



# Alimentation électrique et Stockage de l'énergie

Principes et applications

Germain Pham - Reda Mohellebi

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

Avr. 2023



# Plan

## Introduction

### Sources de tension non stabilisées

Piles, Batteries et Accumulateurs

Terminologie

Caractéristiques de base

Batteries primaires et secondaires

Exercice

Convertisseur AC-DC

### Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

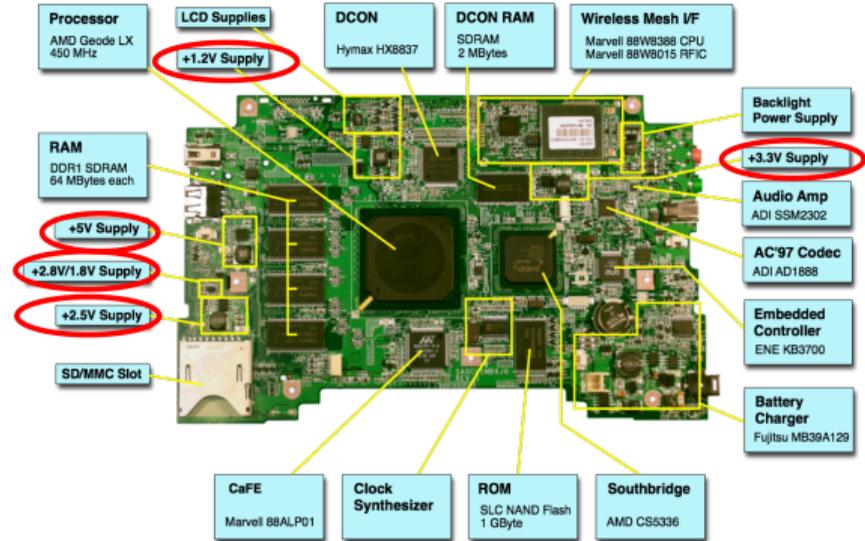
Principe

La diode Zener

Régulateur de Zener

# AC vs DC

- Quasiment tous les dispositifs électroniques sont alimentés en courant continue. . .
- Mais la source de puissance largement disponible est en courant alternatif et à 220 V.



[File:XO Annotated Motherboard.png - Wikimedia Commons](#)

## Différents type de sources de puissance

Courant alternatif (220V@50Hz) :  
Réseau EDF

- Energie nucléaire
- Eolienne
- Hydraulique
- Solaire
- etc



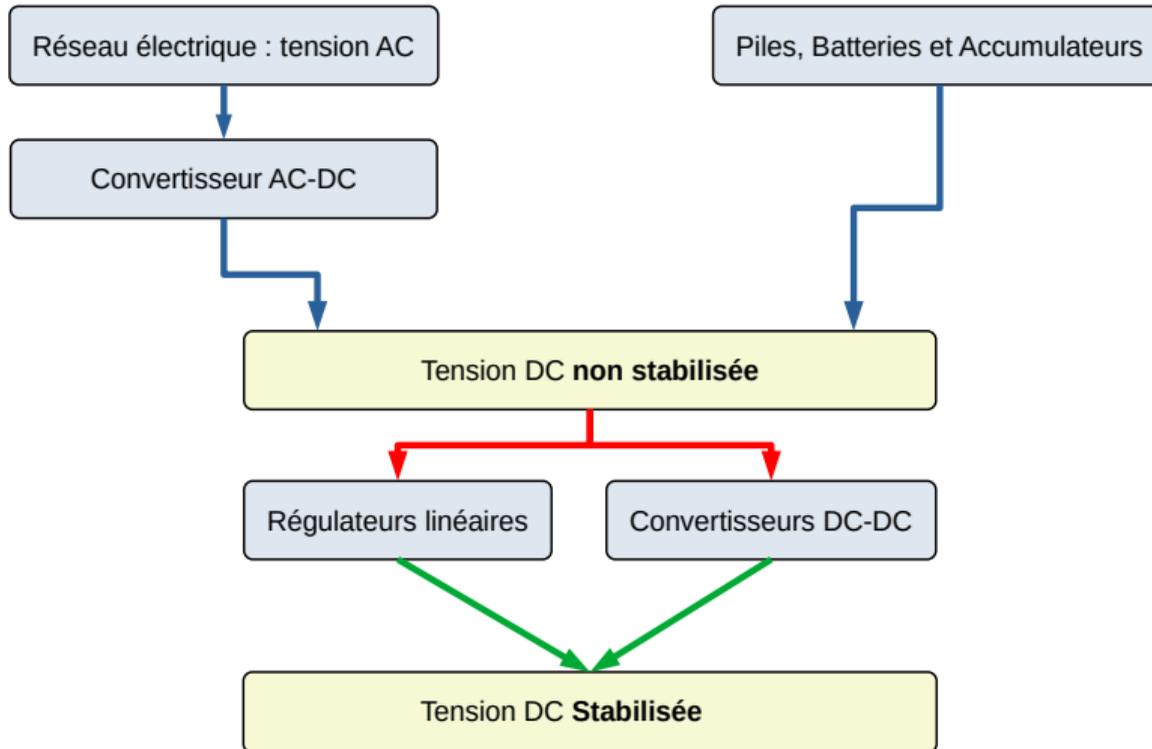
Courant continu : Pile et accumulateur



Source de courant alternatif non stabilisée (EDF) ou nécessitant un remplacement fréquents (Pile et accumulateur)

Objectif : à partir de ces sources (principalement AC) comment obtenir une source à faible tension stabilisée et faible bruit

