

TELECOM
ParisTech



Une école de l'IMT

Récupération d'énergie (Energy Harvesting)

Principes et applications

Reda Mohellebi & Germain Pham

université
PARIS-SACLAY





Introduction

Énergie: Définition et *petits* faits historiques

■ Concept qui remonte à l'Antiquité

- « énergie » : du grec ancien ἐνέργεια / enérgeia
 - « force en action »

■ Définition actuelle :

- mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un « travail »
- Max Planck (1900) : « Grandeur qui se conserve »
 - A visionner : [Etienne Klein : qu'est-ce que l'énergie ?](#)

Énergie: Définition et *petits faits historiques*

■ Un des besoins essentiels de la vie et de l'humanité



400 000 av. JC



8000 av. JC



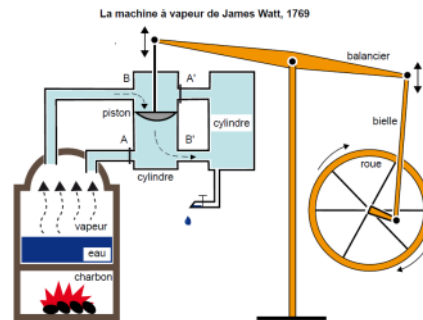
5000 av. JC



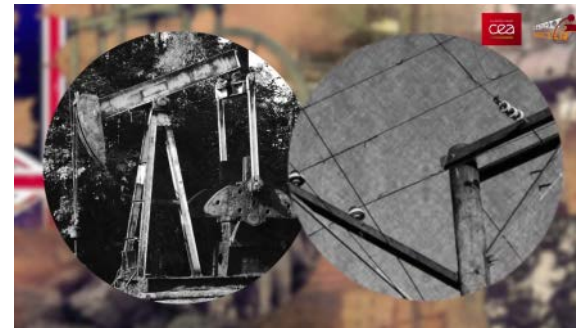
<VIIe ap. JC



<Xe ap. JC



XVIIIe ap. JC



XIXe ap. JC



XXe ap. JC

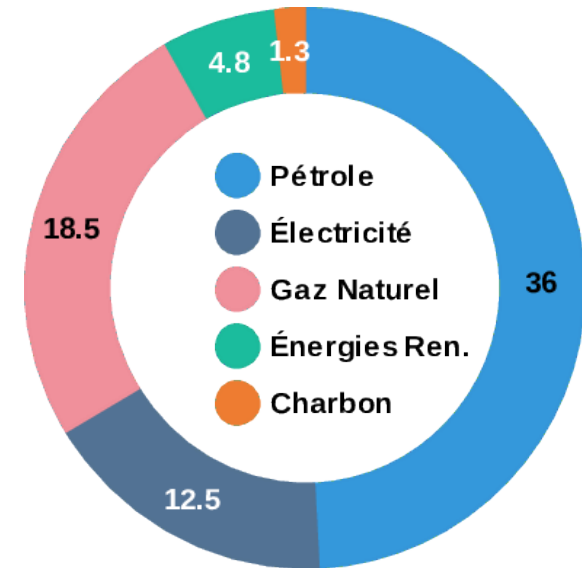
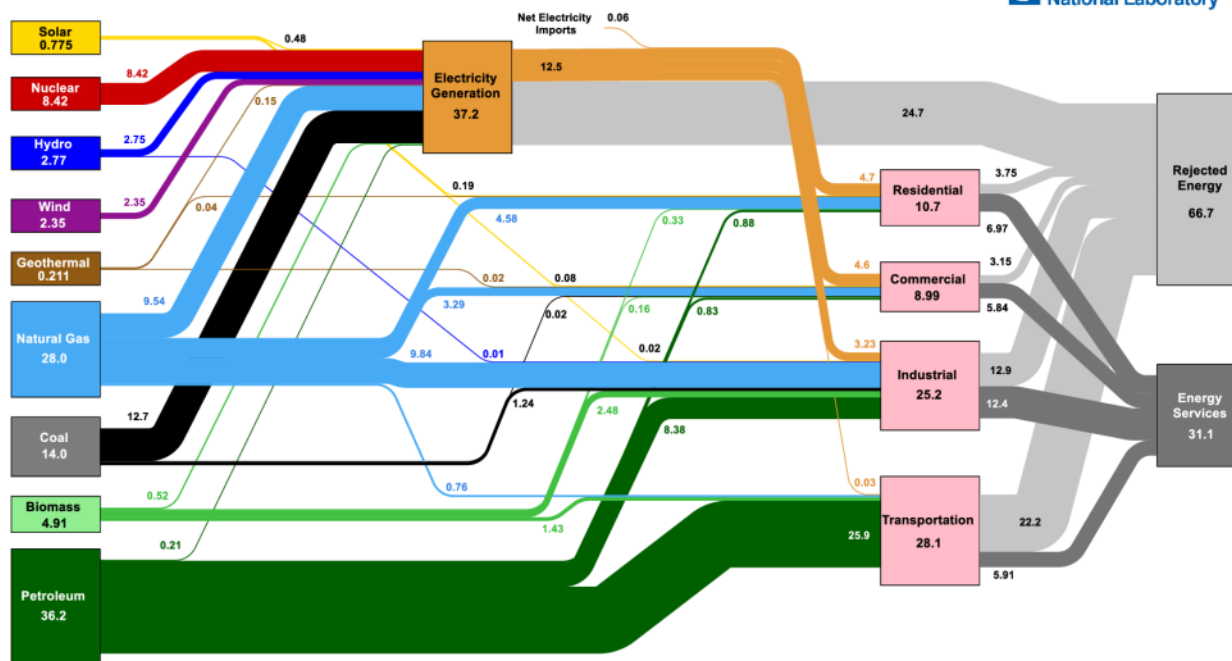
- A visionner
 - [Les grandes dates de l'énergie](#)
 - [Les sources d'énergie utilisées par l'Homme au cours du temps](#)

Production d'énergie à grande échelle

■ Ressources primaires (US, 2017)

Estimated U.S. Energy Consumption in 2017: 97.7 Quads

Lawrence Livermore National Laboratory



Quad BTU : quadrillion British thermal unit (10^{15})

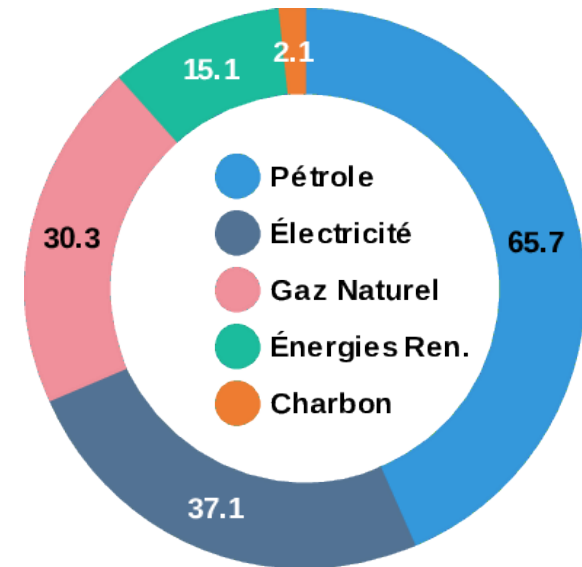
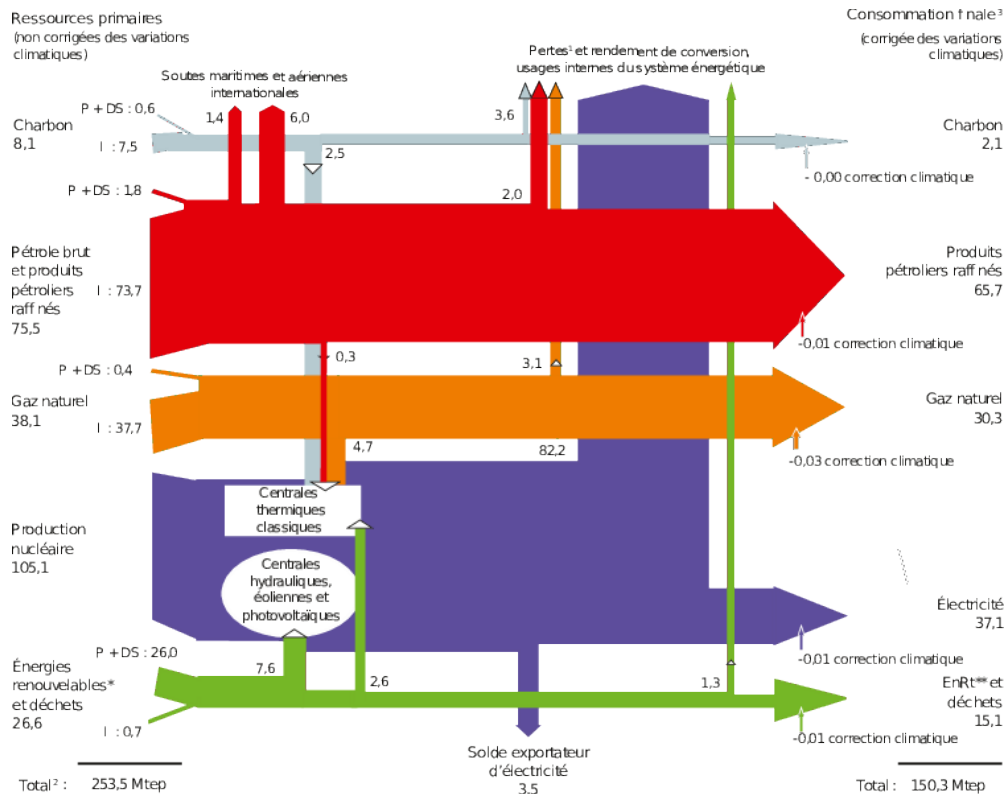
1 Quad BTU \approx 1,1 exaJ (10^{18} J)

Total : 73,1 Quads

Source: EERE April, 2018. Data is based on DOE/EIA MERR (2017). If this information or a reproduction of it is used, credit must be given to the Lawrence Livermore National Laboratory and the Department of Energy, under whose auspices the work was performed. This chart was revised in 2017 to reflect changes made in mid-2016 to the Energy Information Administration's analysis methodology and reporting. The efficiency of electricity production is calculated as the total retail electricity delivered divided by the primary energy input into electricity generation. End use efficiency is estimated as 85% for the residential sector, 65% for the commercial sector, 21% for the transportation sector, and 49% for the industrial sector which was updated in 2017 to reflect DOE's analysis of manufacturing. Totals may not equal sum of components due to independent rounding. LLNL-MI-410527

Production d'énergie à grande échelle

■ Ressources primaires (France, 2016)



Mtep : Million de tonnes équivalent pétrole

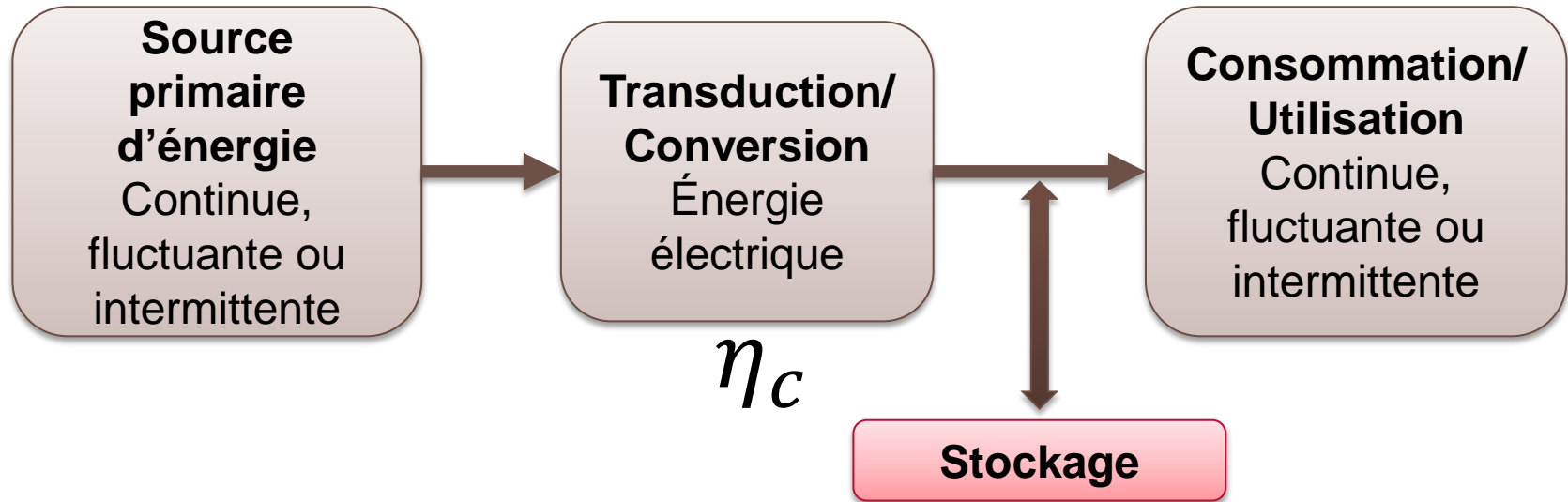
US : 1842 Mtep
FR : 150 Mtep

1 Quad BTU \approx 1,1 exaJ (10^{18} J) \approx 25,2 Mtep

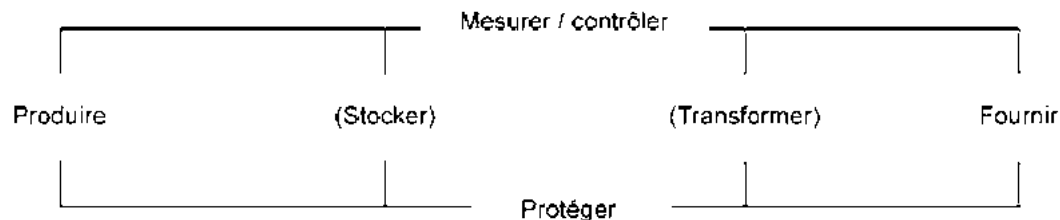
■ [Bilan énergétique de la France métropolitaine en 2016]

Enjeux de la production d'énergie

■ Découpler source et consommation / énergie et puissance



■ Fonctions associées à un « générateur »



« Energy Harvesting »

■ « Récupération d'énergie » (pour l'électronique)

- Micro (μ) / Milli (m) – watts

■ Application : Réseaux de capteurs communicants

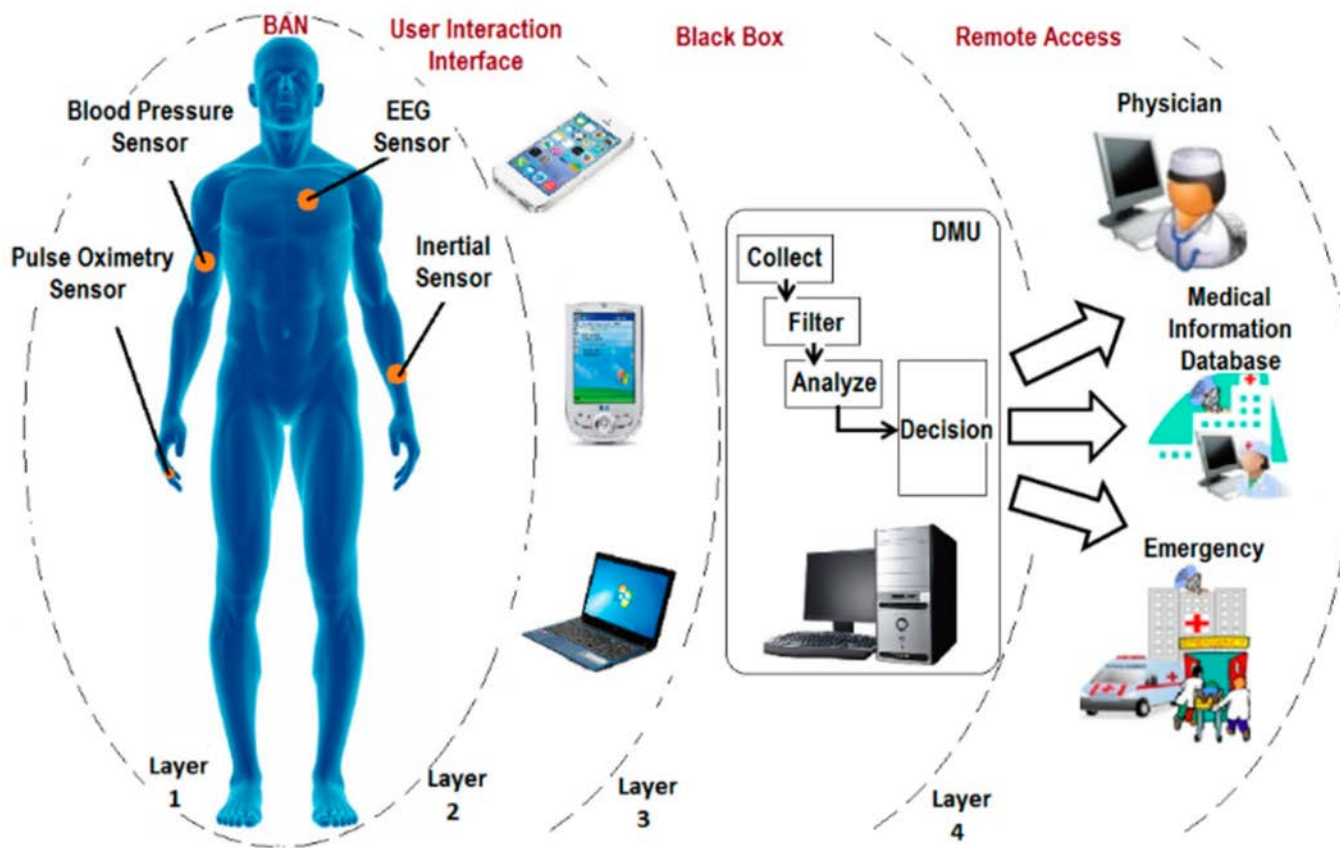
- Capteurs sans fils autonomes
 - Capteur(s)
 - Électronique de traitement
 - Électronique de communication sans fil
 - Alimentation électrique
- Ne peut être branché au secteur
 - Alimentation locale
 - Batterie / Pile : Pratique et peu coûteux
 - Énergie limitée
 - Remplacement et/ou recharge périodique

