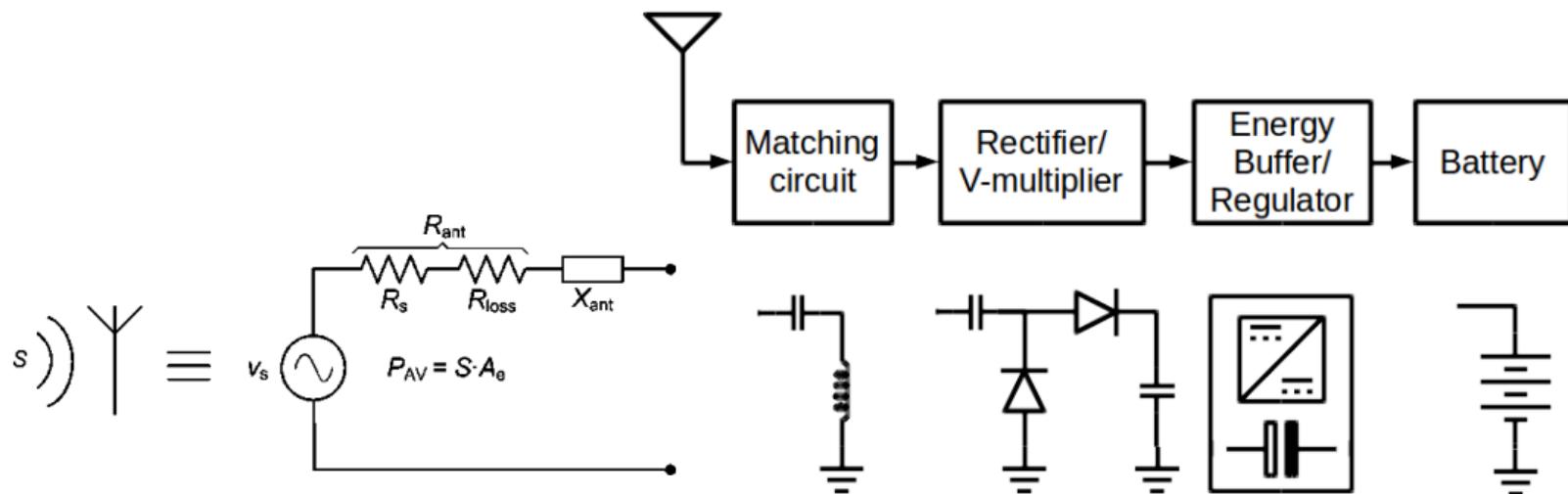
Radiation (beaucoup) moins énergétiques

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)