## Différents type de sources de puissance



# Plan

## Introduction

### Sources de tension non stabilisées

#### Piles, Batteries et Accumulateurs

Terminologie

Caractéristiques de base

Batteries primaires et secondaires

Exercice

#### Convertisseur AC-DC

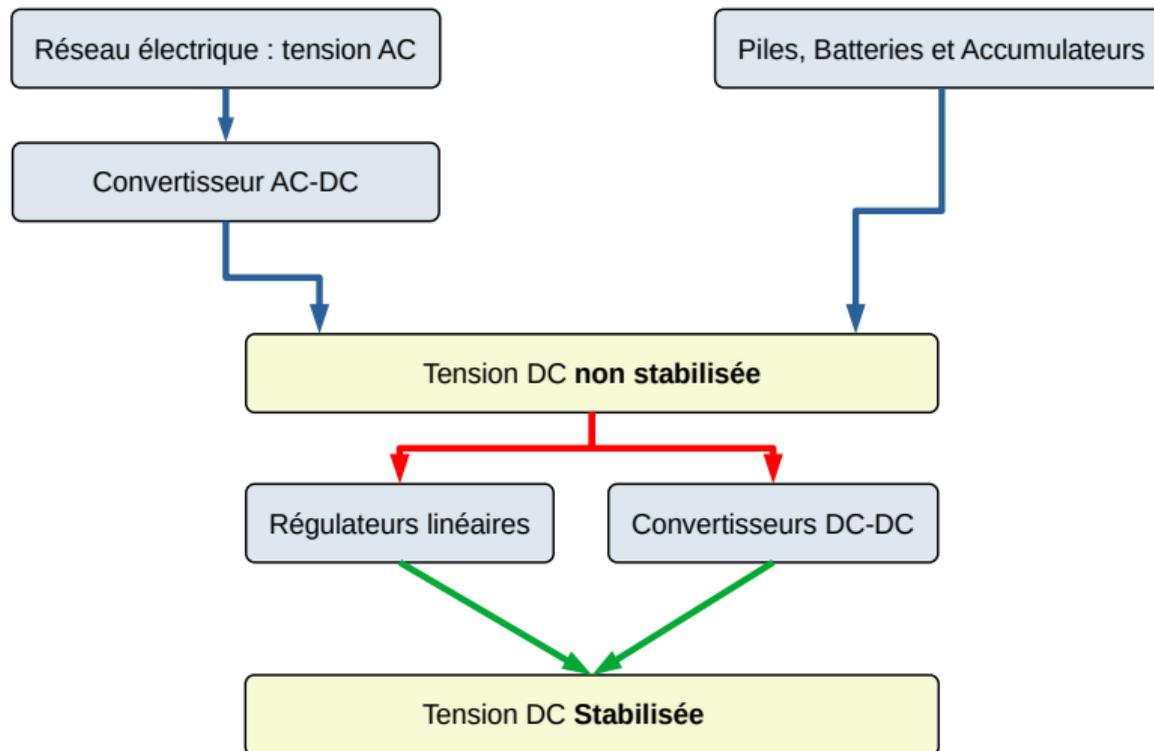
### Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

Principe

La diode Zener

Régulateur de Zener

## Différents type de sources de puissance



# Plan

## Introduction

### Sources de tension non stabilisées

#### Piles, Batteries et Accumulateurs

Terminologie

Caractéristiques de base

Batteries primaires et secondaires

Exercice

#### Convertisseur AC-DC

### Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

Principe

La diode Zener

Régulateur de Zener

# Piles, Batteries et Accumulateurs : c'est pas pareil !?

## ■ Principe

- Réaction chimique entre une anode et une cathode

## ■ Pile

- Non rechargeable ! (réaction irréversible)

## ■ A priori rechargeables

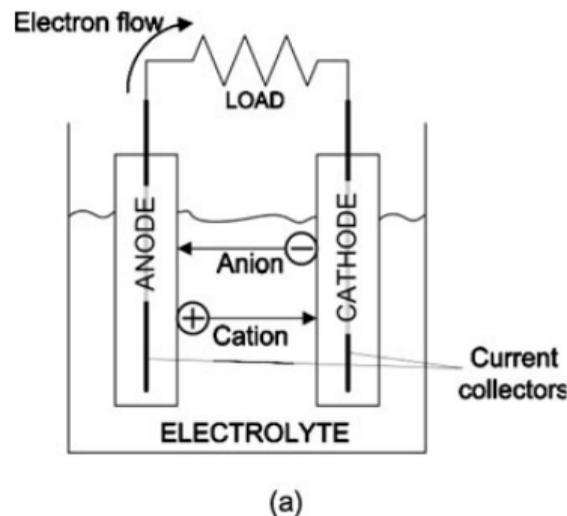
- Accumulateur : désigne plutôt un élément seul
- Batterie : groupe d'éléments assemblés (batterie d'accumulateurs )

## ■ Attention !

- En anglais, le mot « battery » englobe tout
- D'où les concepts de:
  - Primary batteries = single-use or "disposable"
  - Secondary batteries = rechargeable
- (Ces dernières dénominations sont abusivement utilisées par la suite pour des raisons bibliographiques. . . )

## Caractéristiques de base

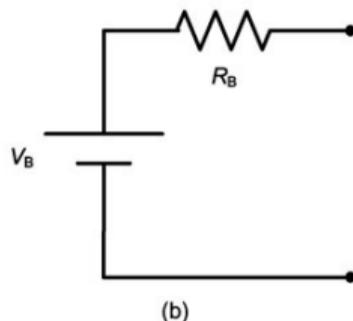
- L'énergie électrique provient d'une réaction chimique.
- Une ou plusieurs unités électrochimiques de base, appelées cellules ; assemblage série/parallèle
- Une cellule
  - une électrode négative (une anode)
  - une électrode positive (une cathode)
  - un conducteur ionique (un électrolyte)



## 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 (principe de base déjà mentionné plus tôt)

- « 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  $A \cdot h$  (pour les BS en particulier) ; sinon exprimé en nombre d'heures pendant lesquelles la batterie peut alimenter une certaine charge (pour les BP)
- Ex : une batterie de 100 mA·h pourra fournir
  - 100 mA pendant 1 h
  - 200 mA pendant 30 min
  - 50 mA pendant 2 h...
- Généralement notée  $C$  (pour « capacity ») mais devrait être notée  $Q$  (pour « quantité de charge »)

### ■ Tension

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

## Caractéristiques de base

### ■ Densité d'énergie (DE)

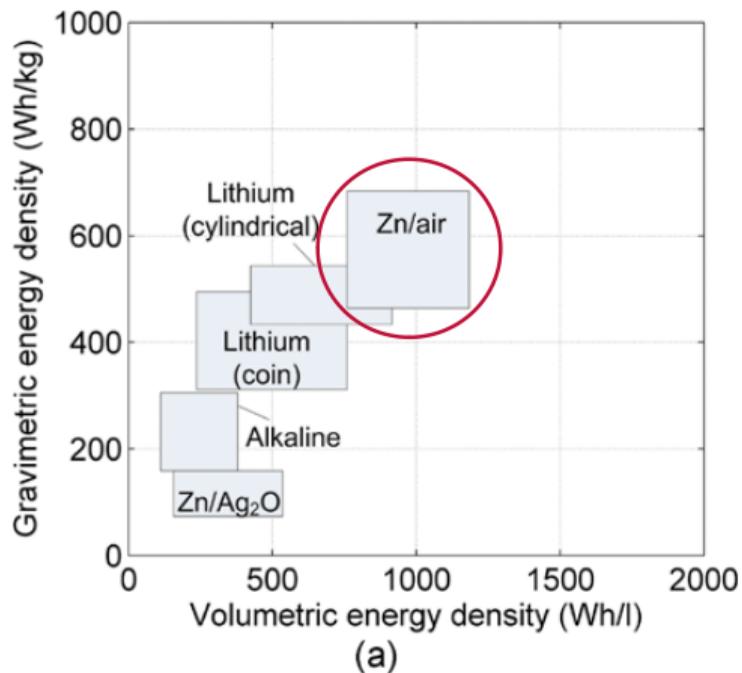
- Énergie / volume ou Énergie / masse
- Dépend
  - des matériaux actifs (chimie) : volume et propriétés chimiques
  - électrolyte, électrodes, séparateur, récipient, bornes : volume / poids
- Certaines batteries sont optimisées pour maximiser la DE

### ■ Densité de puissance

- Puissance / volume ou Puissance / masse
- Dépend
  - impédance interne de la batterie :  
étroitement liée aux électrodes et à la conductivité de l'électrolyte
- Optimisation pour la DP : impédance interne minimale