■ → Récupération d'énergie

- Remplace ou complète les batteries

Exemples d'applications

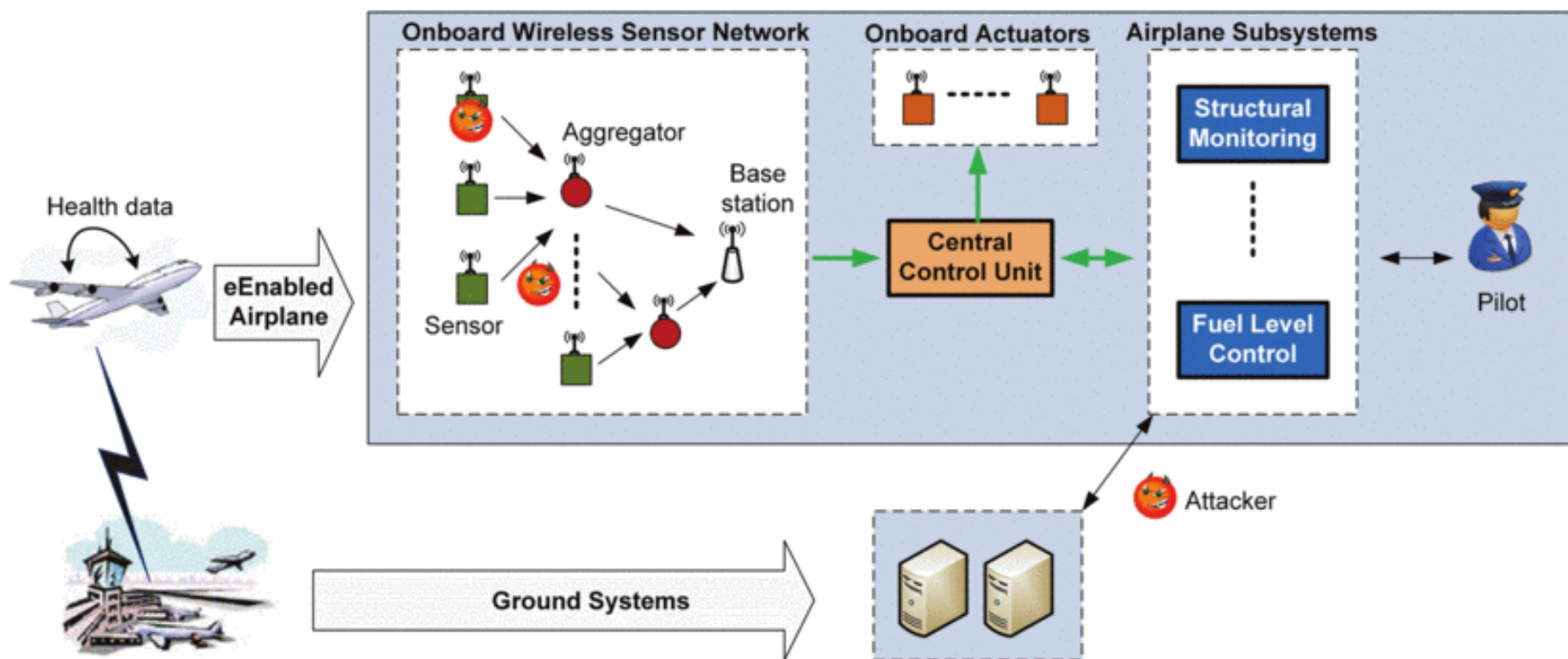
■ Santé



[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

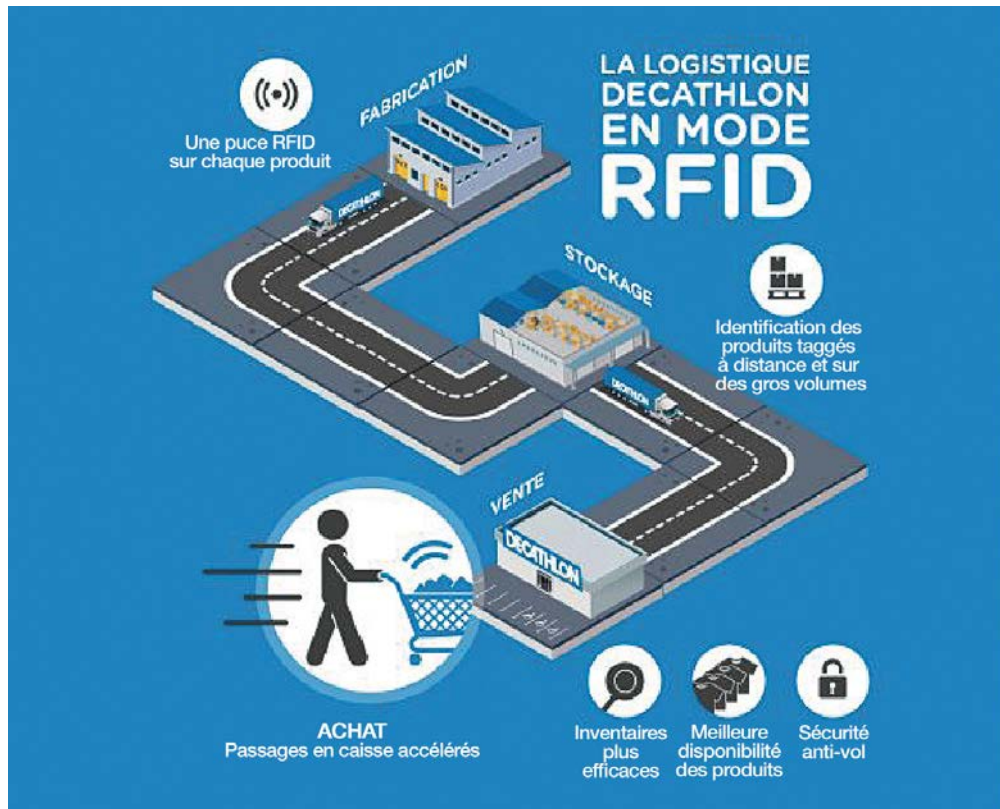
■ Surveillance de l'environnement



[Environmental Wireless Sensor Networks](#)

Exemples d'applications

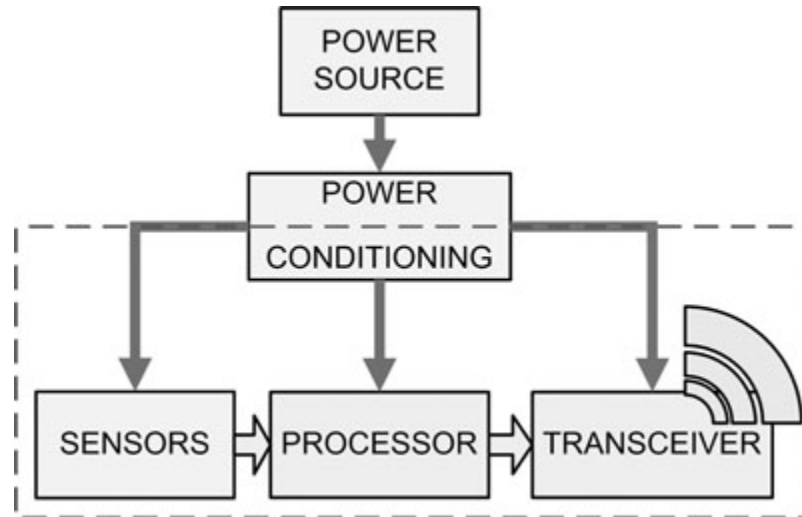
■ Détection d'objets



<https://www.decathlon.media/communique-presse/innovation-services/landing/landing.html>

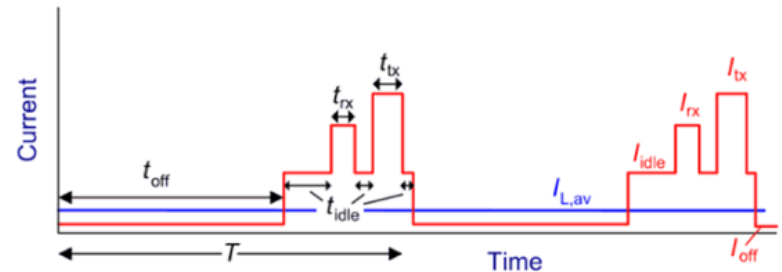
Capteur autonome

■ Constitution générale



■ Mode de fonctionnement

- Mode veille – Sleep mode (standby)
- Mode actif – Wake up mode
 - Acquisition capteur
 - Traitement
 - Transmission/réception de données



[Powering Autonomous Sensors](#)

■ Conception pluridisciplinaire

- Électronique
 - Analogique
 - Numérique
 - Puissance
- Mesures de grandeurs physiques différentes
- Optimisation Macro/Micro



Charges et régulation de l'alimentation



Capteur autonome

- **But**

- **Information**

Capteur autonome

■ But

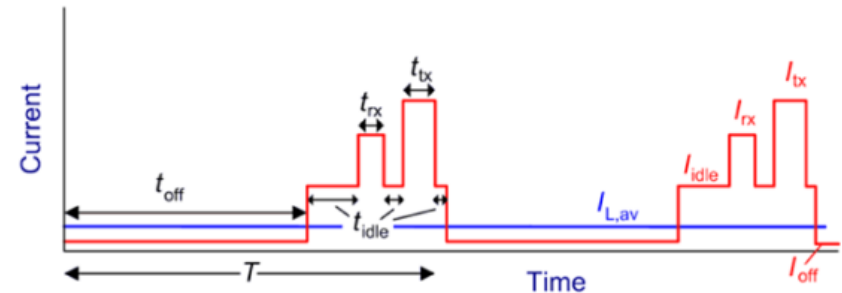
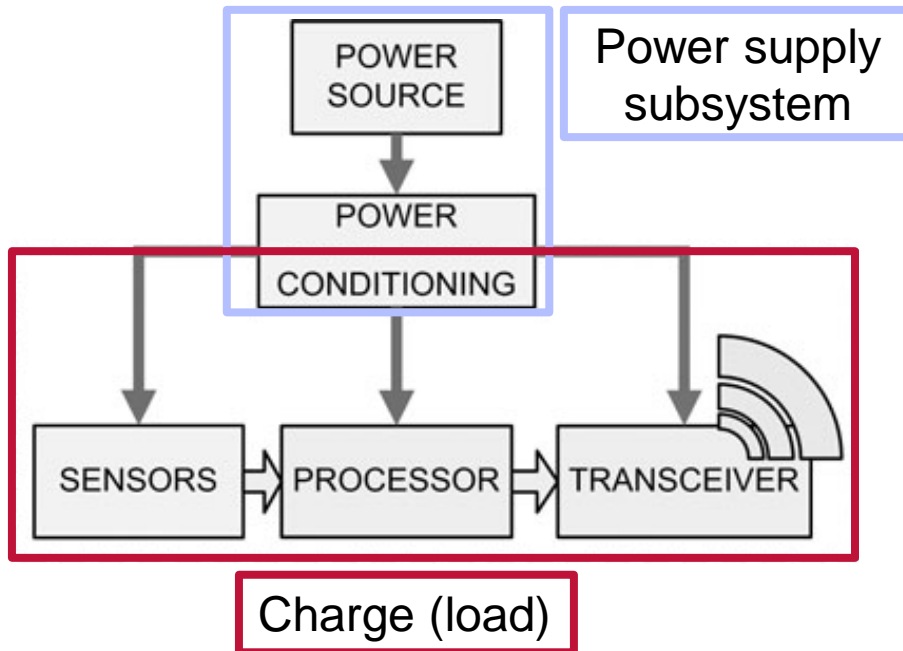
- Obtenir/analyser/transmettre une information concernant l'environnement du capteur

■ Information

- Quantité physique ou chimique
 - Pression
 - Température
 - Radiations
 - Lumière
 - Humidité
 - ...
- Pour une liste assez complète :
 - [Sensors: The First Stage in the Measurement Chain](#) (Table 1)

Conception du capteur autonome

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



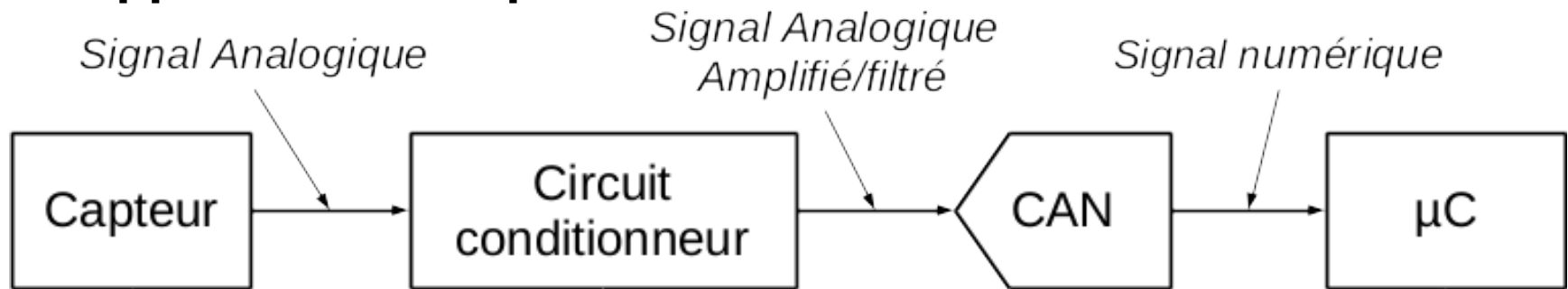
■ Modélisation de la charge

- Capteurs
- Microcontrôleurs
- Transmetteur radio

[Powering Autonomous Sensors](#)

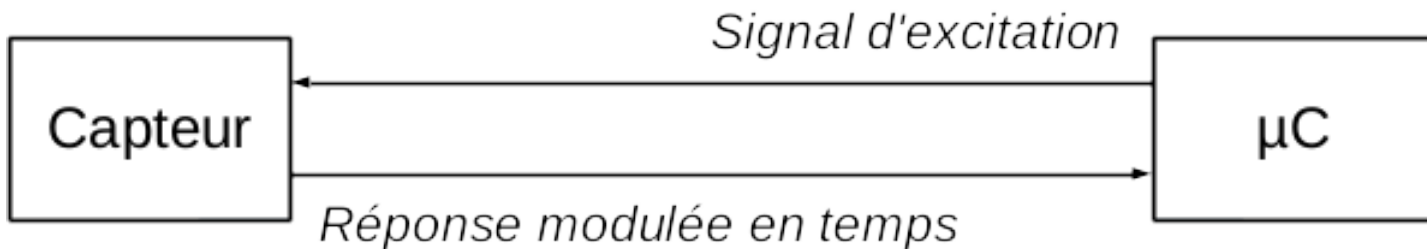
Partie capteur

■ Approche classique



- Circuit conditionneur :
 - Amplification, filtrage, adaptation impédance,...

