



IP PARIS



Alimentation électrique et Stockage de l'énergie

Principes et applications

Germain Pham - Reda Mohellebi

dpham@telecom-paris.fr

Mai. 2024



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

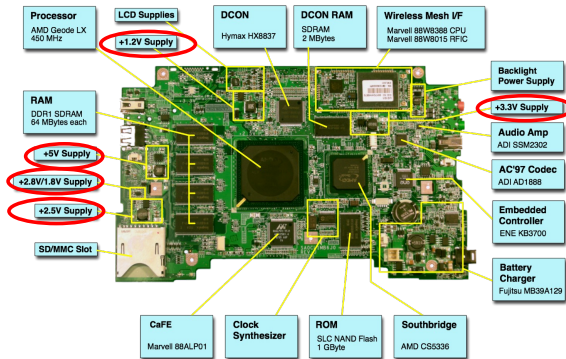
- Principe

- 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



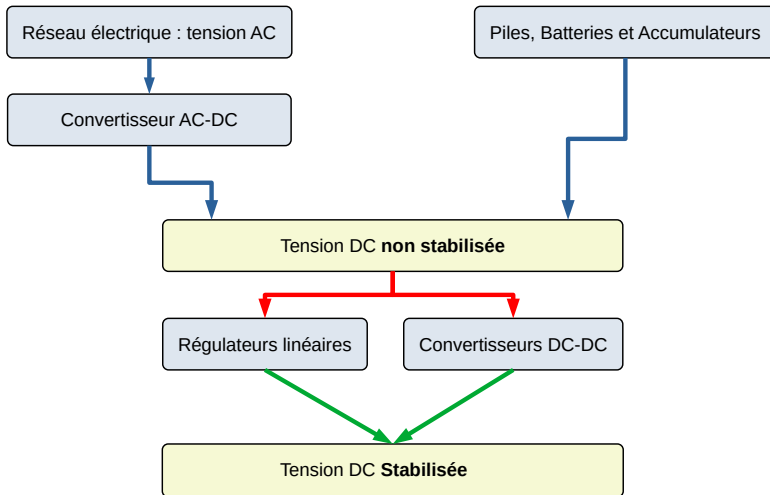
Courant continu : Pile et accumulateur



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

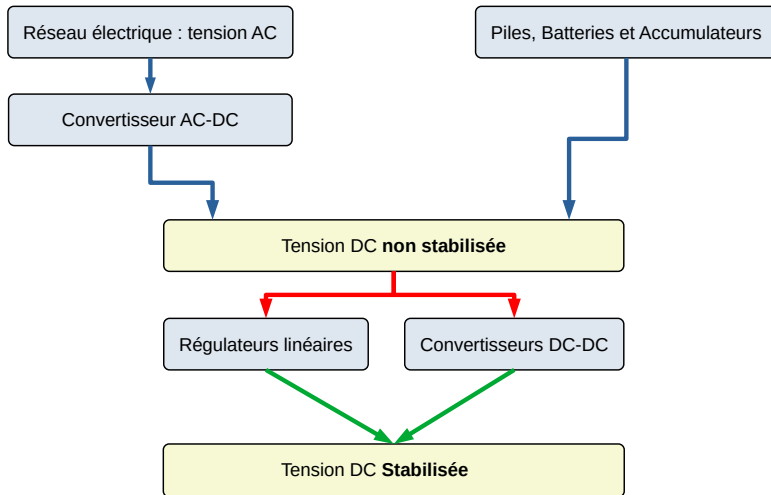
Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

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

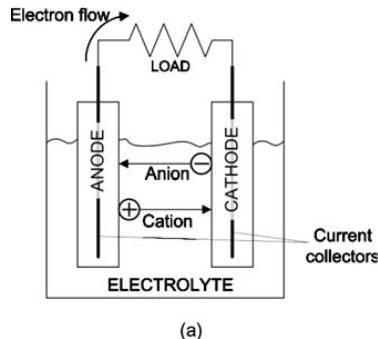
- Accumulateur : désigne plutôt un élément seul
- Batterie : groupe d'éléments assemblés (batterie d'accumulateurs)

■ 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

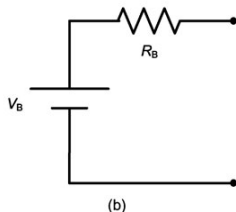
- L'énergie électrique provient d'une réaction chimique.
- Une ou plusieurs unités électrochimiques de base, appelées cellules ; assemblage série/parallèle
- Une cellule
 - une électrode négative (une anode)
 - une électrode positive (une cathode)
 - un conducteur ionique (un électrolyte)



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 $100 \text{ mA} \cdot h$ pourra fournir
 - 100 mA pendant 1 h
 - 200 mA pendant 30 min
 - 50 mA pendant $2 \text{ h} \dots$
- 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)