# Batteries primaires

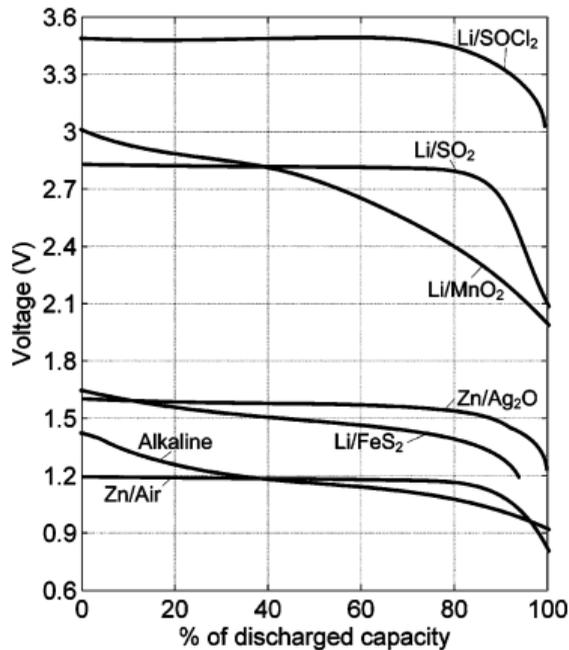
## ■ Caractéristiques



- Densité d'énergie massique en fonction de la densité d'énergie volumétrique
  - Zn/air :  $\approx 600$  Wh/kg; 1000 Wh/l

# Batteries primaires

## ■ Caractéristiques



(b)

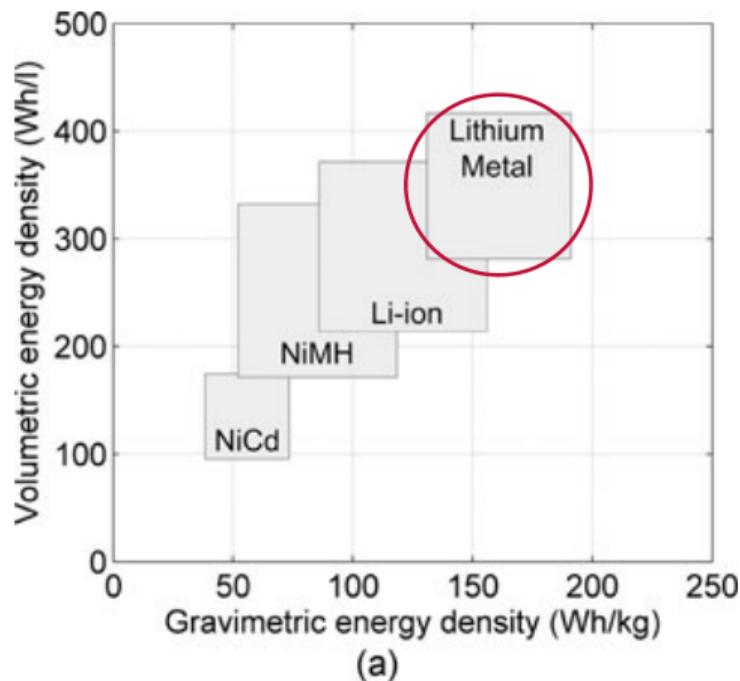
- Profils de décharge de tension à des taux de décharge de 30 h à 100 h

**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 <sup>a</sup>	0 to 50	0 to 55

## Batteries secondaires

### ■ Caractéristiques

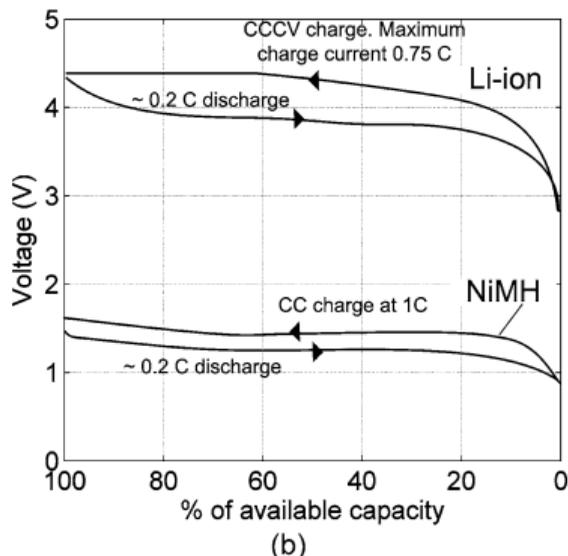


- Densité d'énergie volumétrique en fonction de la densité d'énergie massique
  - Li/metal :  $\approx 170$  Wh/kg; 350 Wh/l

# Batteries secondaires

## ■ Caractéristiques

- Courbes de charge (à 1 C et 0.75 C) et de décharge (à 0.2 C)



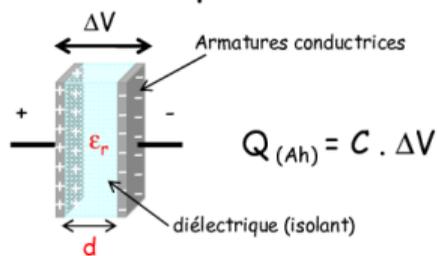
**Table 4.2** Principal characteristics of the three main types of secondary batteries [1–3]

Battery type	Li-ion	Li polymer	NiMH
Internal impedance $Z$ (m $\Omega$ )	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 <sup>a</sup>
Discharge	-20 to 60	-20 to 60	-20 to 60 <sup>a</sup>
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

# Alternative à la « batterie » : le Super-condensateurs

## ■ Constitution de base

### Condensateur classique



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

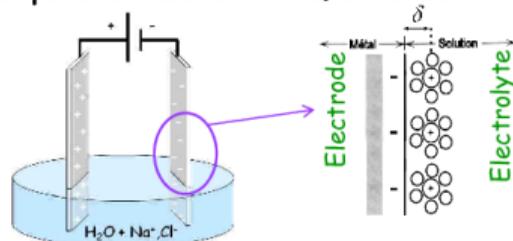
Capacité

Constante diélectrique diélectrique

Surface d'interaction (électrode/électrolyte)

épaisseur diélectrique

### Supercondensateur : Capacité de doublecouche électrochimique



$$C_{dl} \approx 10-20 \mu F/cm^2$$

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

Capacité de Double Couche

Constante diélectrique électrolyte

Surface d'interaction (électrode/électrolyte)

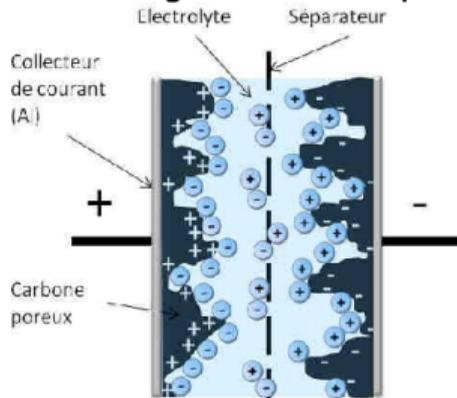
Distance d'approche (qqes Å)

Supercondensateurs : Principes et Evolutions, Patrice SIMON

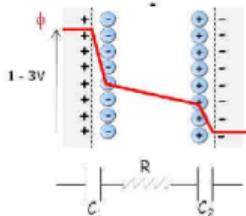
# Super-condensateurs

## ■ Points clés

Stockage électrostatique : pas de réaction d'oxydo-réduction



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



Circuit équivalent simplifié

### Points-clés :

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



Supercondensateurs : Principes et Evolutions, Patrice SIMON ;  
 Comparison of symmetrical double-layer capacitors (low-cost devices) with electrolytic capacitors of the similar canister sizes.