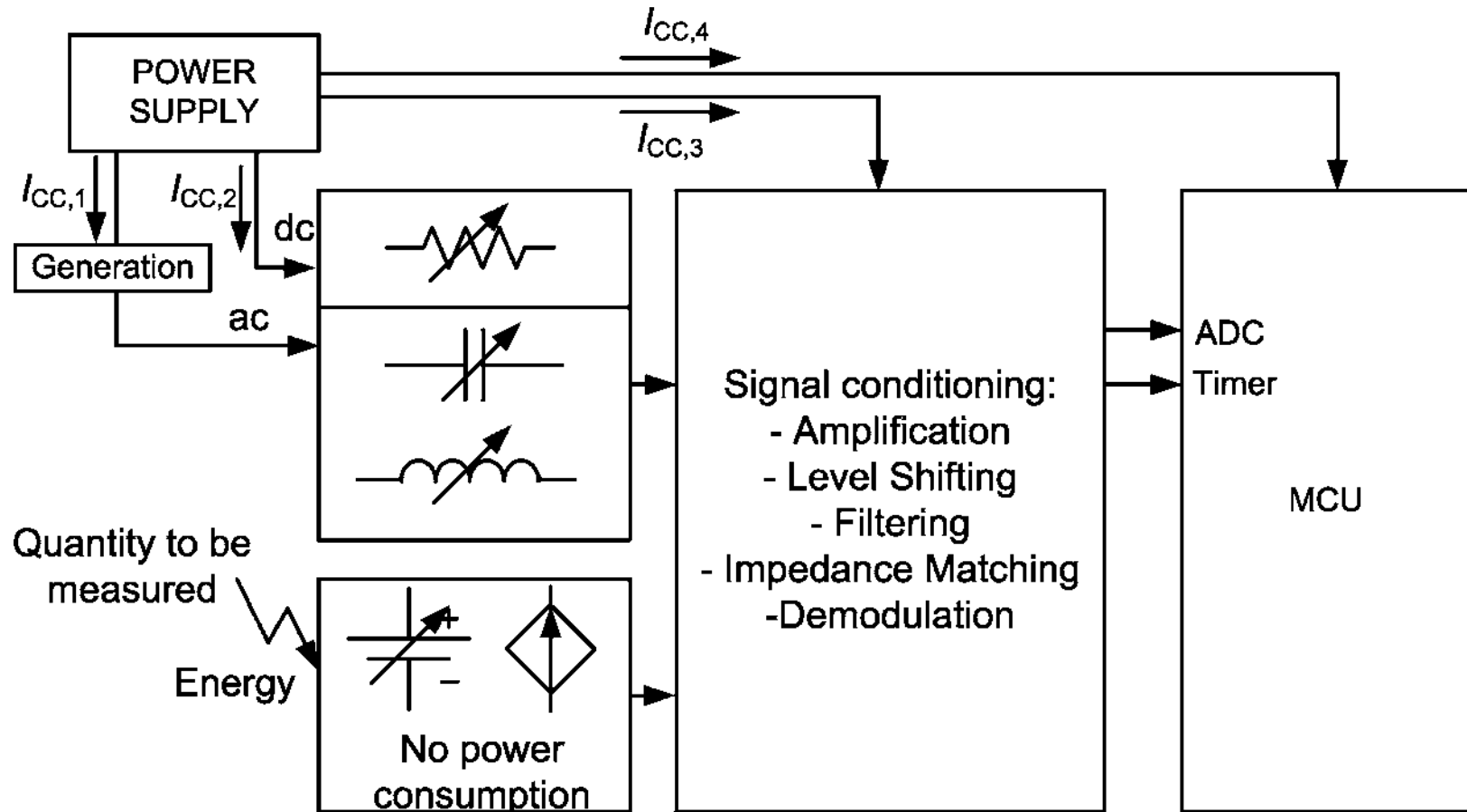
■ Approche « directe »



[Measuring Dynamic Signals with Direct Sensor-to-Microcontroller Interfaces Applied to a Magneto-resistive Sensor](#)

Approche classique : Impact sur la consommation

■ Passif (modulating) / Actif (self-generating)



[Powering Autonomous Sensors](#)

Partie Microcontrôleur (μ C,MCU)

■ Exemples

Table 2.1 Power specifications of three low power commercial microcontroller units [7–9], showing typical values

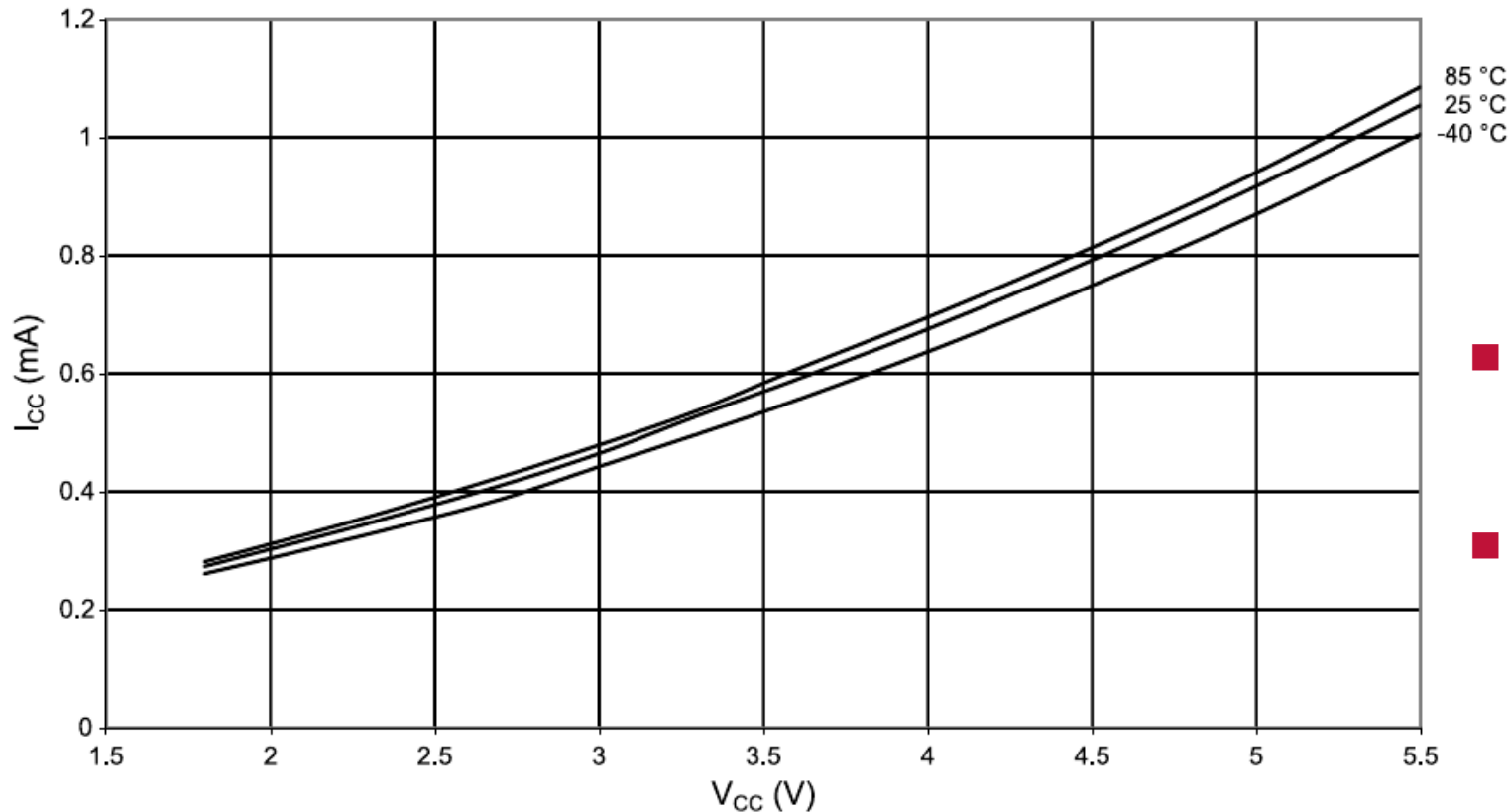
Model	V_{cc} (V)	$I_{MCU,sleep}$ (μ A)	$I_{MCU,active}$ (μ A)	Wakeup time from sleep	Wakeup time from reset
TI, MSP430x11x2	1.8–3.6 >2.2 @ $f = 4$ MHz > 2.8 @ $f = 8$ MHz	0.1 @ 2.2 V (ram retention)	200 @ 2.2 V; 1 MHz	6 μ s @ $f < 3$ MHz	2 ms
Atmel, ATtiny24A	1.8–5.5 >2.7 @ $f > 4$ MHz >4.5 @ $f > 10$ MHz	0.1 @ 1.8 V	210 @ 1.8 V; 1 MHz	750 ns @ $f = 8$ MHz	4 ms
Microchip, PIC16LF72X	1.8–3.6 >2.3 @ $f > 16$ MHz	0.02 @ 1.8 V	110 @ 1.8 V; 1 MHz	7 μ s	65 ms

Partie Microcontrôleur (μC ,MCU)

■ Caractérisations plus avancées

- $I_{\text{MCU,active}}$ versus tension d'alim

$$P_{\text{active}} \sim V^2$$



- Minimiser la tension d'alim
 - Limitation de l'horloge
- Dynamic voltage scaling (DVS)

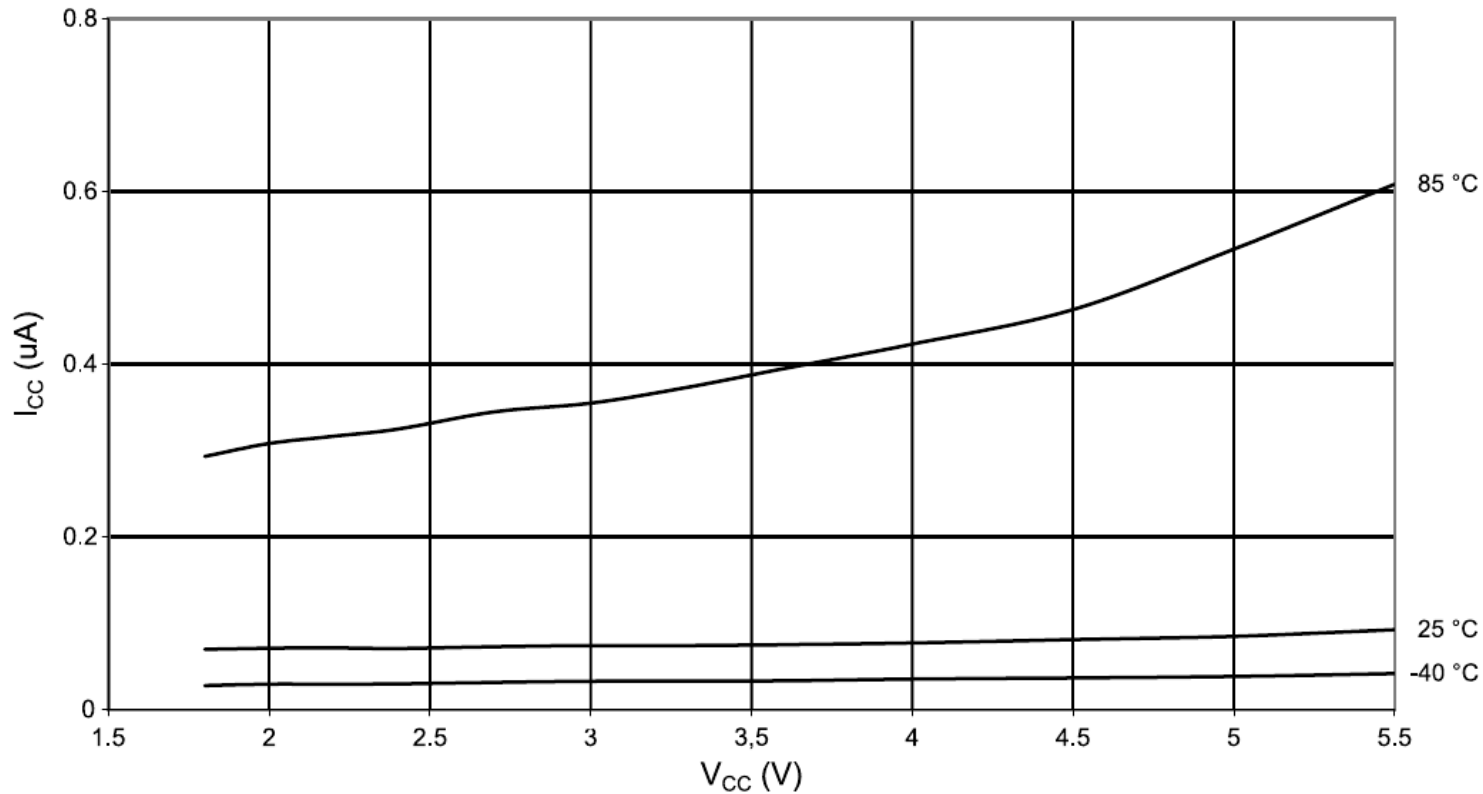
[Powering Autonomous Sensors](#)

Partie Microcontrôleur (μC ,MCU)

■ Caractérisations plus avancées

- $I_{\text{MCU,sleep}}$ versus tension d'alim

$$P_{\text{sleep}} \sim V$$



[Powering Autonomous Sensors](#)

Partie transmetteur

■ Exemple pour le ZigBee

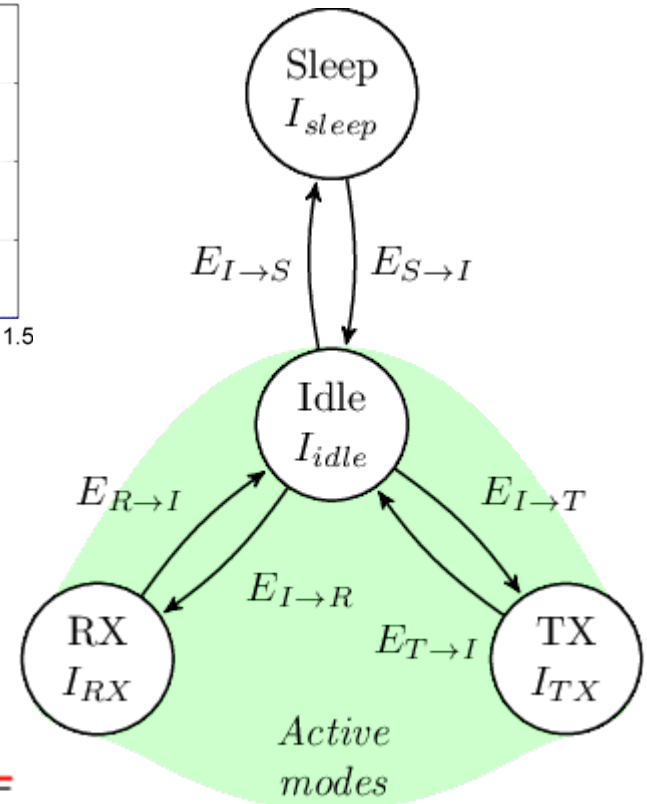
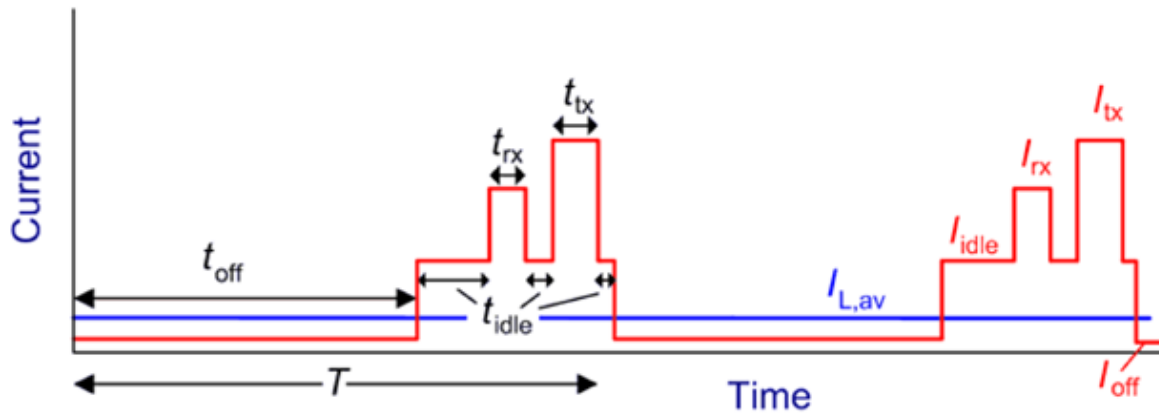
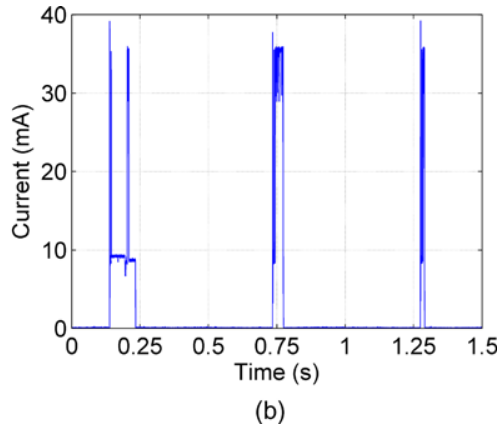
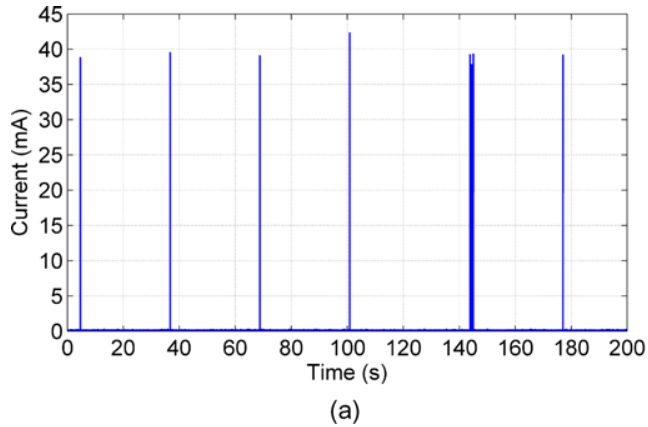
- Optimisé pour très bas débit et basse conso

Table 2.2 Power specifications of ZigBee transceivers [14–17]

Model	V_{CC} (V)	$I_{RF,sleep}$ (μ A)	$I_{RF,rx}$ (mA)	$I_{RF,tx}$ (mA)	Wakeup time from sleep	Wakeup time from reset
Atmel, AT86RF230 (system-on-chip)	1.8–3.6	0.02	15.5	16.5 (@ 3 dBm)	880 μ s	3 ms
Ember, EM 250 (system-on-chip)	2.1–3.6	1	36	36 (@ 5 dBm)	Not specified	Not specified
TI, CC2520 (transceiver only)	1.8–3.8	<1 @ full V_{CC} range	18.5 @ full V_{CC} range	33.6 (@ 5 dBm and full V_{CC} range)	300 μ s	\geq 0.3 ms (clock dependent)
TI, CC2430 (system-on-chip)	2–3.6	0.3	26.7	26.9 (@ 0 dBm)	120 μ s	1.7 ms @ 32 kHz