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

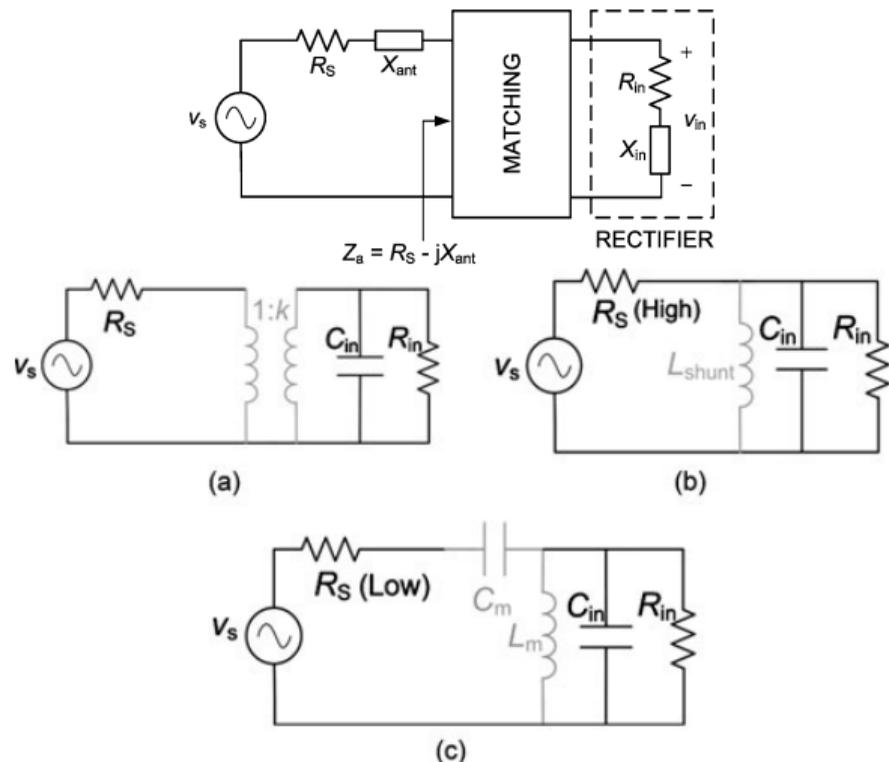
Constitution classique



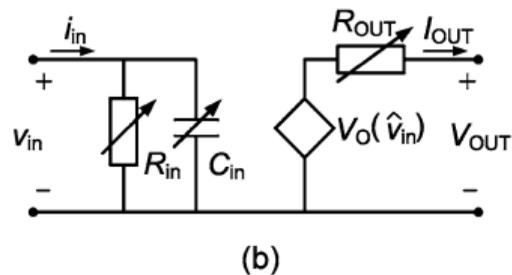
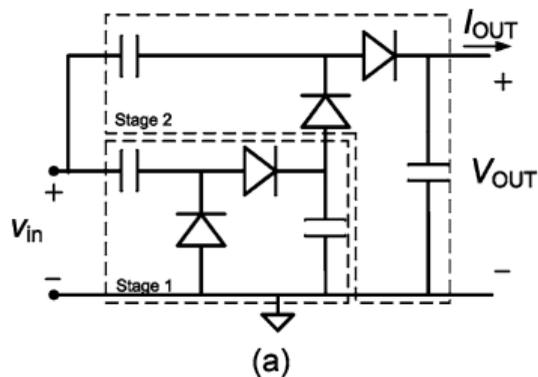
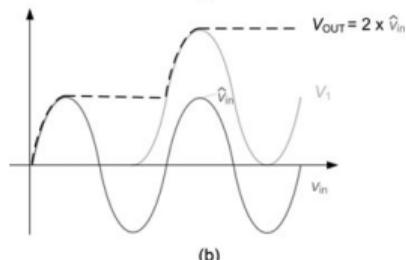
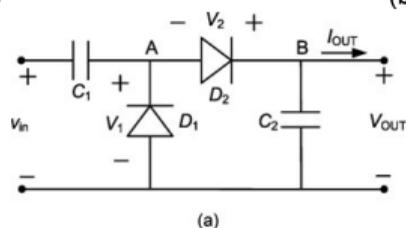
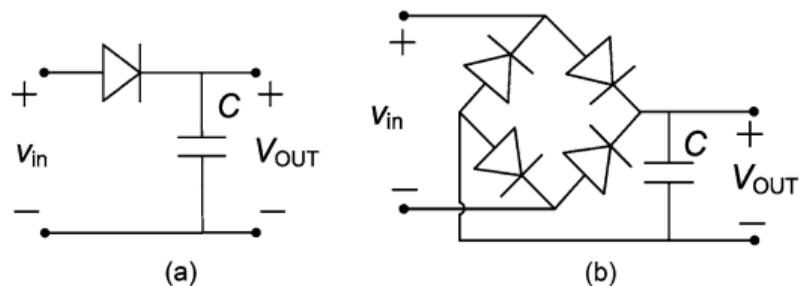
■ Conception sur mesure