# 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 ●

\* 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

- Piles électrochimiques (BP)
  - Li :  $\approx 500$  Wh/kg

## Applications

Capacité < 100F :

- appels de puissance,
- tampons de puissance

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

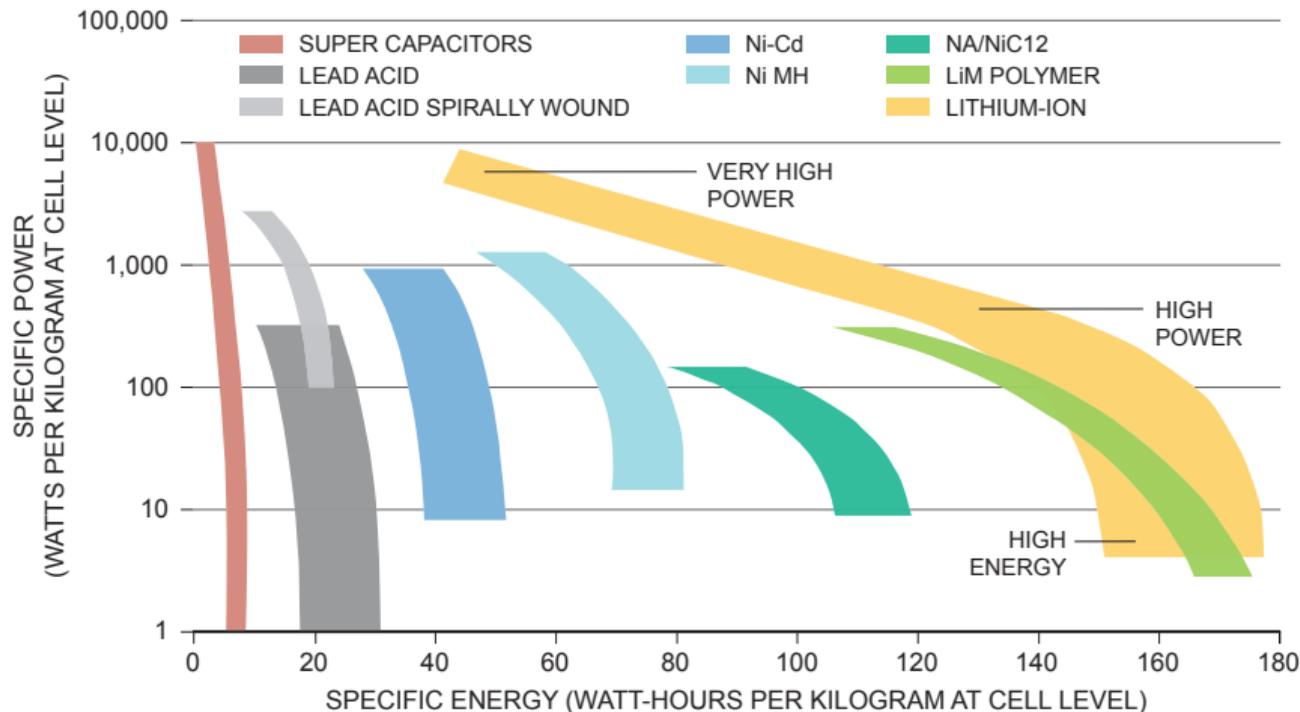


Visseuse électrique



Supercondensateurs : Principes et Evolutions, Patrice SIMON

# Diagramme de Ragone



Ragone Plot of  
Different  
Battery  
Chemistries

Source: Johnson Controls.

Advancing Technology for America's Transportation Future : Chapter 13 - Electric



## Exercice

- Autonomie et temps de charge
  - Exercice 1 : Capsule cardiaque
  - Exercice 2 : Imageur

# Plan

## Introduction

### Sources de tension non stabilisées

Piles, Batteries et Accumulateurs

Terminologie

Caractéristiques de base

Batteries primaires et secondaires

Exercice

### Convertisseur AC-DC

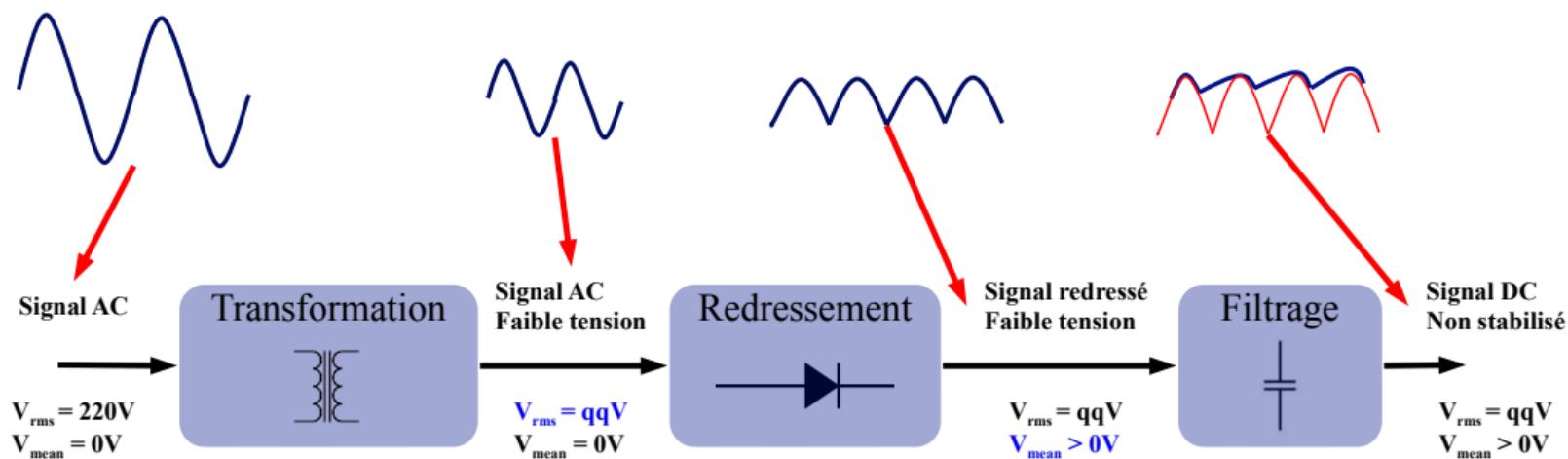
### Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

Principe

La diode Zener

Régulateur de Zener

## Convertisseur AC-DC : source de tension non stabilisée



**Abaisser le niveau de la tension**

**Modifier la tension moyenne**

**Réduire les ondulations autour de la valeur DC souhaitée**

Tension continue avec beaucoup de fluctuations autour de la valeur désirée



Tension non stabilisée

# Convertisseur AC-DC : 1-transformateur électrique

## Transformation idéal :

- La puissance du signal au primaire  $U_1 I_1$  est transférée au secondaire  $U_2 I_2$  grâce au flux magnétique induit dans le noyau
- Le flux magnétique est donnée par :

$$\varphi = N_1 I_1 = N_2 I_2$$

(1)