Modélisation de la charge totale

Mesures et modèle





Conditionnement de la puissance / régulation de l'alimentation

■ Régulateur

- Shunt/série

■ Convertisseur

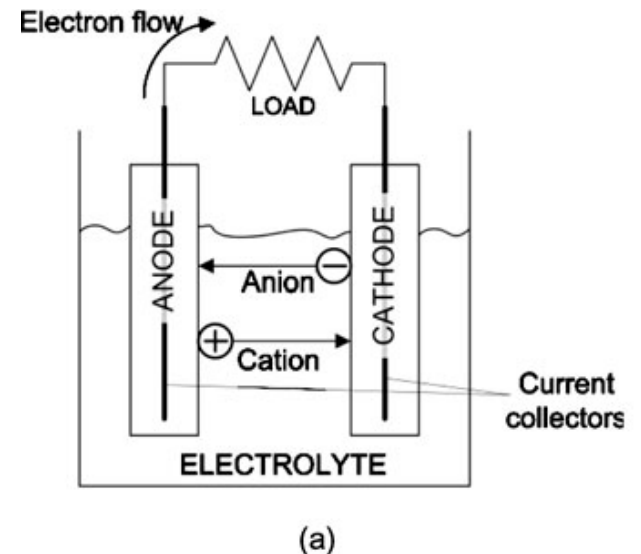
- Buck / Boost
- Onduleur



Piles, Batteries et Accumulateurs

Caractéristiques de base

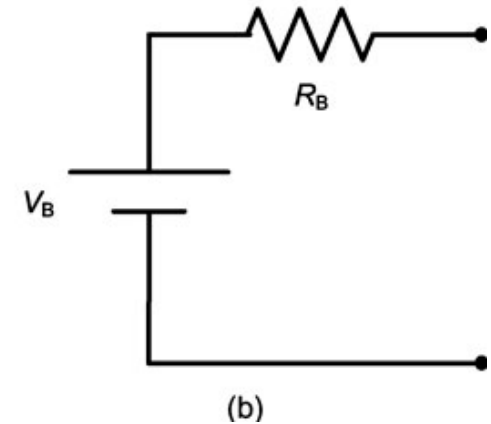
- L'énergie électrique provient d'une réaction chimique.
- Une ou plusieurs unités électrochimiques de base, appelées cellules ; assemblage série/parallèle
- Une cellule
 - une électrode négative (une anode)
 - une électrode positive (une cathode)
 - un conducteur ionique (un électrolyte)



Caractéristiques de base

■ Modèle simple : Thévenin

- V_B : tension en circuit ouvert (OCV)
 - V_B diminue avec la charge interne stockée (Q)
- R_B : impédance de sortie équivalente
 - dépend de la chimie, de la conception de la batterie et de la température



■ Première classification

- « Batteries primaires » (BP)
 - ne peuvent pas être rechargées ; usage unique
 - dispositifs domestiques simples ; applications à long terme et à faible décharge
- « Batteries secondaires » (BS)
 - peuvent être rechargées électriquement facilement.
 - dispositifs portables



Caractéristiques de base

- **Capacité**
- **Tension**
- **Densité d'énergie**
- **densité de puissance**
- **Auto-décharge**
- **Profondeur de décharge (DOD)**
- **État de charge (SOC)**
- **Effets de la température**



Caractéristiques de base

■ Capacité

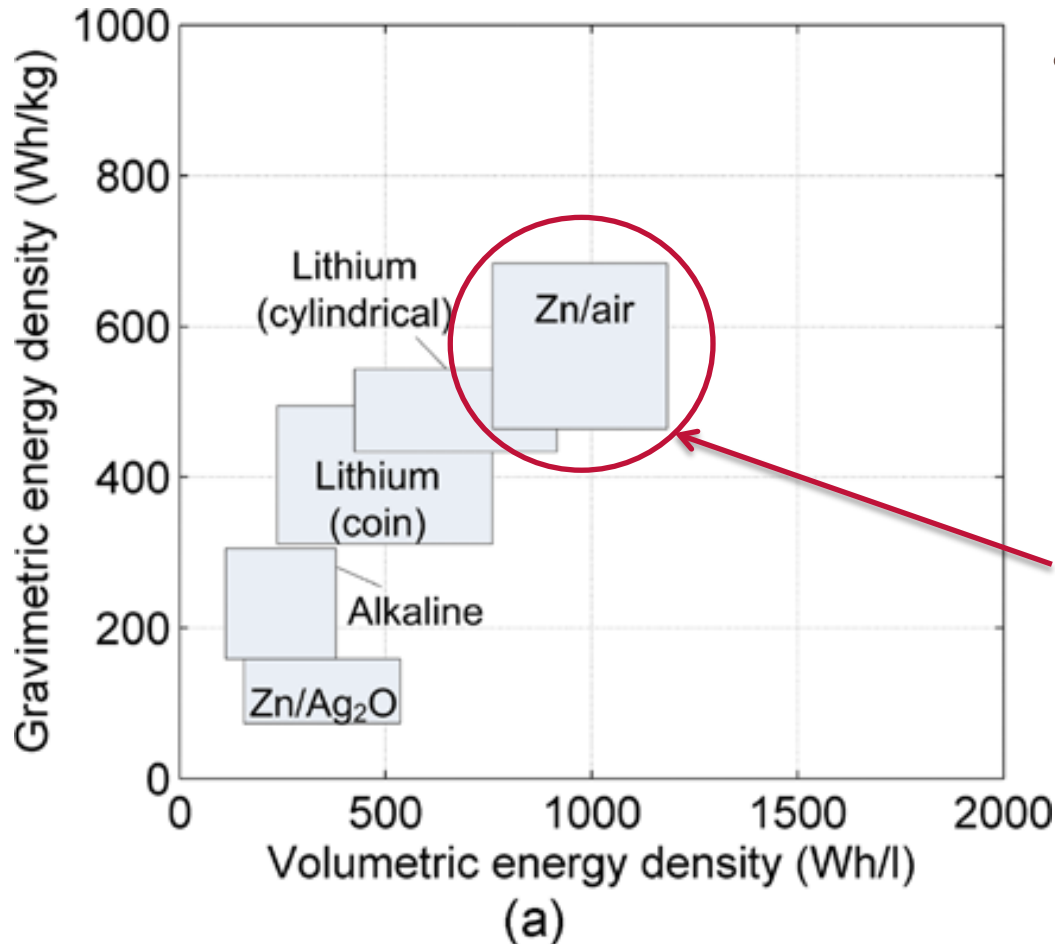
- Charge électrique totale qui peut être récupérée à partir de la batterie complètement chargée dans des conditions de décharge spécifiques
- Généralement en Ah (pour les BS en particulier) ; sinon exprimé en nombre d'heures pendant lesquelles la batterie peut alimenter une certaine charge (pour les BP)

■ Tension

- Dépend
 - Potentiel standard des matériaux actifs utilisés
 - Quantité de charge restante
- Lithium offre le potentiel standard le plus élevé

Batteries primaires

■ Caractéristiques

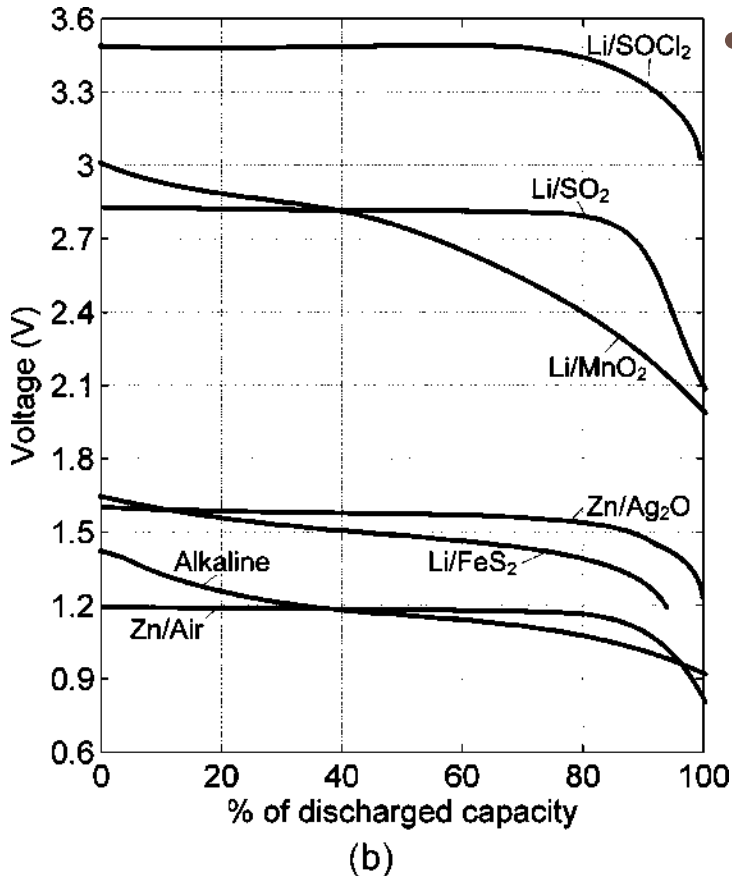


- Densité d'énergie gravimétrique en fonction de la densité d'énergie volumétrique

~ 600 Wh/kg ; 1000 Wh/l

Batteries primaires

■ Caractéristiques



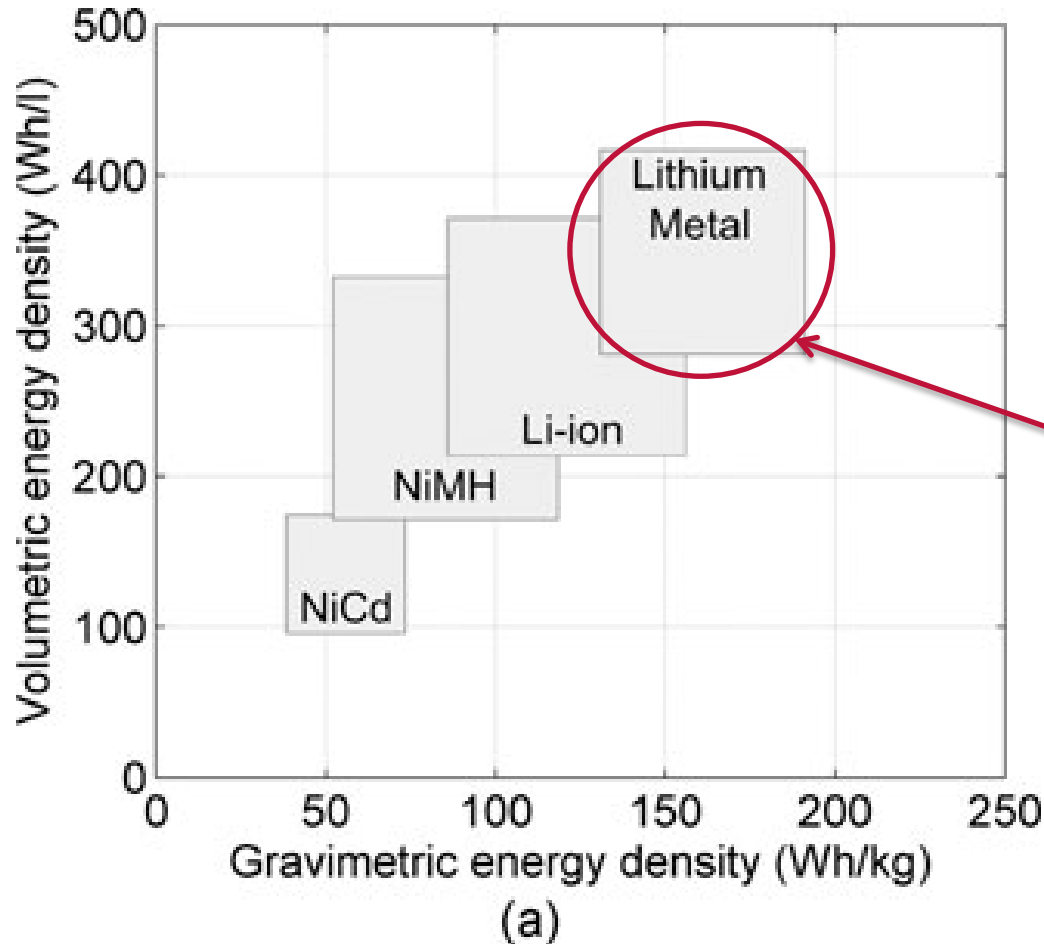
- Profils de décharge de tension à des taux de décharge de 30 h à 100 h

Table 4.1 Principal characteristics of the four main types of primary batteries [1, 3]

Battery type	Alkaline	Lithium based	Zinc-air	Silver-oxide
Internal impedance (mΩ)	Low (tens)	Moderate (hundreds)	High (thousands)	High (thousands)
Discharge profile (Fig. 4.3(b))	Sloped	Flat/Sloped	Flat	Flat
Shelf life or lifetime (years)	4 to 5	10 to 20	3 to 4	4 to 5
Operating temperature (°C)	-20 to 55	-20 to 55 ^a	0 to 50	0 to 55

Batteries secondaires

■ Caractéristiques



- Densité d'énergie volumétrique en fonction de la densité d'énergie gravimétrique

~ 170 Wh/kg ; 350 Wh/l

Batteries secondaires

■ Caractéristiques

- Courbes de charge (à 1C et 0,75C) et de décharge (à 0,2C)

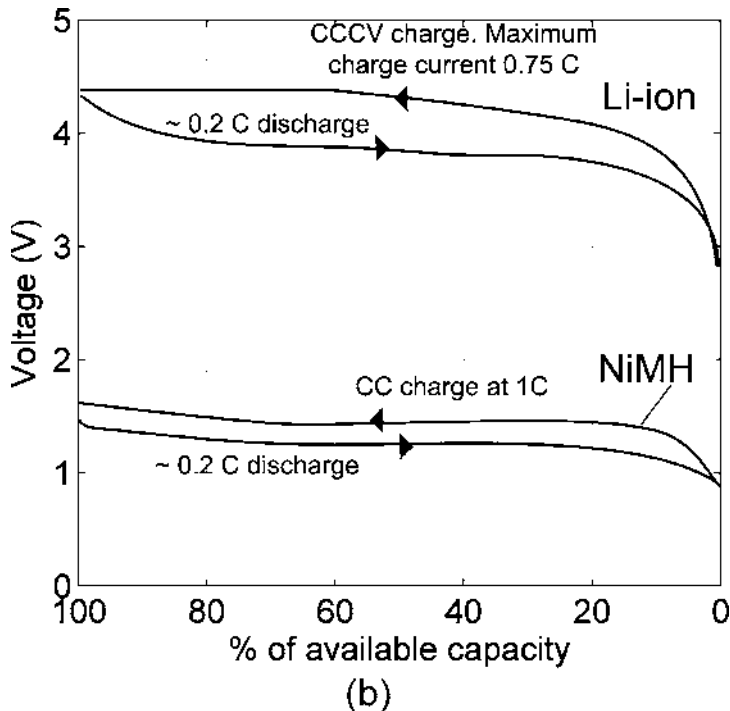
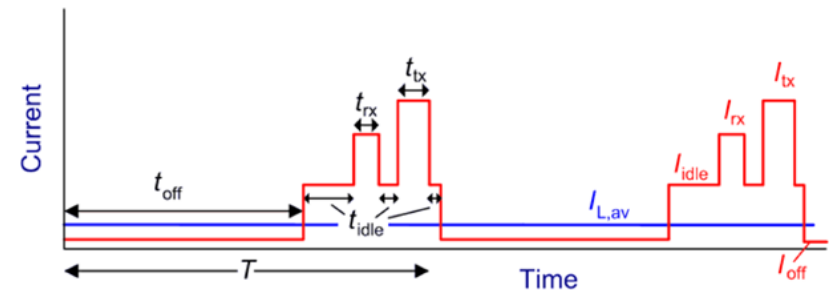


Table 4.2 Principal characteristics of the three main types of secondary batteries [1–3]

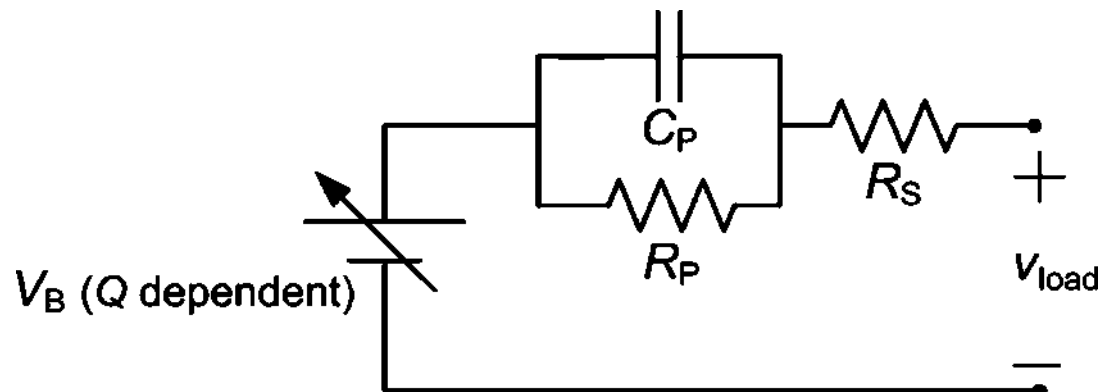
Battery type	Li-ion	Li polymer	NiMH
Internal impedance Z (m Ω)	30 to thousands	40 to thousands	50 to thousands
Discharge profile (Fig. 4.4(b))	Sloped	Sloped	Sloped
Recommended charge method	Constant-current constant-voltage (CCCV)	CCCV	Constant current (CC) with charge termination
Over-voltage tolerance	Explosion risk	Damage risk	Temperature increase
Temperature range (°C)			
Charge	0 to 40	0 to 45	0 to 45 ^a
Discharge	-20 to 60	-20 to 60	-20 to 60 ^a
Self-discharge (% per month)	2	2.5	15 to 25
Cycle life (cycles)	500 to 1000	300 to 500	300 to 500
Float or calendar life (years)	> 5	> 5	4 to 6