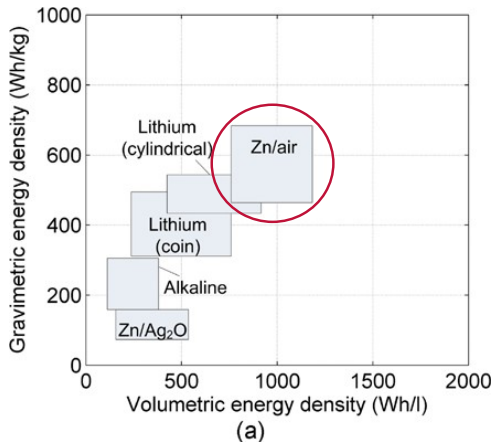
- Énergie / volume ou Énergie / masse
- Dépend
 - des matériaux actifs (chimie) : volume et propriétés chimiques
 - électrolyte, électrodes, séparateur, récipient, bornes : volume / poids
- Certaines batteries sont optimisées pour maximiser la DE

■ 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

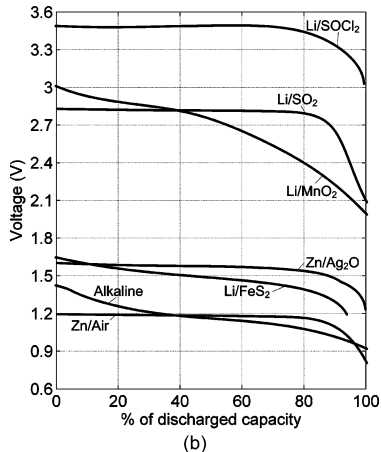
■ Caractéristiques



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

Batteries primaires

■ Caractéristiques



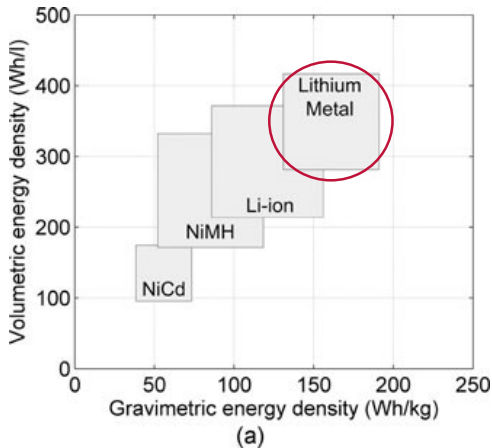
- Profils de décharge de tension à des taux de décharge de 30 h à 100 h

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 massique
 - Li/metal : ≈ 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)

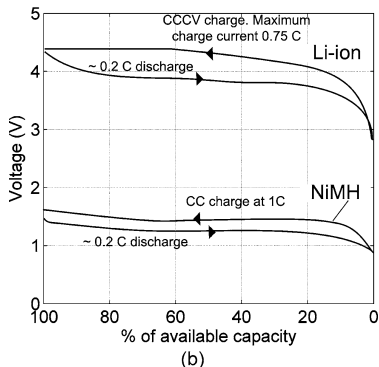


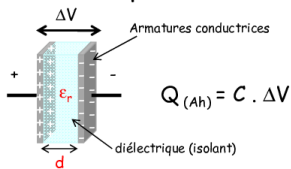
Table 4.2 Principal characteristics of the three main types of secondary batteries [1–3]

Battery type	Li-ion	Li polymer	NiMH
Internal impedance Z (m 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

Alternative à la « batterie » : le Super-condensateurs

■ Constitution de base

Condensateur classique



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

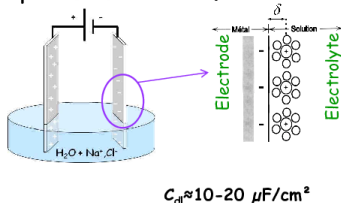
Capacité

Constante diélectrique diélectrique

Surface d'interaction (électrode/électrolyte)

épaisseur diélectrique

Supercondensateur : Capacité de doublecouche électrochimique



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

Capacité de Double Couche

Constante diélectrique électrolyte

Distance d'approche (qqes Å)

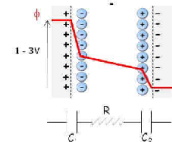
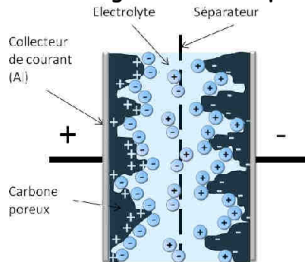
Surface d'interaction (électrode/électrolyte)

Supercondensateurs : Principes et Evolutions, Patrice SIMON

Super-condensateurs

■ Points clés

Stockage électrostatique : pas de réaction d'oxydo-réduction

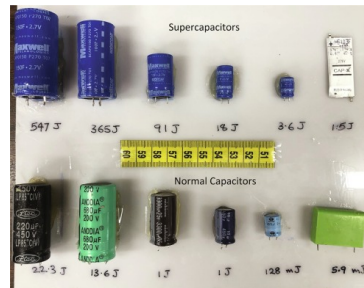


Circuit équivalent simplifié

- ΔV 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 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°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 : ≈ 500 Wh/kg