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

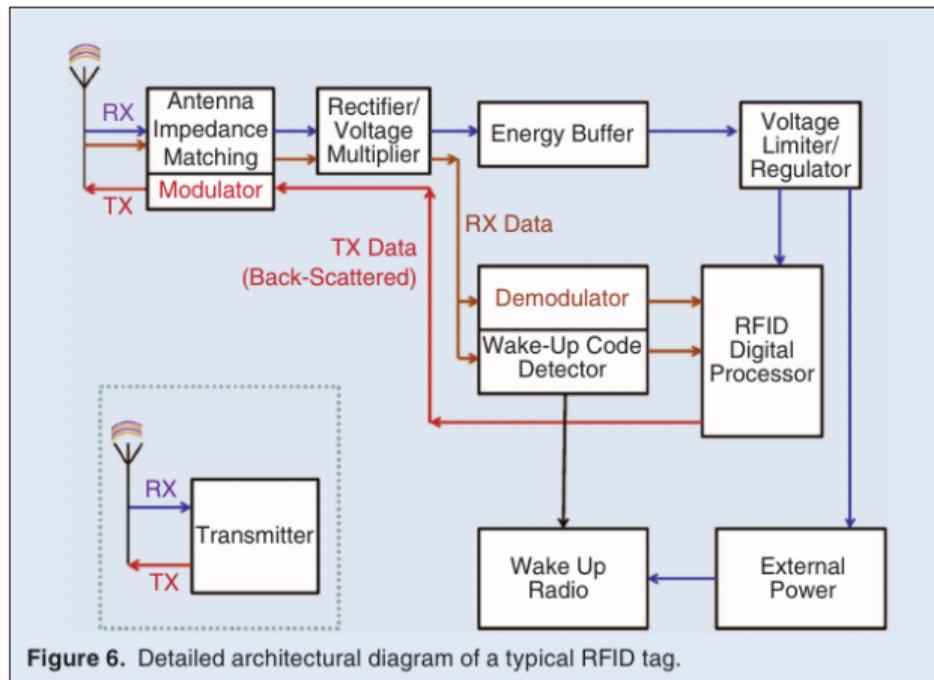
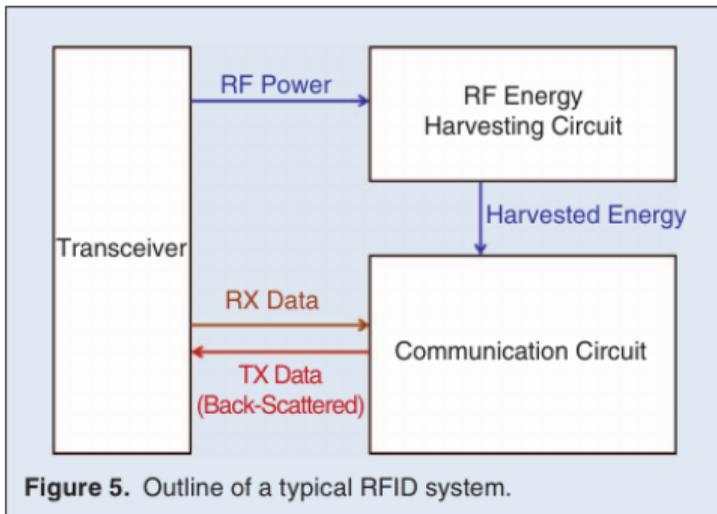
Constitution classique – Adaptation d'impédance



Constitution classique – Redresseur



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 \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	λ	$\lambda/2\pi$	$\lambda/4$
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

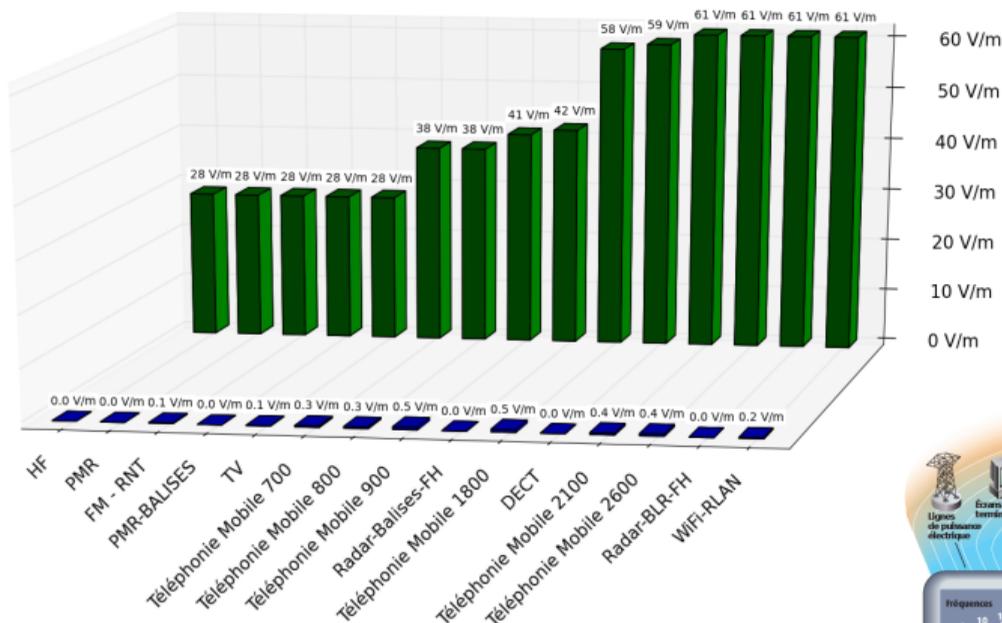
- Un émetteur (artificiel) obligatoire
 - Nœud unique dédié : « RFID reader »
 - Émetteurs décorrélés
- Puissance de transmission
 - Puissance d'émission : LIMITÉE !
 - Equivalent Isotropically Radiated Power (EIRP)
 - Ex : US : EIRP = 4 W (ISM 900 & 2.4)
 - Puissance à la réception (**équation des télécoms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