Prédiction de l'autonomie

- Prédire le comportement de la tension d'une batterie sous des charges pulsées



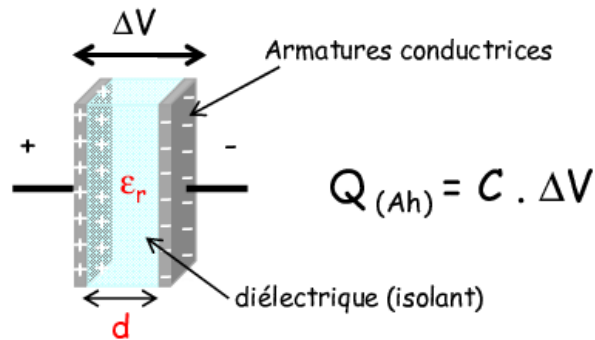
- Modèle électrique de la batterie



Super-condensateurs

■ Constitution de base

Condensateur classique



$$C = (\epsilon_0 \epsilon_r A) / d$$

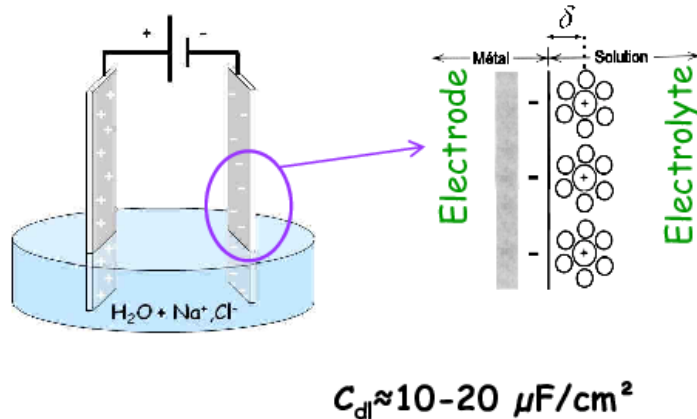
Capacité

Constante diélectrique diélectrique

épaisseur diélectrique

Surface d'interaction (électrode/électrolyte)

Supercondensateur : Capacité de double couche électrochimique



$$C_{dl} = (\epsilon_0 \epsilon_r A) / d$$

Capacité de Double Couche

Constante diélectrique électrolyte

Distance d'approche (qqes Å)

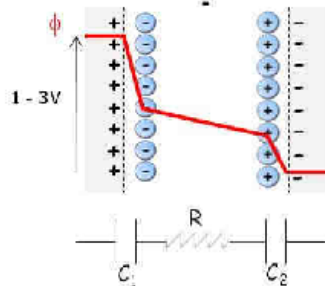
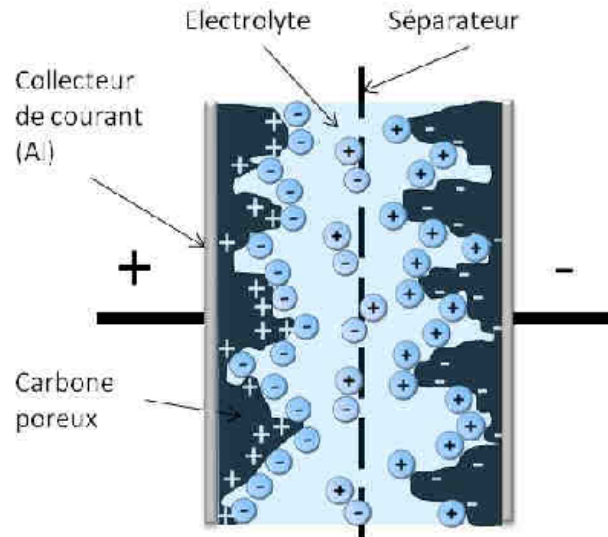
Surface d'interaction (électrode/électrolyte)

Supercondensateurs : Principes et Evolutions, Patrice SIMON

Super-condensateurs

■ Points clés

Stockage électrostatique : pas de réaction d'oxydo-réduction



Circuit équivalent simplifié

[Supercondensateurs : Principes et Evolutions, Patrice SIMON](#)

- ΔV appliqué :
 - adsorption des ions sur C
 - charge de la Double Couche ($10-20 \mu\text{F}/\text{cm}^2$)
- Carbone poreux (grande surface) ($1000-2000 \text{ m}^2/\text{g}$)
 - 100 F/g de CA
- Electrolyte aqueux : $\Delta E_{\text{max}} = 1 \text{ V}$
Electrolyte organique : $\Delta E_{\text{max}} = 2,7 \text{ V}$

Points-clés :

- Pas de Rédox → forte Puissance
- Cyclabilité : $> 10^6$ cycles
- charge/décharge rapide (qqs)
- basses températures ($- 40^\circ\text{C}$)

Super-condensateurs

■ Résumé : batteries vs SCs

Caractéristiques	Batteries Li-ion	SuperCondensateurs
Temps de décharge*	3-5 min.	~ 1s
Temps de charge*	> 6 min.	~ 1s
Durée de vie (cycles)	< 5000 (@C)	> 1 000 000
Energie (Wh/kg)	100 - 150	5
Puissance (kW/kg)	< 1**	> 10
Fonctionnement (°C)	-20°C - +70°C	-40°C - +70°C
Rendement	70% - 95%	> 95%
Coût (€ par Wh)	0,8 - 1,5	8 - 15
Coût (€ par kW)	60 - 120	20 - 40

- Piles électrochimiques (BP)
- Li : ~ 500 Wh/kg

* pour récupérer la totalité de l'énergie stockée ; ** temps minimal de décharge avec un rendement de 90%

A. Burke, Electrochimica Acta 53 (2007) 1083-1091, J. Miller ECS Interface (2008)

SC et batteries sont complémentaires : puissance et énergie

Applications

Capacité < 100F :

- appels de puissance,
- tampons de puissance

→ Nombreuses applications existantes : outillage, véhicule, électronique de puissance...



Visseuse électrique

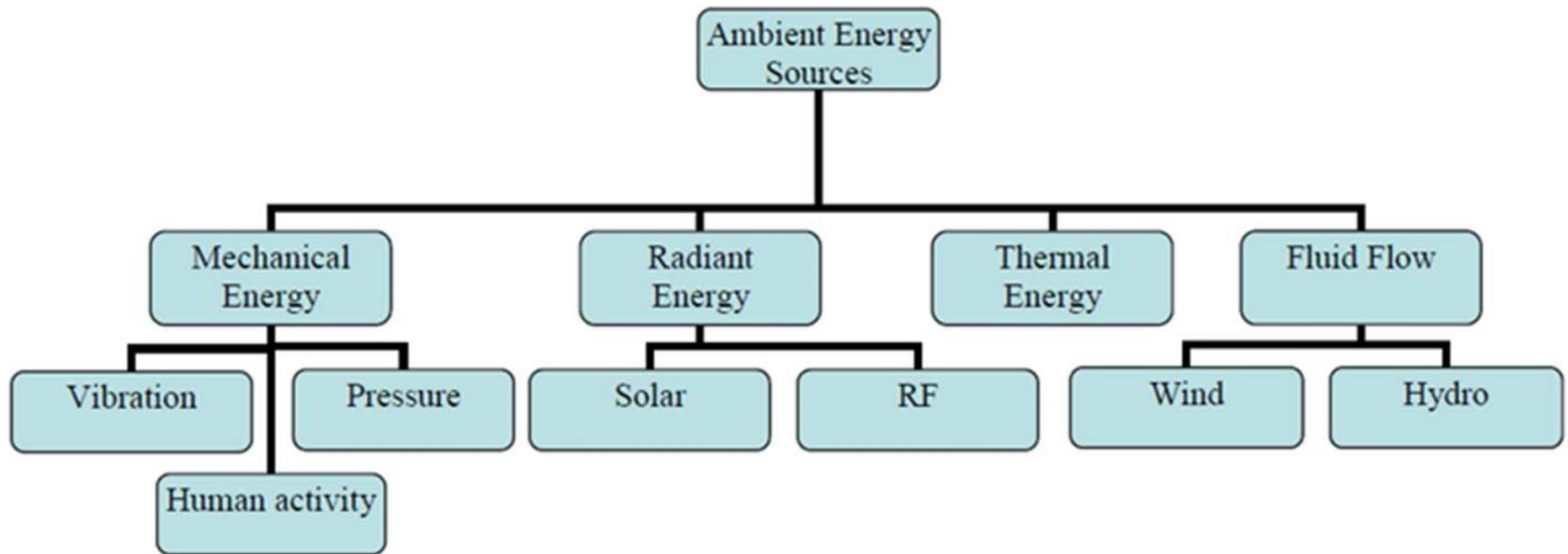


[Supercondensateurs : Principes et Evolutions, Patrice SIMON](#)



Sources d'énergie pour les systèmes autonomes

Energies de l'environnement ambiant



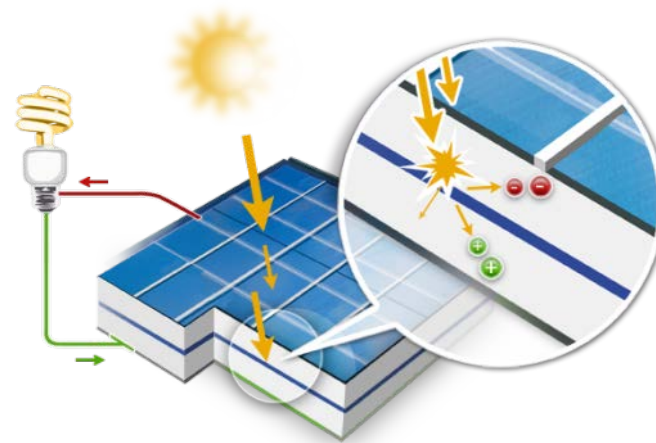
[Energy harvesting in wireless sensor networks: A survey](#)

Quelques chiffres

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](#)

Énergie de rayonnement Lumineuse



Caractéristique du rayonnement solaire

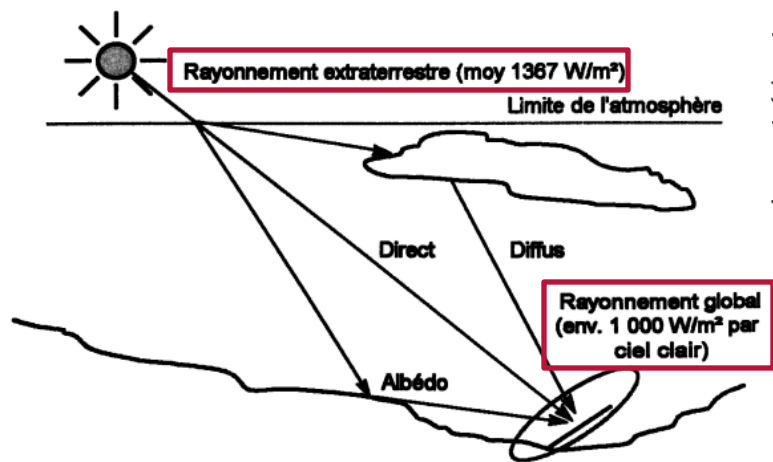
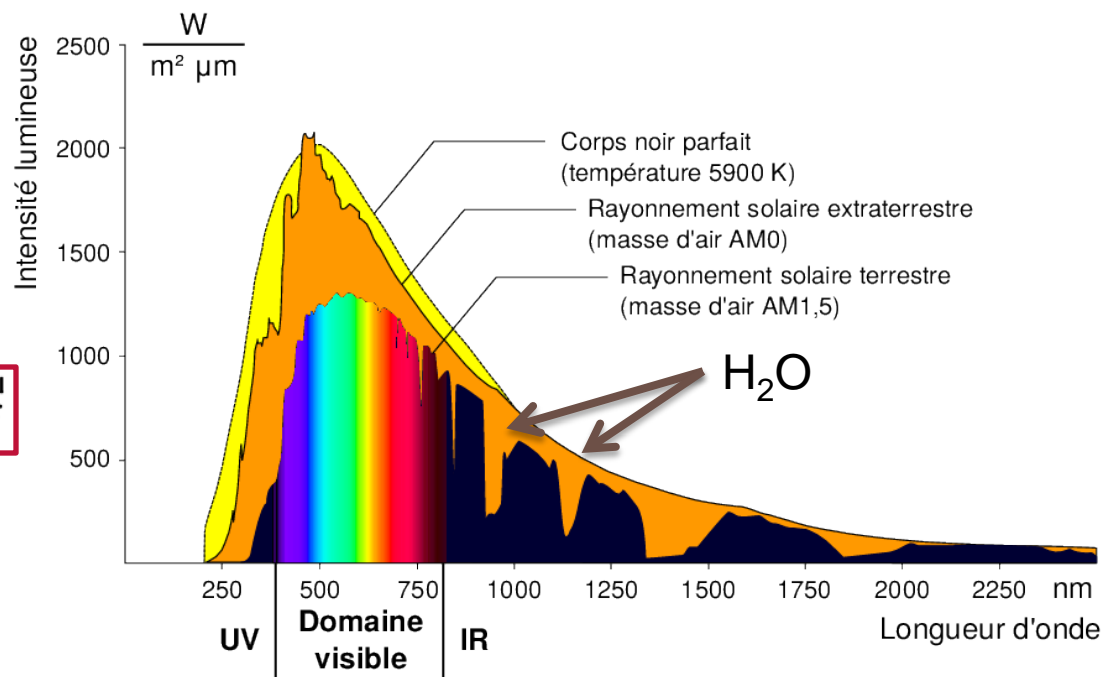


Figure 2.5 - Composantes du rayonnement solaire au sol



Répartition spectrale du rayonnement solaire : Hors atmosphère (AM0) ; Au sol incidence 41,8° (AM1,5)

Caractéristiques des cellules photovoltaïques

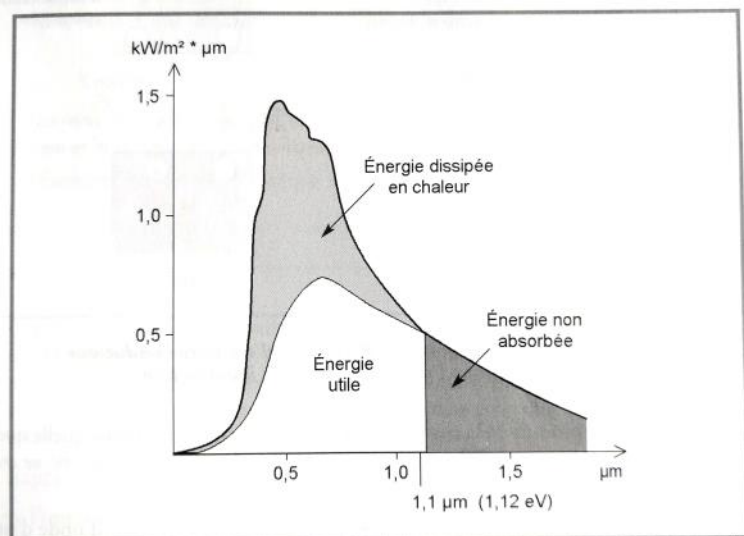
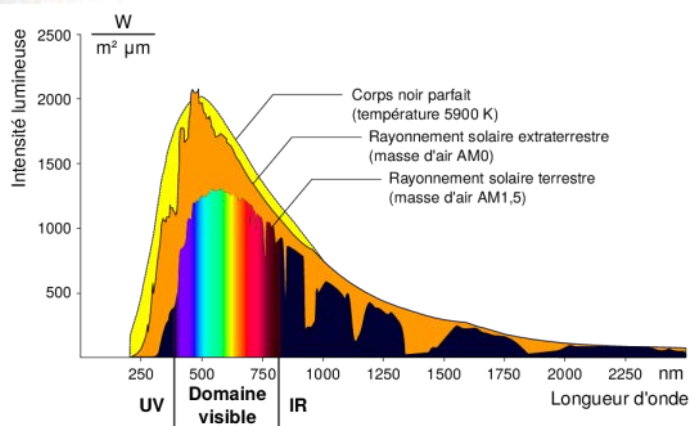


Figure 3.4 – Spectre solaire AM0 et portions exploitables par le silicium cristallin