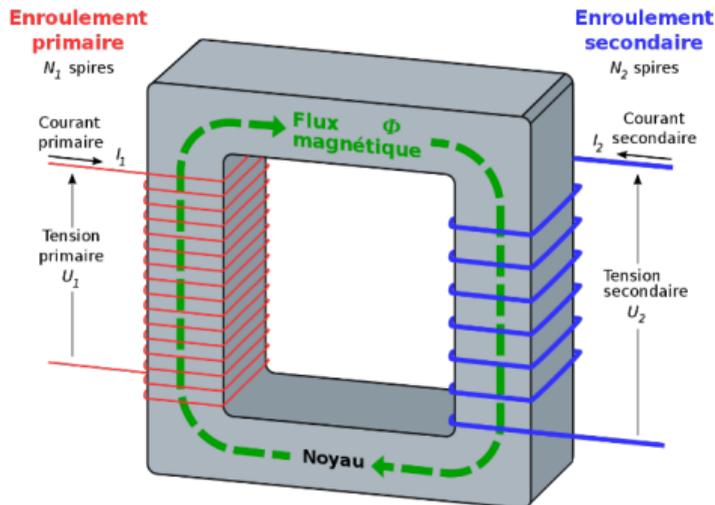
$$\Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = m = \frac{U_2}{U_1}$$

(2)

$m$  est le rapport de transformation

## Transformation réel : imperfections

- Pertes par effet joule dans les conducteurs
- Pertes dans le noyau magnétique par courant de Foucault et par hystérésis
- perméabilité finie du circuit magnétique
- couplage magnétique imparfait des enroulements

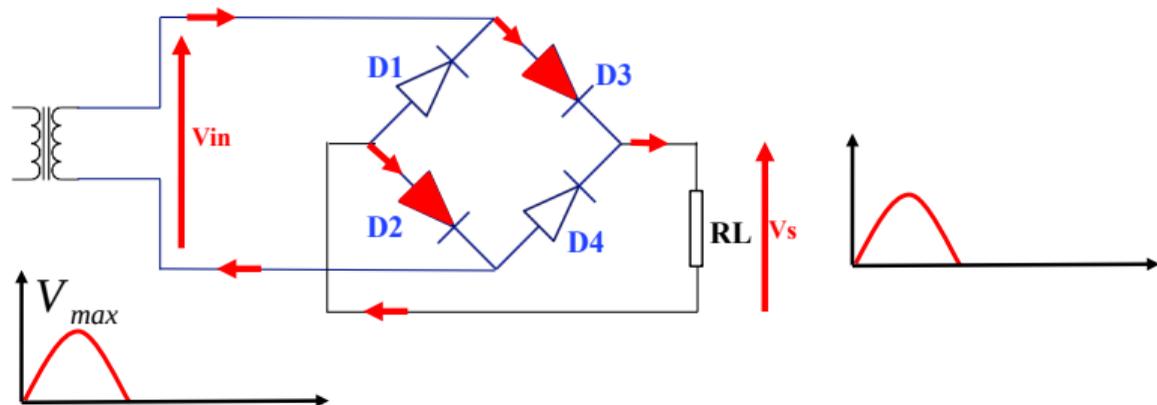


## Convertisseur AC-DC : 2-redressement

Redressement par un pont de Graetz :

$$0 < t < \frac{T}{2} : V_{in} > 0 \quad (3)$$

$$\frac{T}{2} < t < T : V_{in} > 0 \quad (4)$$



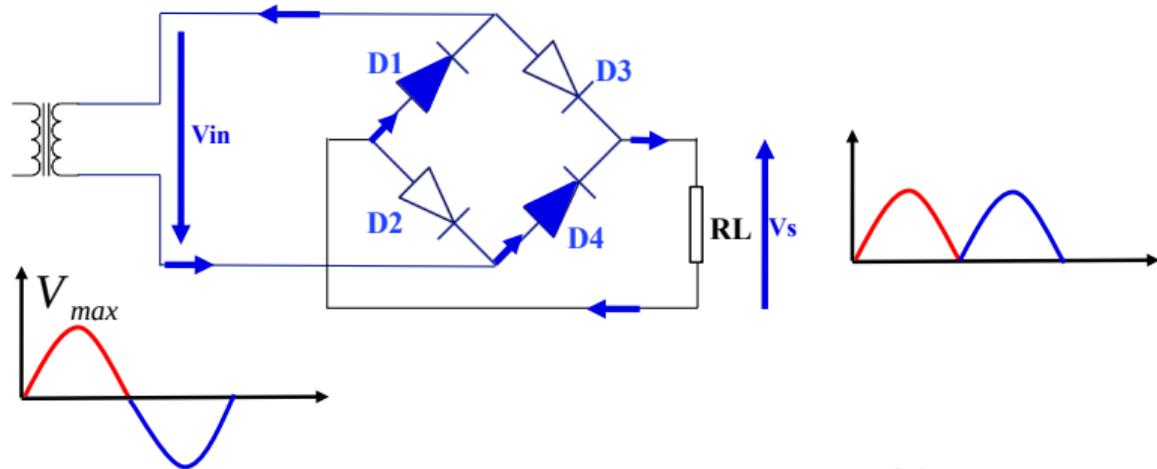
$$\text{Tension moyenne : } \widehat{V}_{in} = 0 \implies \widehat{V}_s = 2 \frac{V_{max}}{\pi} \quad (5)$$

## Convertisseur AC-DC : 2-redressement

Redressement par un pont de Graetz :

$$0 < t < \frac{T}{2} : V_{in} > 0 \quad (3)$$

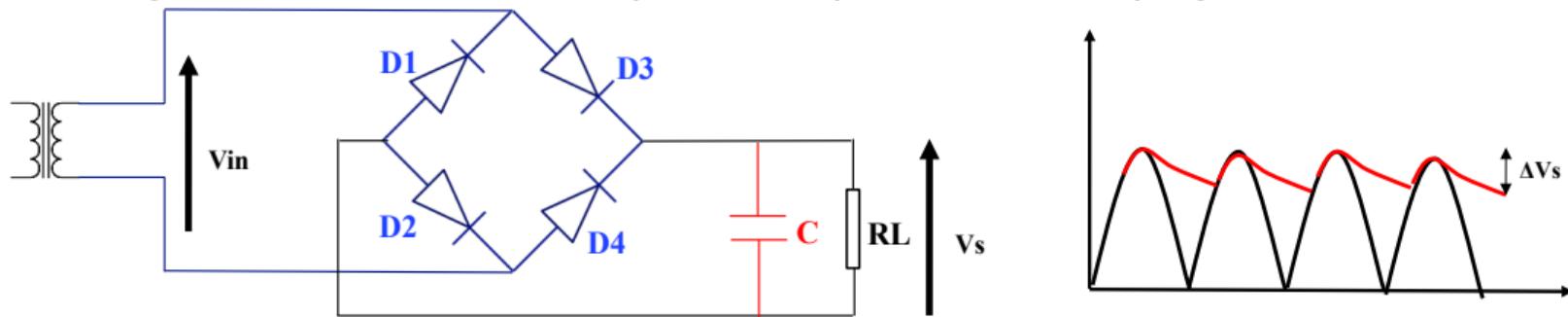
$$\frac{T}{2} < t < T : V_{in} < 0 \quad (4)$$



$$\text{Tension moyenne : } \widehat{V}_{in} = 0 \implies \widehat{V}_s = 2 \frac{V_{max}}{\pi} \quad (5)$$