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

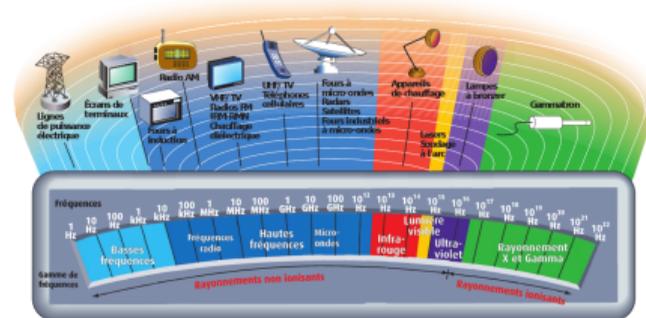
(2)

- 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 ambiante



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

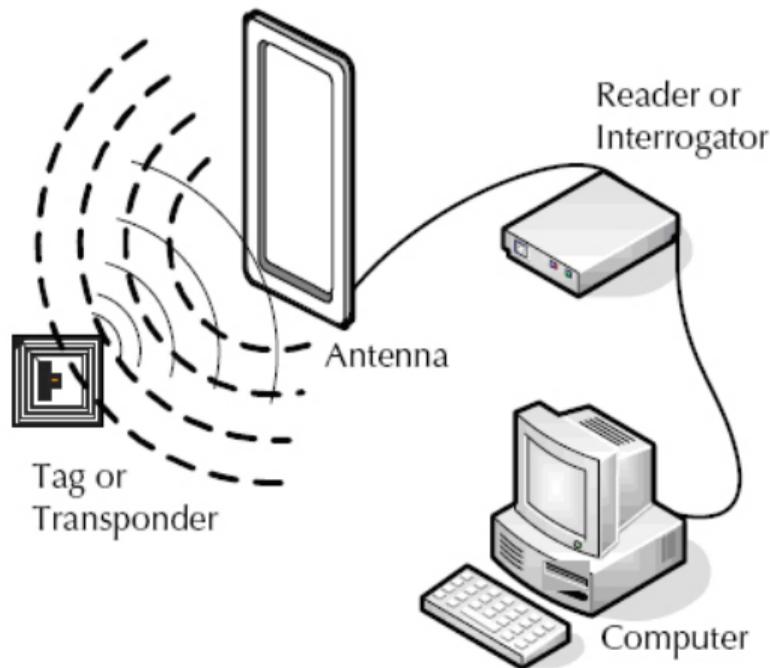


Récupération d'énergie RF à source dédiée

- 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)



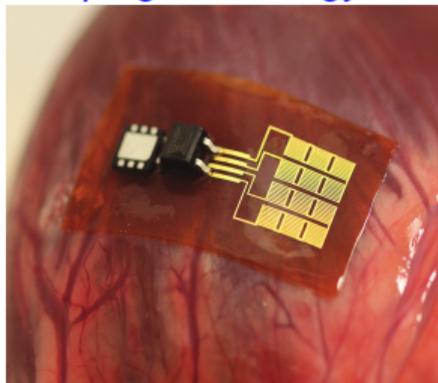


Exercice

- 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