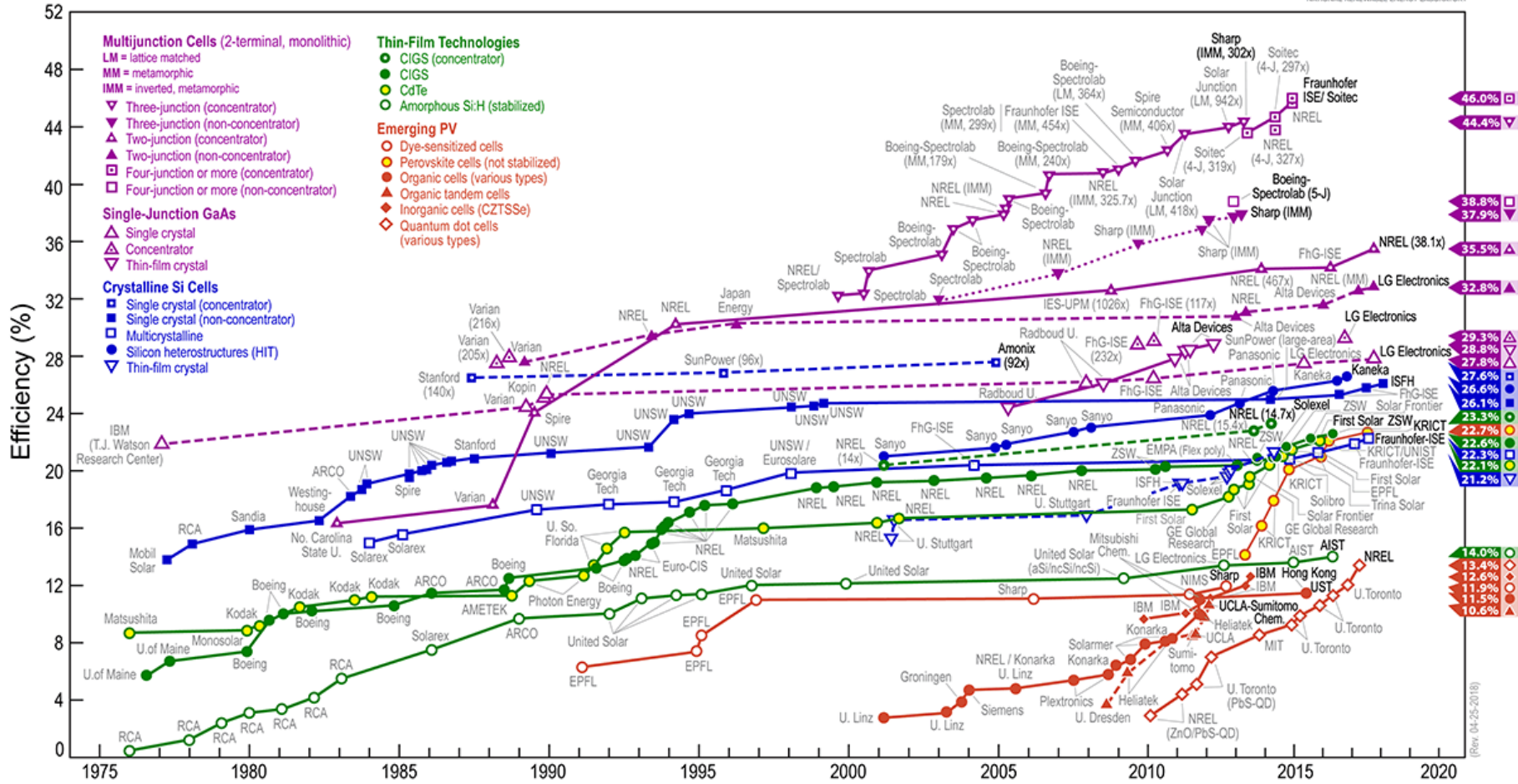
	Silicium Cristallin $E_g = 1,1\text{eV}$	Arséniure de gallium $E_g = 1,4\text{eV}$
Courant (mA/cm^2)	53,5	39
Puissance (mW/cm^2)	58,5	55
Rendement	0,44	0,41

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

Energie solaire photovoltaïque ; Livre d'Anne Labouret et Michel Viloz

Research Cell Record Efficiency Chart

Best Research-Cell Efficiencies

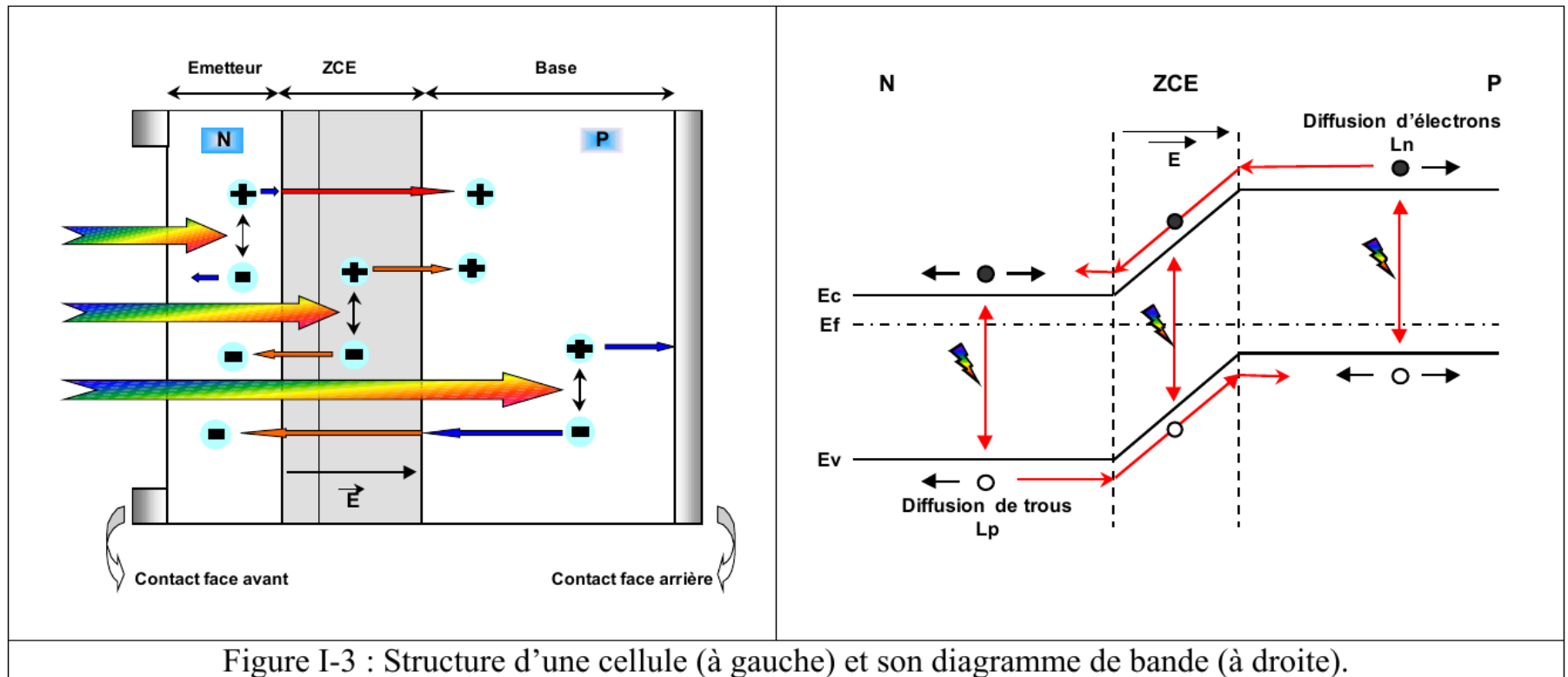


This plot is courtesy of the National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.



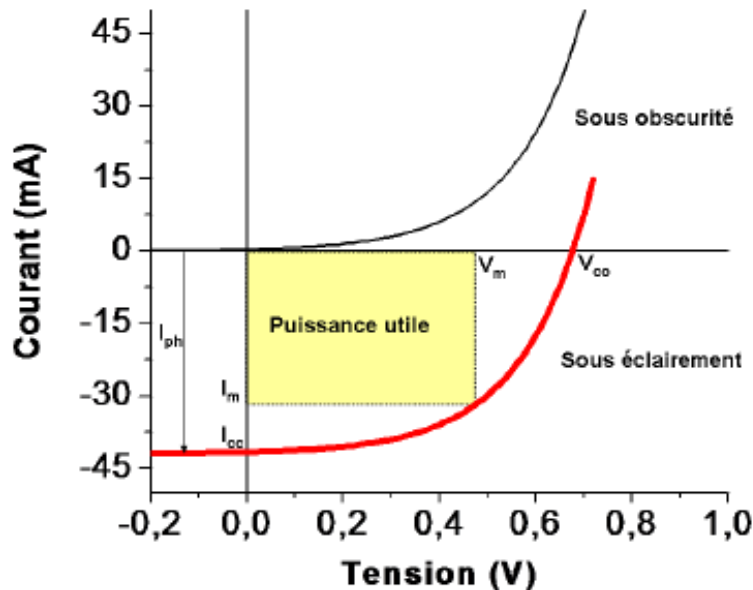
Caractéristiques des cellules photovoltaïques

■ L'effet photovoltaïque



Caractéristiques des cellules photovoltaïques

■ Propriétés électriques



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

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

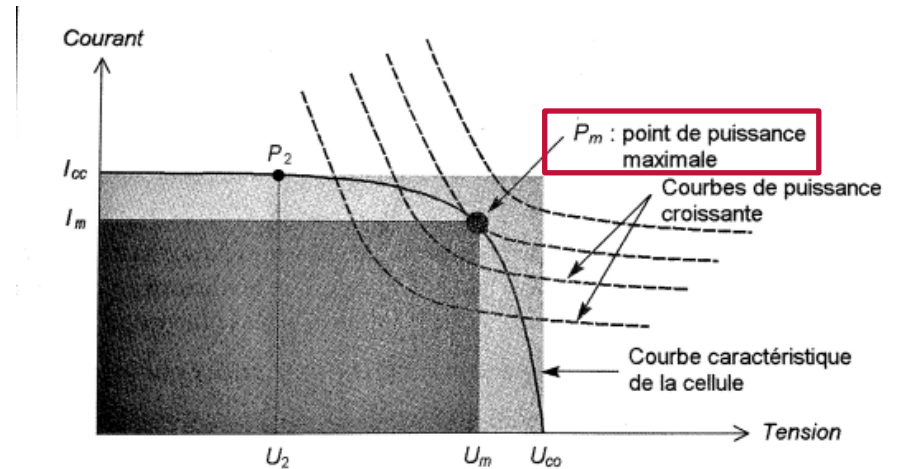


Figure 3.10 - Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension

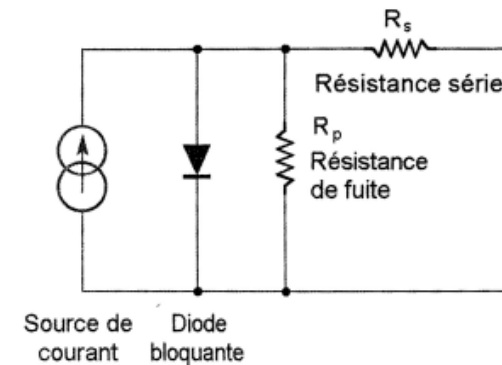
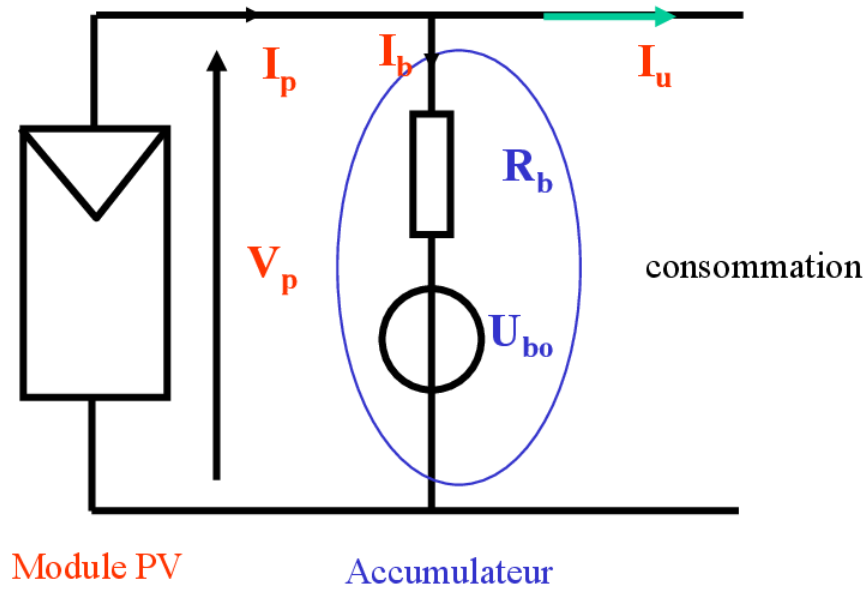


Figure 3.9 - Schéma équivalent d'une cellule solaire

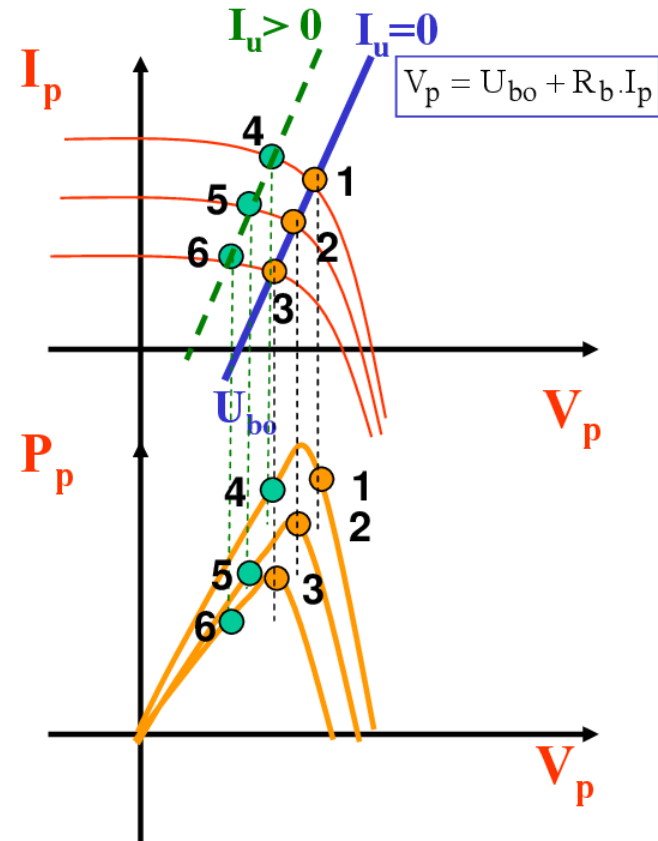
Chaîne de conversion

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 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

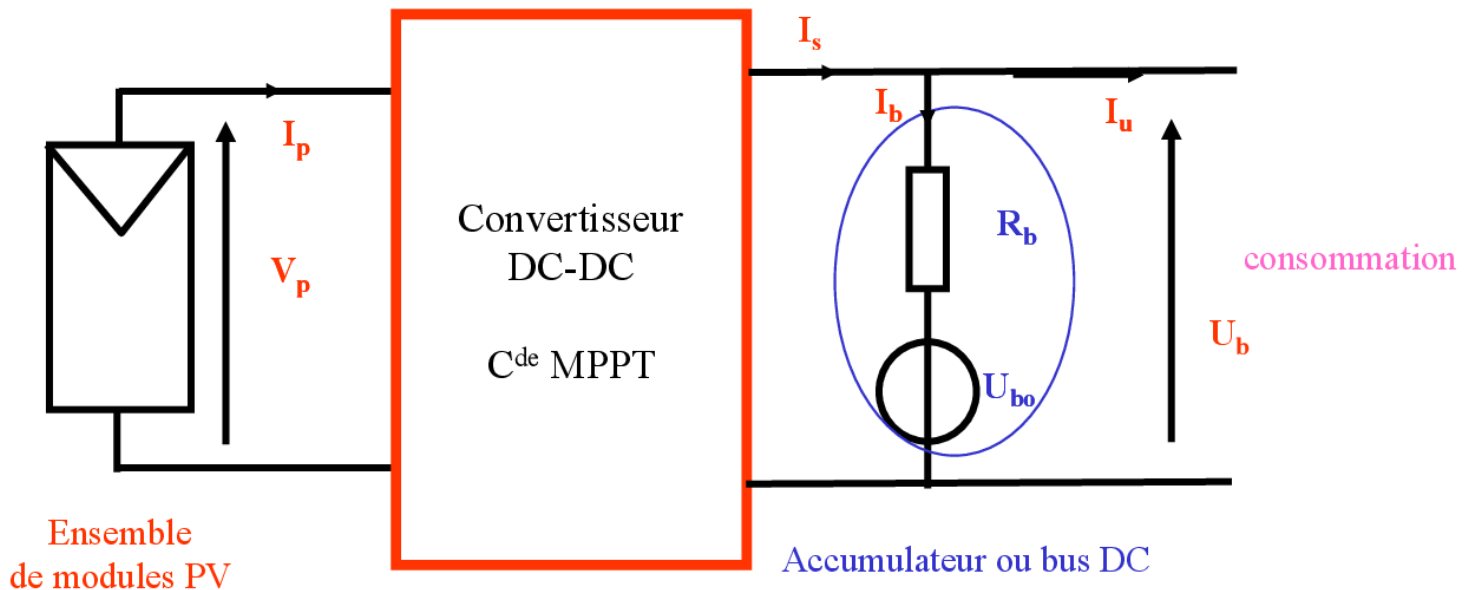
Variables : de température,

d'insolation...

de tension continue (vieillesse batterie, EDC...)

des disparités d'éclairement des modules

de la consommation...