## Convertisseur AC-DC : 3-filtrage

Lissage de la tension de sortie par une capacité de découplage :



$V_s$  croissant  $\rightarrow$  le condensateur se charge  
 $V_s$  décroissant  $\rightarrow$  le condensateur se décharge



la vitesse de charge/décharge du condensateur  
dépend de la capacité  $C$  ( $C$  élevée, décharge lente)

Ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta V_s = \frac{I_{load}}{C \times f} \text{ ici : } f = 50 \text{ Hz}$$

# Plan

## Introduction

## Sources de tension non stabilisées

### Piles, Batteries et Accumulateurs

Terminologie

Caractéristiques de base

Batteries primaires et secondaires

Exercice

### Convertisseur AC-DC

## Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

Principe

La diode Zener

Régulateur de Zener

# Plan

## Introduction

## Sources de tension non stabilisées

### Piles, Batteries et Accumulateurs

Terminologie

Caractéristiques de base

Batteries primaires et secondaires

Exercice

### Convertisseur AC-DC

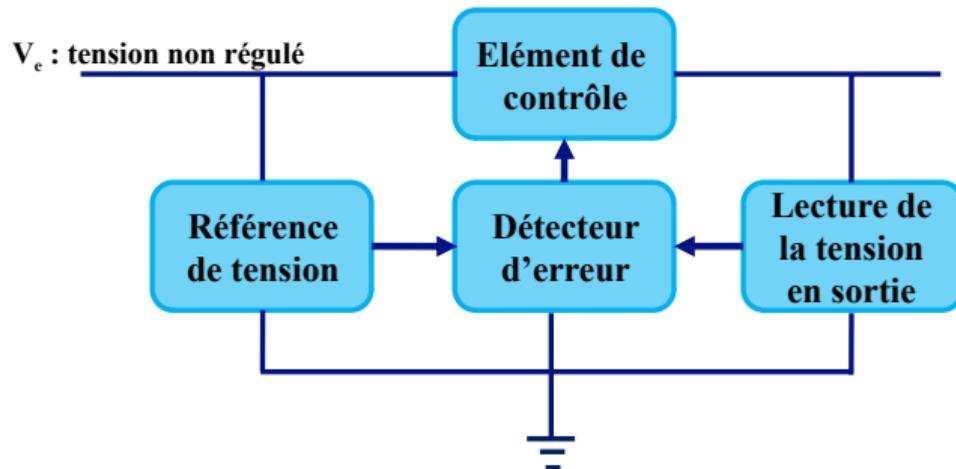
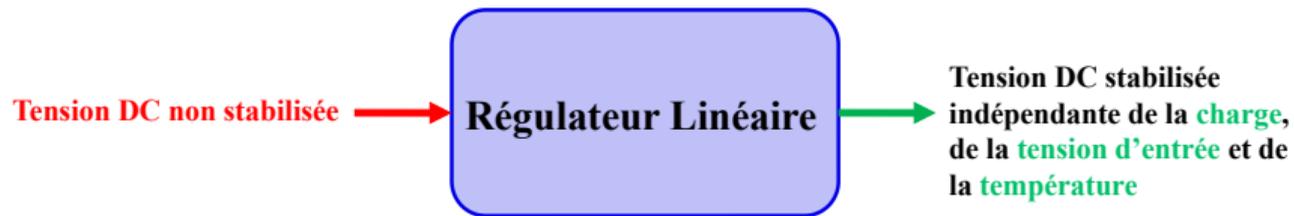
## Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

### Principe

La diode Zener

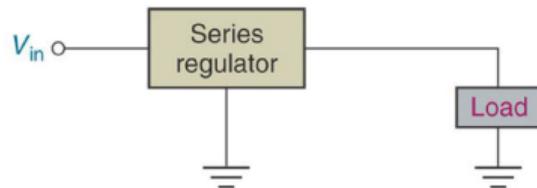
Régulateur de Zener

## Régulateur linéaire: Principe

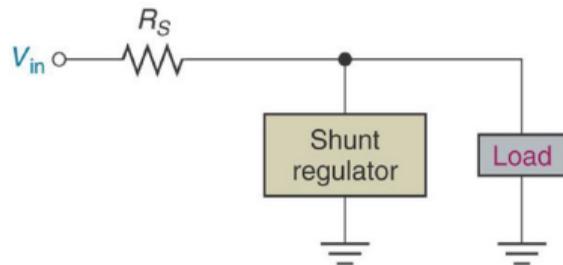


## Régulateur linéaire: Principe

### Régulateur série



### Régulateur parallèle



### Les principales caractéristique d'un régulateur

- Tension de sortie (et sa précision)
- Courant de sortie maximal
- Chute de tension (Dropout Voltage)
- Régulation de tension secteur (Line regulation)
- Résistance de sortie
- Vitesse de réponse

# Plan

## Introduction

## Sources de tension non stabilisées

### Piles, Batteries et Accumulateurs

Terminologie

Caractéristiques de base

Batteries primaires et secondaires

Exercice

### Convertisseur AC-DC

## Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

Principe

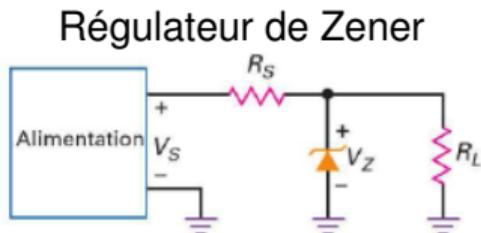
**La diode Zener**

Régulateur de Zener

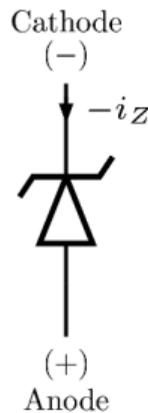
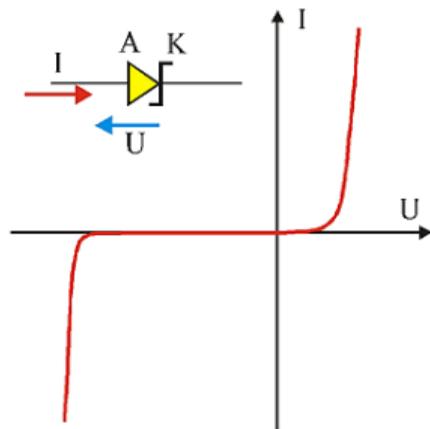
# Régulateur linéaire

La diode Zener :

- En polarisation directe elle fonctionne comme diode normale
- En polarisation inverse : à partir de la tension Zener, la diode devient passante



Fonctionnement ?



# Plan

## Introduction

## Sources de tension non stabilisées

### Piles, Batteries et Accumulateurs

Terminologie

Caractéristiques de base

Batteries primaires et secondaires

Exercice

### Convertisseur AC-DC

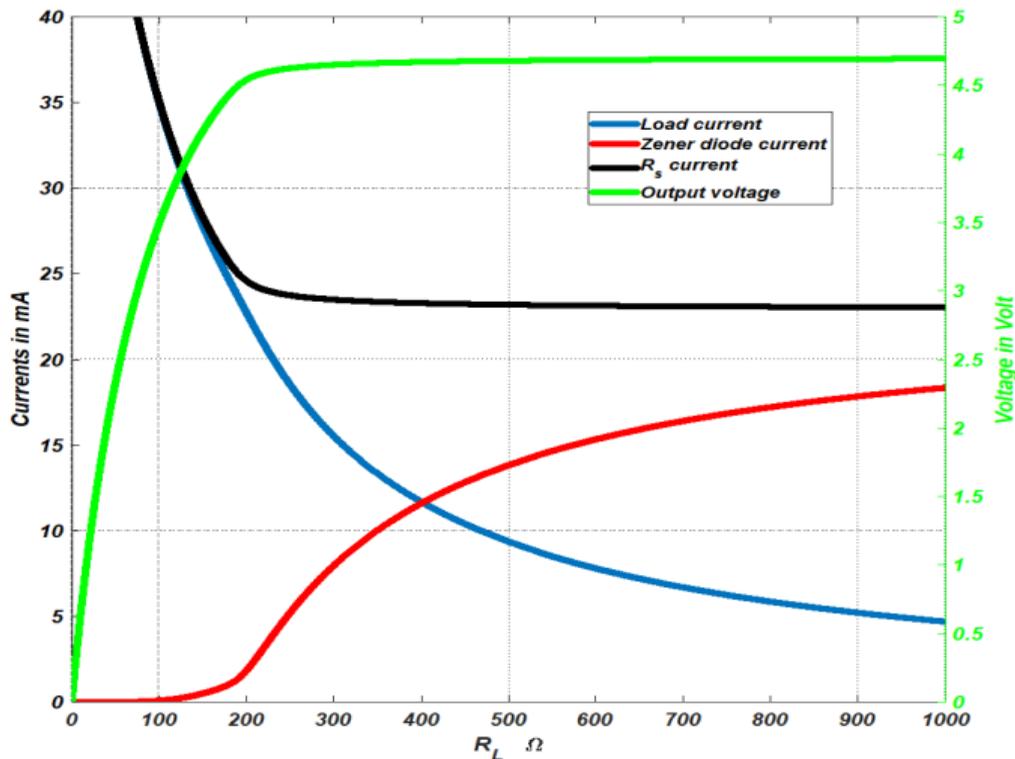
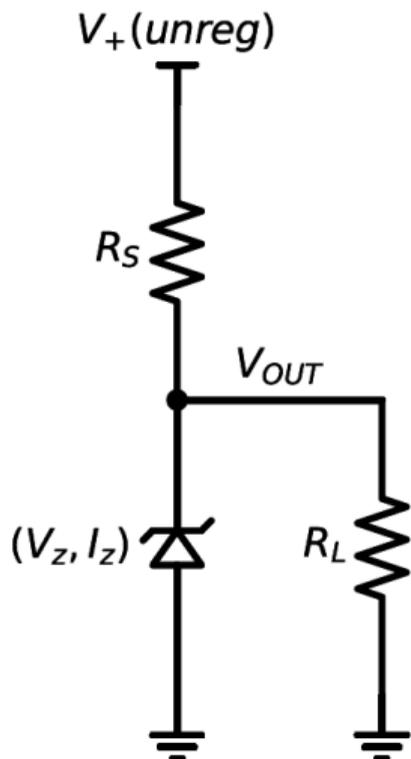
## Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

Principe

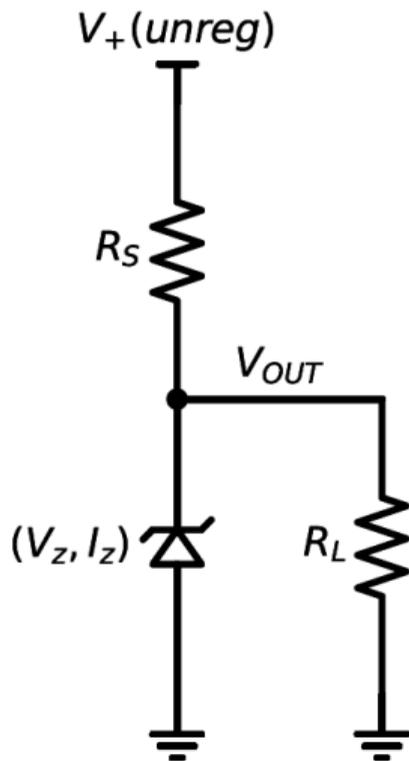
La diode Zener

Régulateur de Zener

# Régulateur linéaire (1)



## Régulateur linéaire (1)



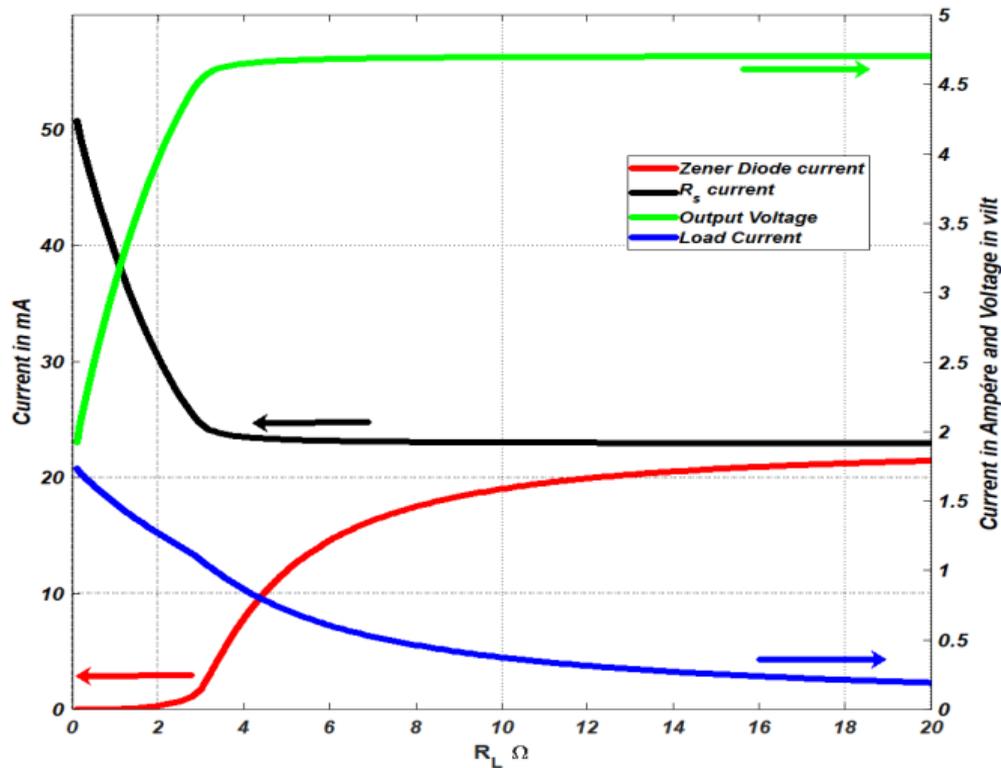
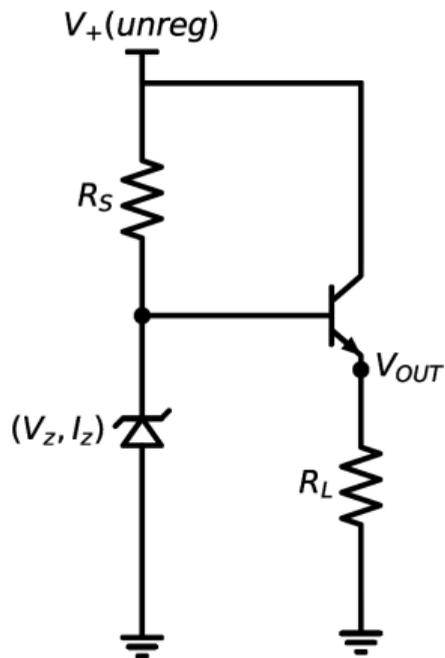
### Avantage:

- Architecture simple

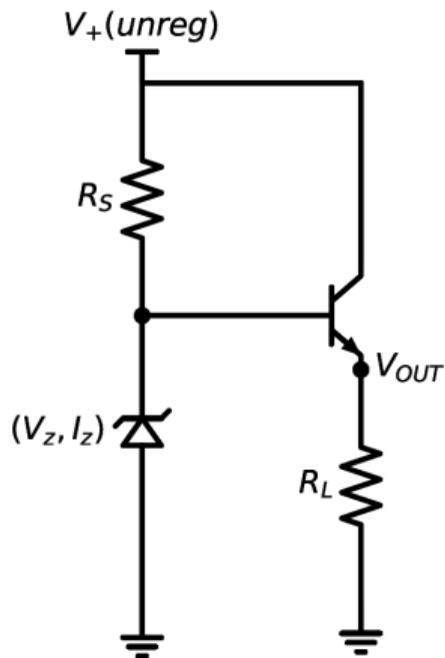
### Inconvénients:

- Contrôle difficile (voire impossible) de la tension d'entrée
- La tension Zener (donc  $V_{out}$ ) est dépendante de la température et du courant de Zener (qui change quand la tension d'entrée ou la charge changent)
- La consommation est maximale dans les conditions les plus favorable (i.e.  $R_L = \infty$ )
- Courant de sortie élevé  $\rightarrow$  Diode avec un courant Zener élevé  $\rightarrow$  Difficile à fabriquer

## Régulateur linéaire (2)



## Régulateur linéaire (2)



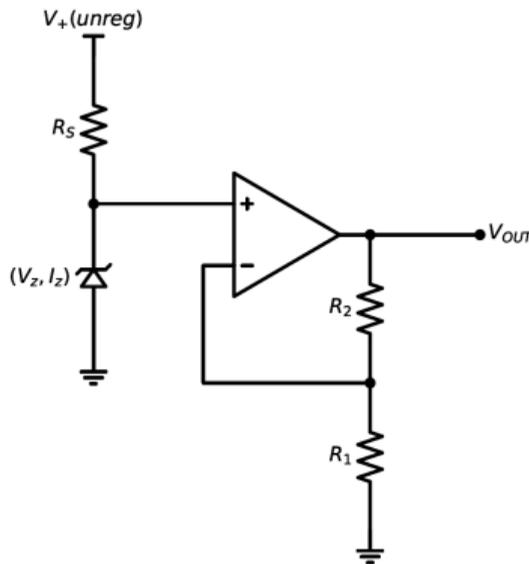
### Améliorations:

- Augmentation du courant de sortie
- Fonctionnement avec un faible courant de Zener

### Inconvénients:

- La tension de sortie n'est toujours pas ajustable
- La qualité de tension sortie est faible car  $V_{be}$  est sensible au courant de sortie
- Aucun contrôle des fluctuations (à 50 Hz) de la tension d'entrée

## Régulateur linéaire (3)



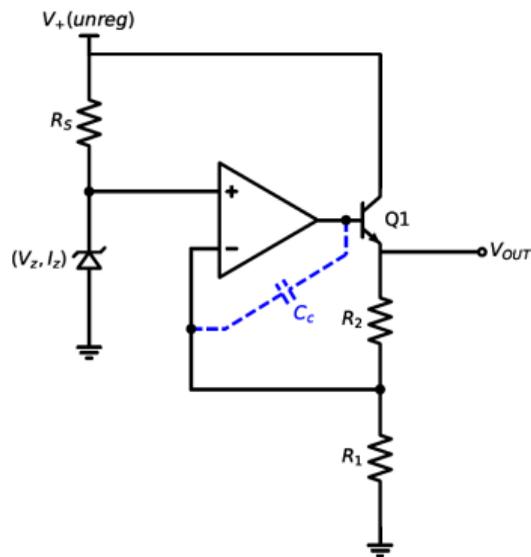
### Améliorations:

- Isolation entrée / sortie
- La tension de sortie est ajustable :  $V_{out} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) V_z$

### Inconvénients:

- Le courant de sortie est faible (courant de sortie de Opamp)
- Nouveau problème : quid de la stabilité de l'opamp bouclé ?
- Aucun contrôle des fluctuations (à 50 Hz) de la tension d'entrée

## Régulateur linéaire (4)



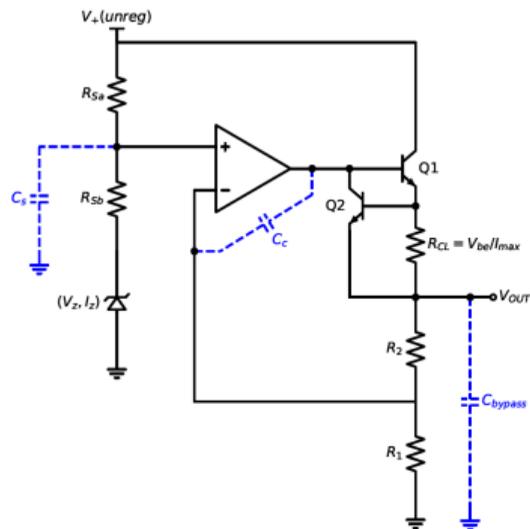
### Améliorations:

- Isolation entrée / sortie
- La tension de sortie est ajustable :  $V_{out} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) V_z$
- Augmentation du courant de sortie
- Amélioration de la stabilité par le condensateur de contre-réaction  $C_c$
- Bonne qualité de la tension de sortie (indépendance par rapport  $V_{be}$ )

### Inconvénients:

- Aucune limitation du courant de sortie
- Aucun contrôle des fluctuations (à 50 Hz) de la tension d'entrée

## Régulateur linéaire (5) Version finale



### Améliorations:

- Protection en sortie : limitation du courant de sortie
- Filtrage des fluctuations de la tension d'entrée

### Inconvénients:

- Savoir l'utiliser !!!!

## Régulateur linéaire (5) Version finale