Récupération d'énergie pour systèmes autonomes. Bernard Multon

Applications

Faibles besoins d'énergie en faible éclairement : Si amorphe

Calculatrice *(source: Solems)*



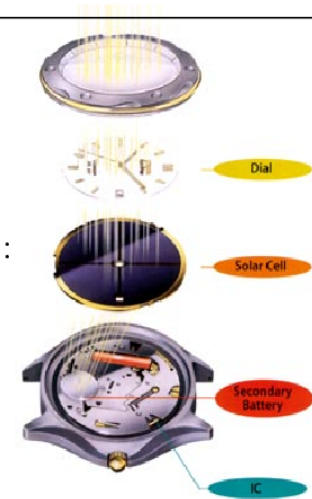
Cellule de 3 à 4 cm²
Fonctionnement direct sans accu
qq μ A sous 1.5V
Seuil d'éclairement env. 50 lux
(0,5 W/m²)

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

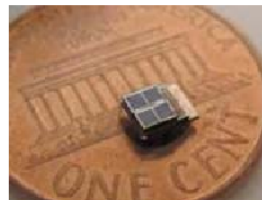


(Source : Citizen)

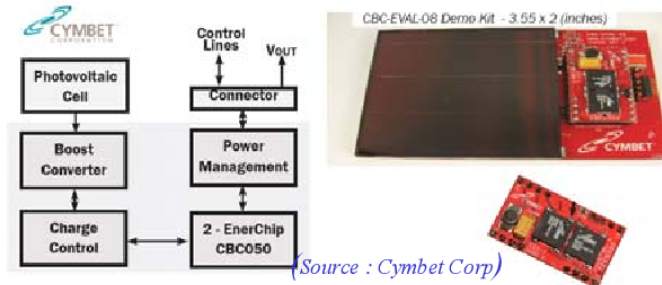
Faibles encombrements, plus forts besoins : Si cristallin

Capteur autonome

Dans 2,5 x 3,5 x 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 :



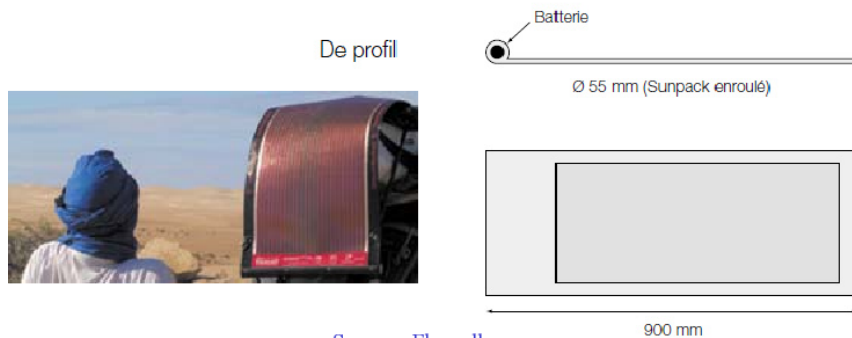
Professional (13.8 Watts)

0,1 m² @ 1000W/m² et 14% => 14 W

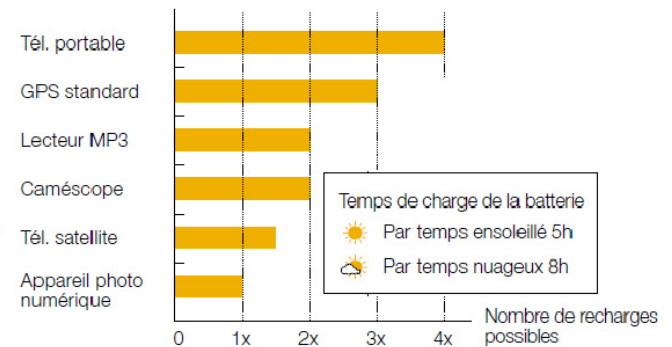


ICP Global Technologies : iSun Solar charger

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

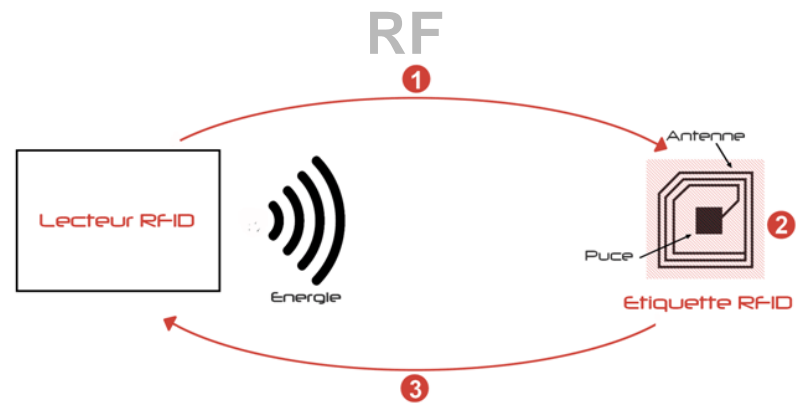


Source : Flexcell

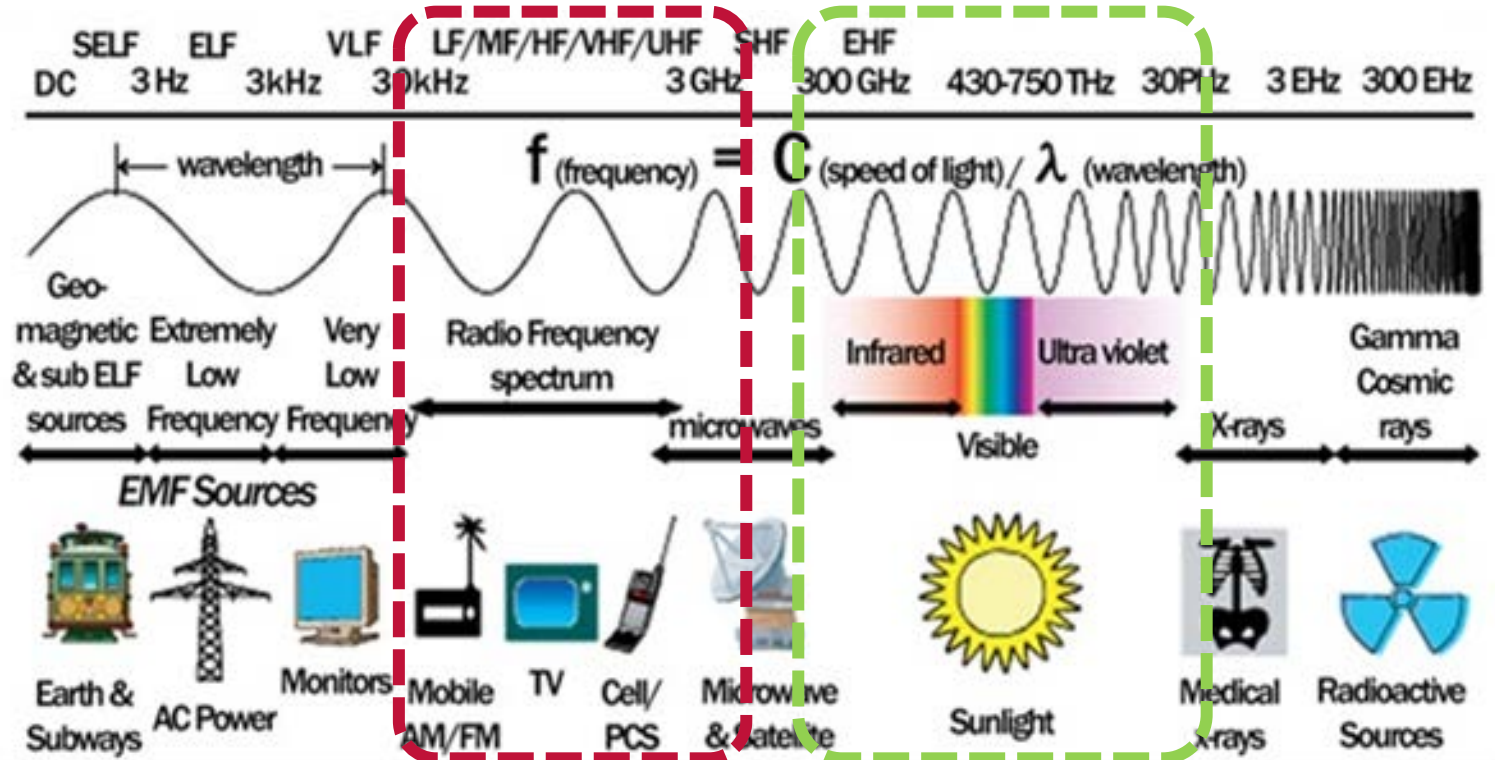


Récupération d'énergie pour systèmes autonomes. Bernard Multon

Énergie de rayonnement



Le spectre électromagnétique et son exploitation



Source artificielle

Source naturelle

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

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

Radiation (beaucoup) moins énergétiques

Intérêt de la récupération d'énergie RF

■ Circuits à intégration à très grande échelle (VLSI)

- Circuits RF passifs $\sim 2 - 100 \mu\text{W}$

■ Systèmes embarqués hyperspécialisés

- Nombre de tâches limités
 - Implémentation en ASIC \rightarrow Conso \ll Circuits génériques

■ Beaucoup de matériaux sont transparents aux ondes radios

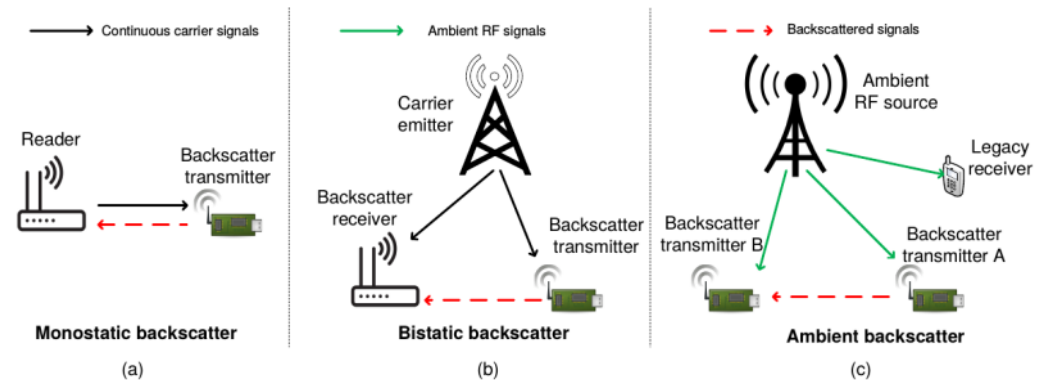
- Peut être placé dans une zone sans fermée (\emptyset vent, \emptyset lumière)

■ Communication par rétrodiffusion (Backscattering)

- Solution intéressante pour les circuits RF passifs

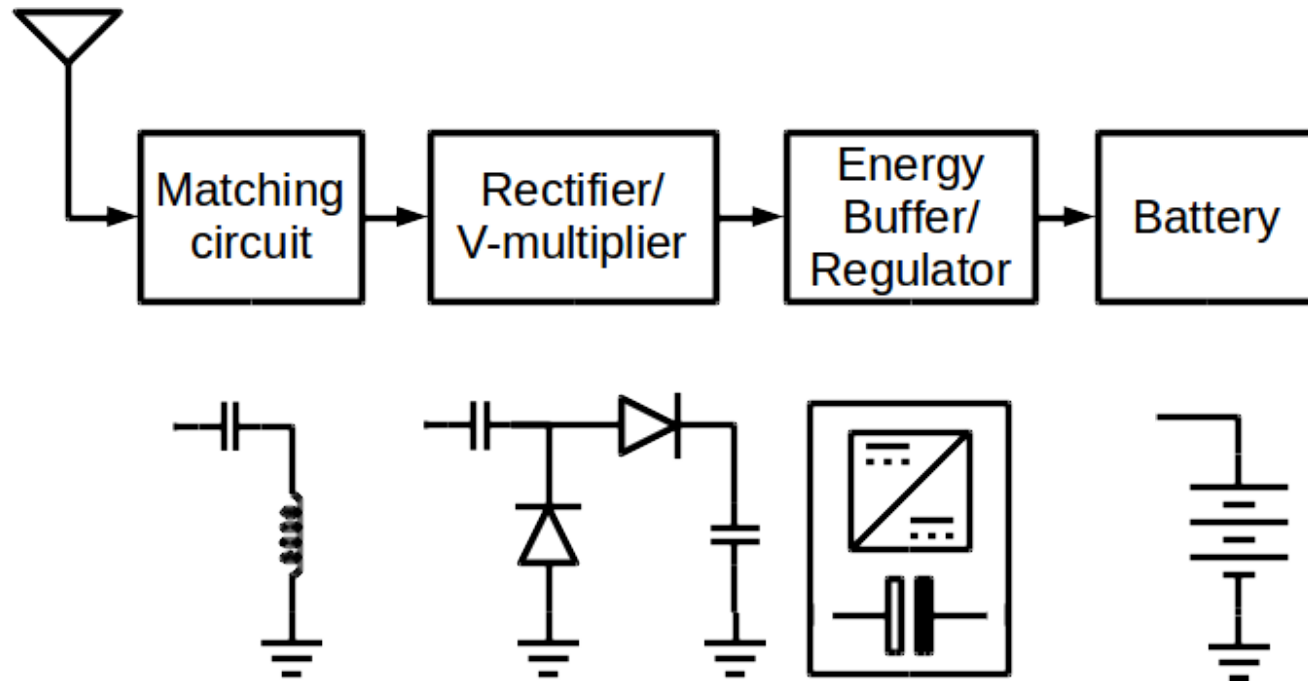
■ Communication dirigée

- Solution aux lasers problématiques



[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.

Contraintes de conception

■ Distances de transmission : r

- NFI : couplage transfo
- NFR : effets de diffraction
- FFR : ondes planes

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

■ 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 → IC

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

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	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

■ Puissance de transmission

- Puissance d'émission : LIMITÉE !
 - Equivalent Isotropically Radiated Power (EIRP)
 - Ex : US : EIRP = 4W (ISM 900 & 2.4)

- Puissance à la réception
(équation des télécoms – Friis)

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

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



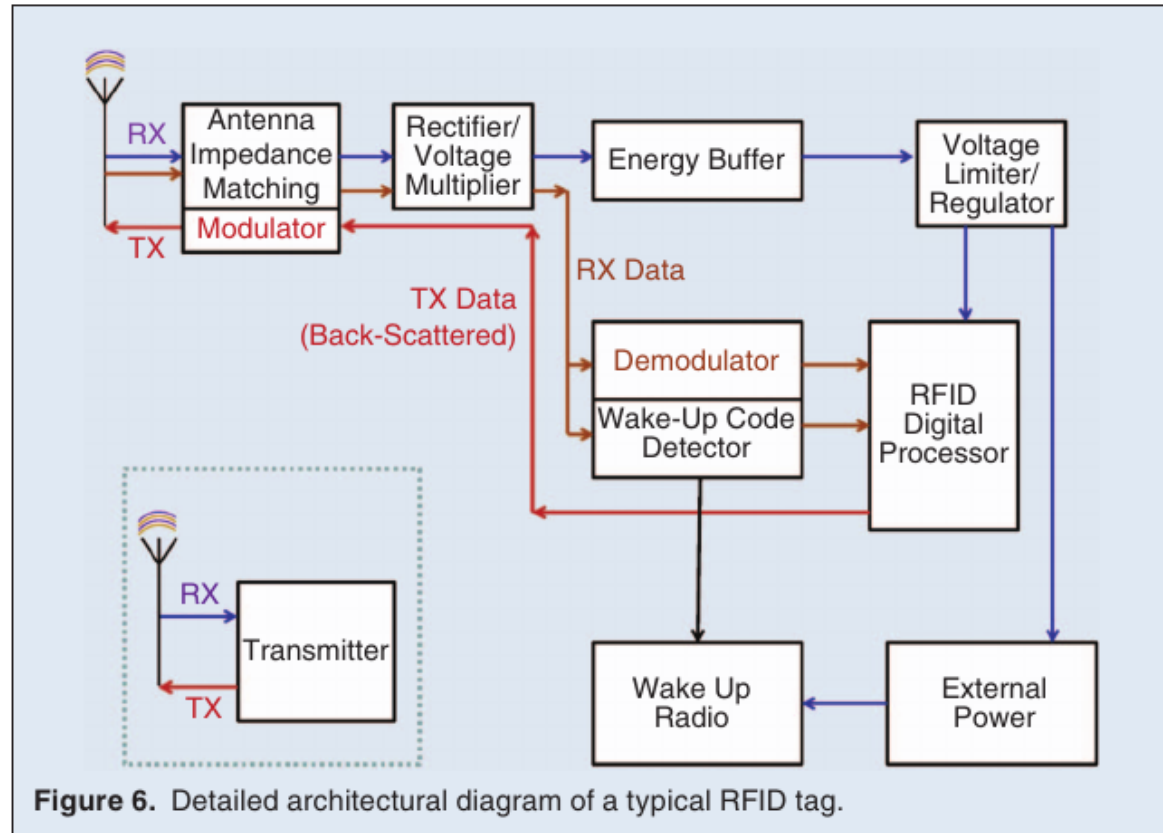
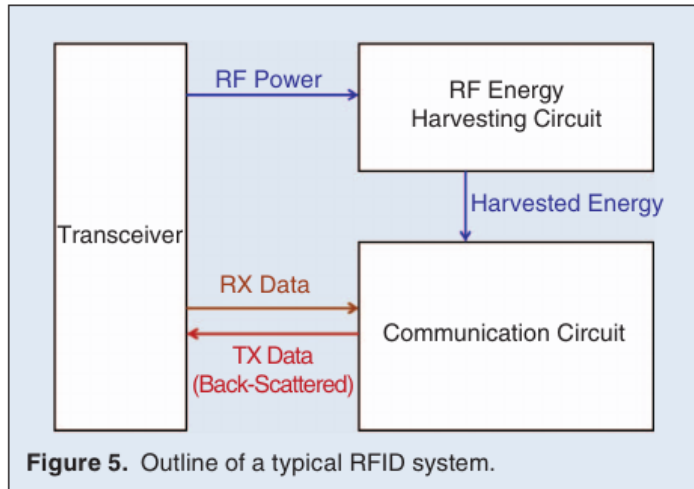
Contraintes de conception

■ Un émetteur obligatoire

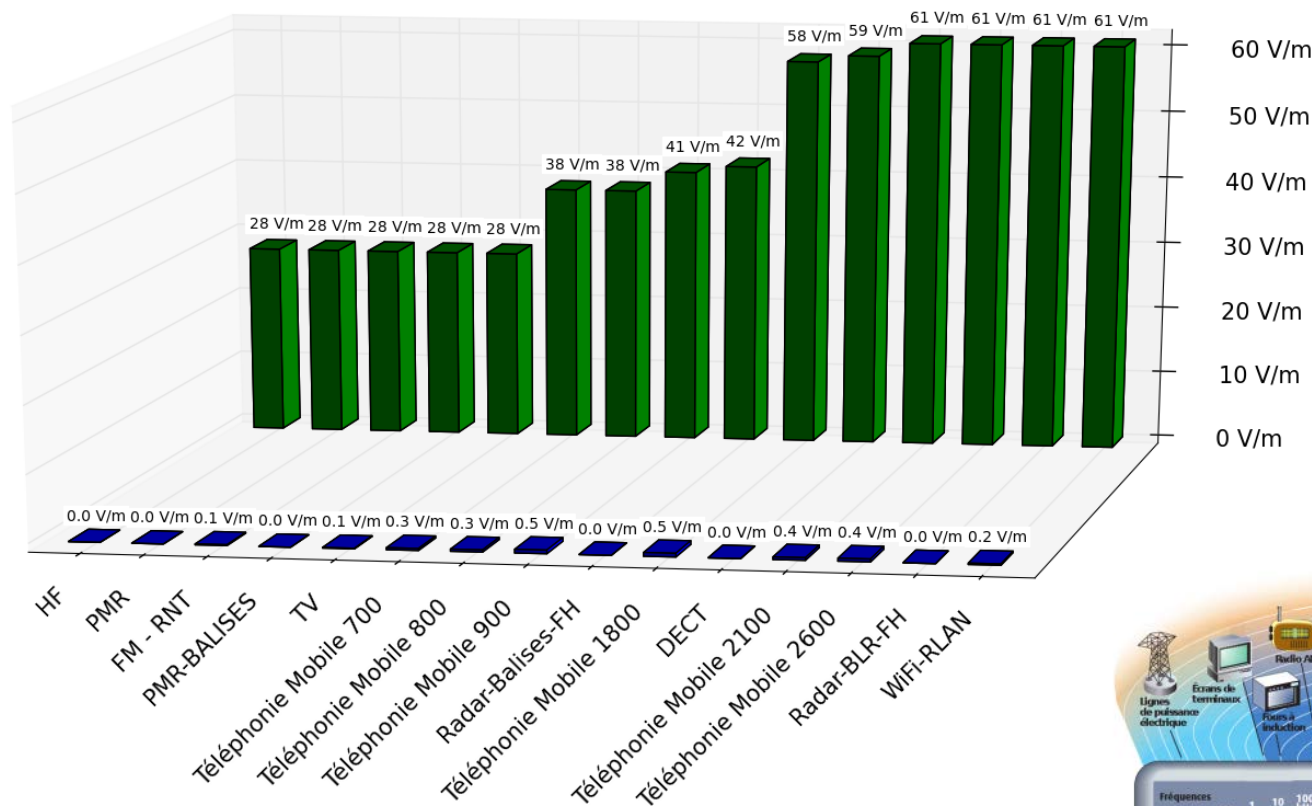
- Nœud unique dédié : « RFID reader »
- Réseau de nœuds coordonnés
- Émetteurs décorrélés

- Les lecteurs pour les communications par rétrodiffusion
 - Sensibilité élevée pour la détection
 - Grande taille en comparaison du dispositif interrogé
 - Doit fournir la puissance
 - L'émetteur a une conception fondamentalement différente du récepteur
 - Utilisation de formes d'ondes spécialement optimisées
 - Conception d'antenne soignée
 - Méthodes de décodage améliorées

Les blocs de base



Récupération d'énergie RF ambiante



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

[Rapport d'essai Champ électromagnétique in situ - 29 rue de l'Espérance](#)

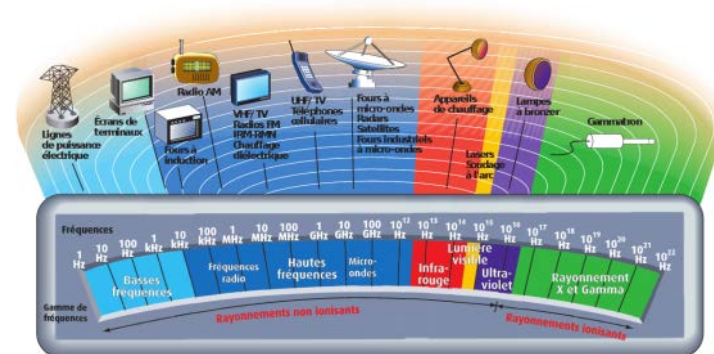


Figure 1. Le spectre électromagnétique

INRS

Récupération d'énergie RF ambiante

■ Récupération d'énergie passive

- Réception et stockage de l'énergie radio uniquement
- Pas de traitement du signal (modem, interprétation des données)

■ Utilisé les systèmes isolés

- Pas de maintenance périodique
- Requiert des stockages d'énergie performants
 - Supercondensateurs et microbatteries
- Source d'énergie relativement stable
 - Ex: tour de transmission
- Période de charge essentiellement infinie
 - Plus grande marge de manœuvre pour le stockage de l'énergie
- Zones dangereuses ou difficile d'accès
 - Contrainte de fiabilité accrue
 - Maximise la récupération par des antennes plus grandes

Récupération d'énergie RF à source dédiée

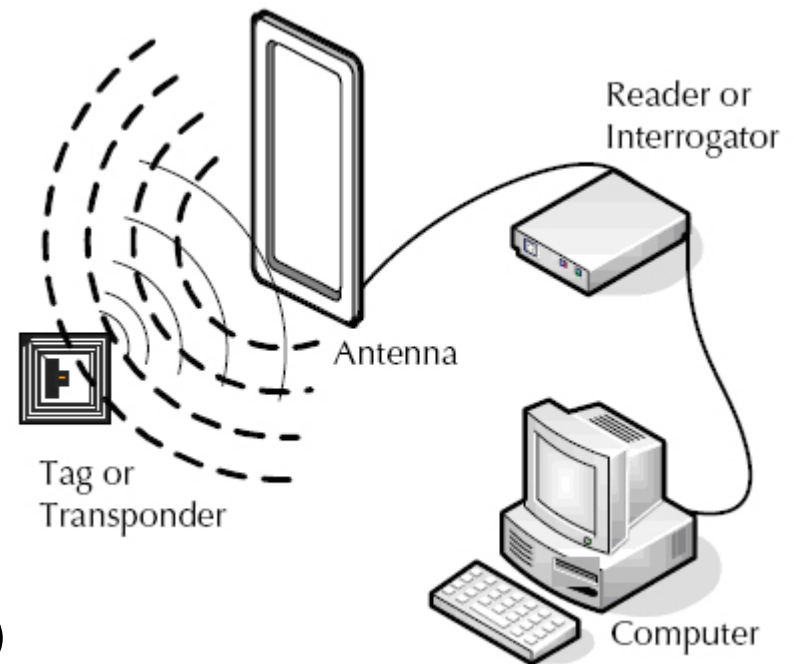
■ Émetteur conçu pour transmettre la puissance

- A courte distance

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

■ Exemple

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

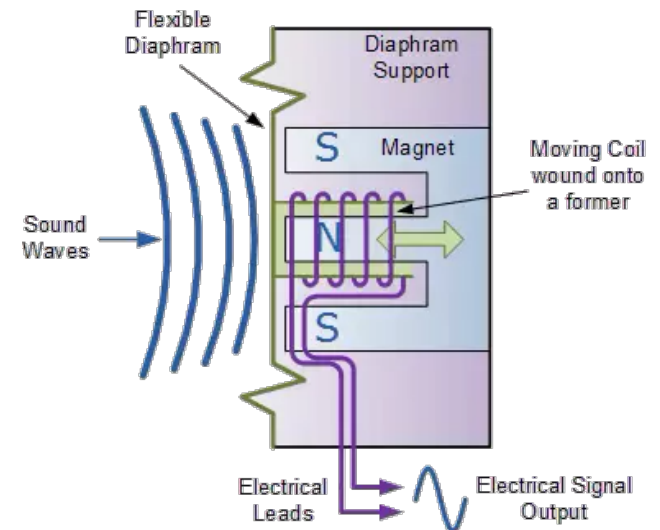
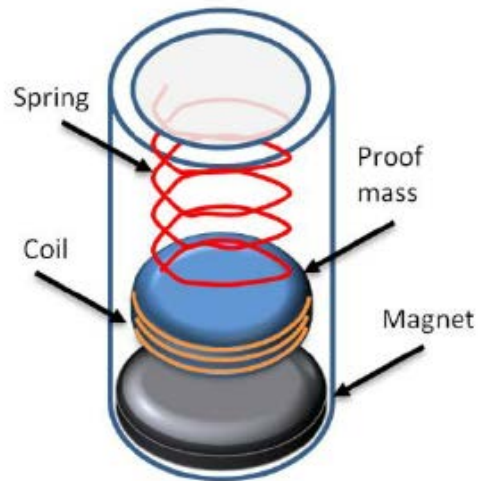
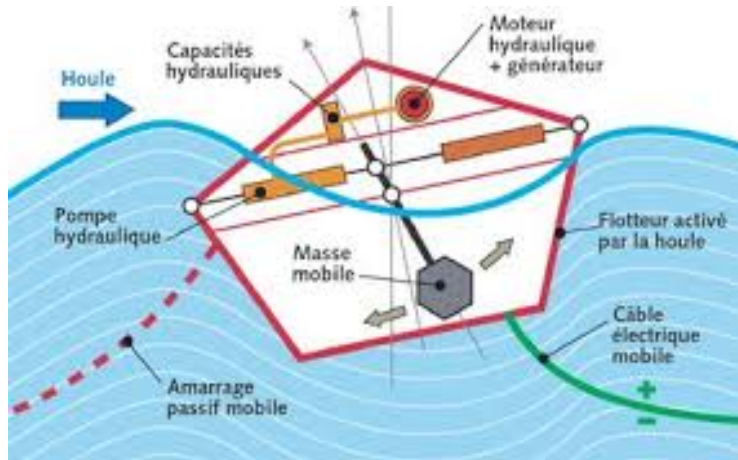


[EPC RFID](#)

Énergie mécanique



Sources classiques d'énergie mécanique



Systemes de récupération

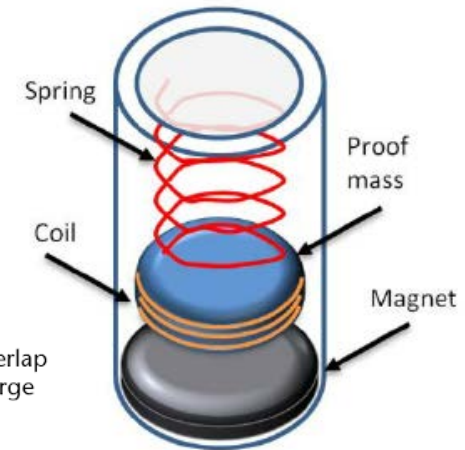
■ Transduction piézoélectrique

- Polarisation électrique sous l'action d'une contrainte mécanique

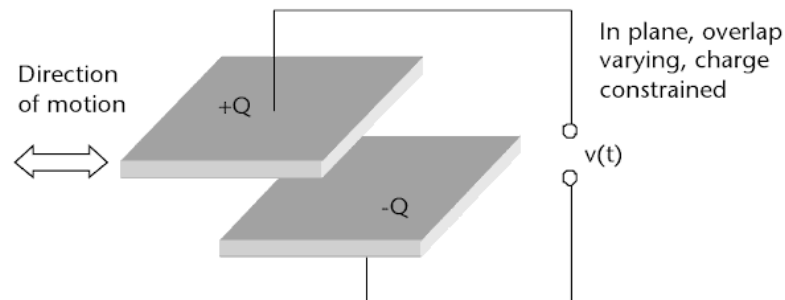


■ Transduction électromagnétique

- Déplacement d'un aimant dans un champ magnétique



■ Générateur électrostatique



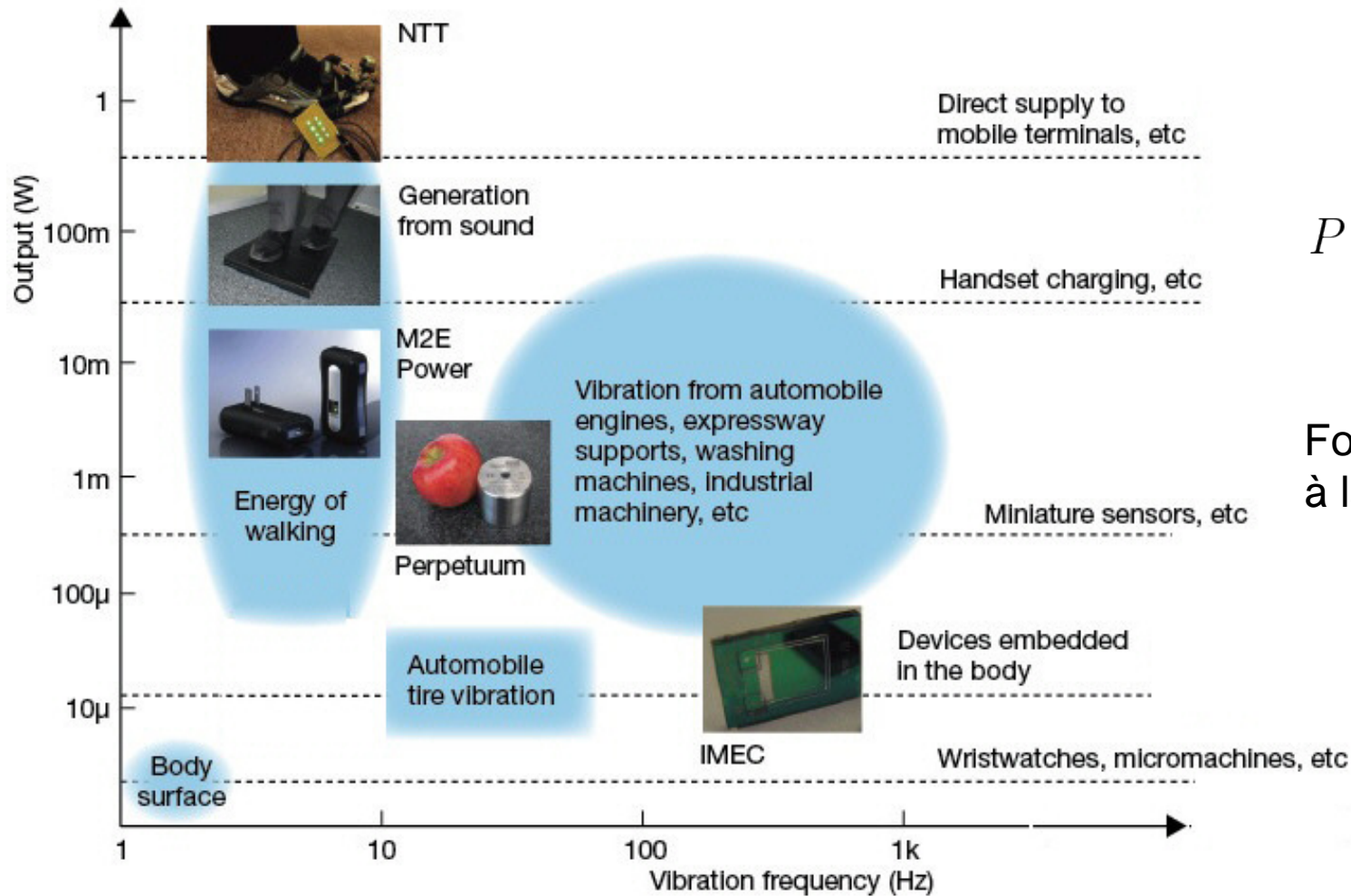
Comparaison des technologies

Table 1.5 Comparisons of different transduction mechanisms of kinetic energy harvesters

Type	Advantages	Disadvantages
Electromagnetic	<ul style="list-style-type: none"> • No external voltage source • No mechanical constraints needed • High output current 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficult to integrate with MEMS fabrication process • Poor performance in micro-scale • Low output voltage
Piezoelectric	<ul style="list-style-type: none"> • Simple structure • No external voltage source • Compatible with MEMS • High output voltage • No mechanical constraints needed 	<ul style="list-style-type: none"> • Thin films have poor coupling • Poor mechanical properties • High output impedance • Charge leakage • Low output current
Electrostatic	<ul style="list-style-type: none"> • Easy to integrate with MEMS fabrication process • High output voltage 	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanical constraints needed • External voltage source or pre-charged electret needed • High output impedance • Low output current
Magnetostrictive	<ul style="list-style-type: none"> • Ultra-high coupling coefficient • High flexibility 	<ul style="list-style-type: none"> • Non-linear effect • May need bias magnets • Difficult to integrate with MEMS fabrication process

[Energy Harvesting Systems](#)

Ressources et récupération



Williams and Yates (1996)

$$P = \frac{m\zeta_e A^2}{4\omega(\zeta_e + \zeta_m)^2}$$

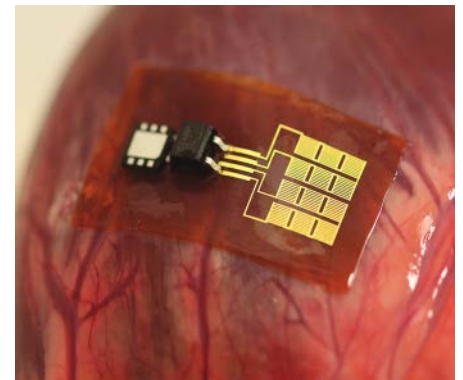
Forte dépendance à la fréquence

Récupération d'énergie pour les systèmes autonomes

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