Applications

Capacité < 100F :

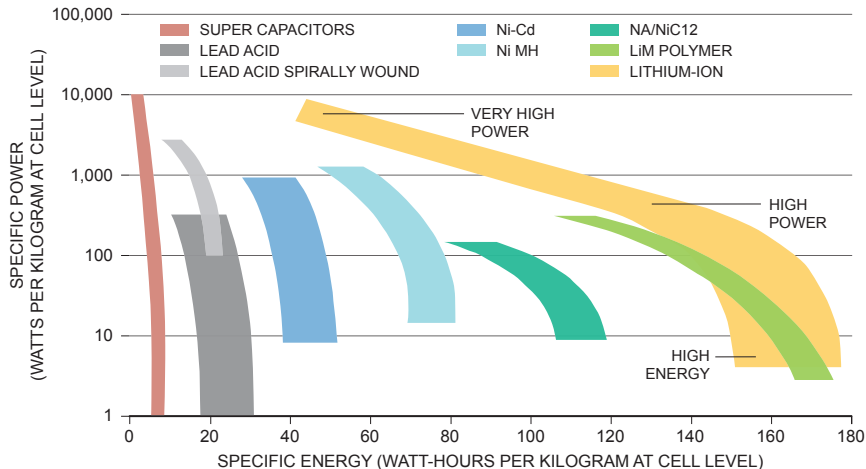
- appels de puissance,
- tampons de puissance

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



Supercondensateurs : Principes et Evolutions, Patrice SIMON

Diagramme de Ragone



Source: Johnson Controls.

Ragone Plot of
Different
Battery
Chemistries

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

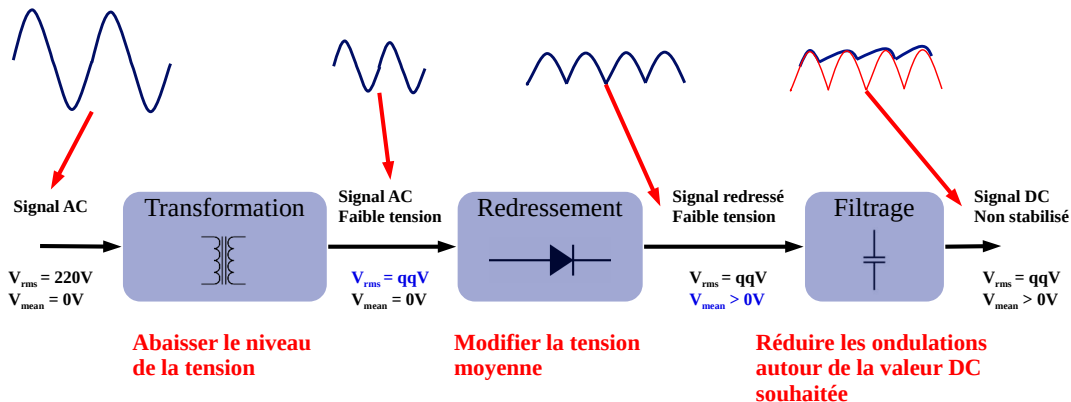
Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

Principe

La diode Zener

Régulateur de Zener

Convertisseur AC-DC : source de tension non stabilisée



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)

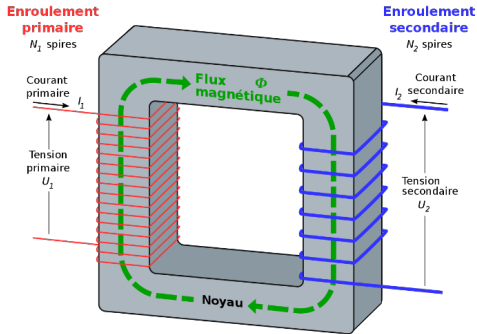
$$\Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = m = \frac{U_2}{U_1}$$

(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

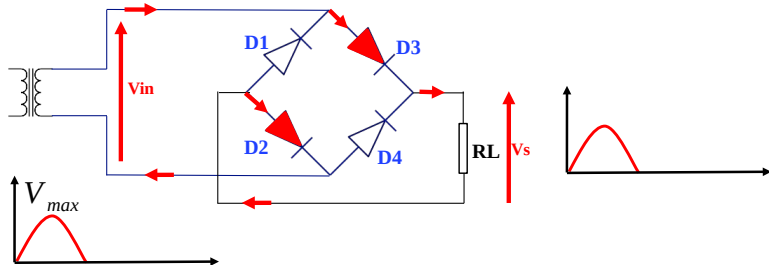


Convertisseur AC-DC : 2-redressement

Redressement par un pont de Graetz :

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

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



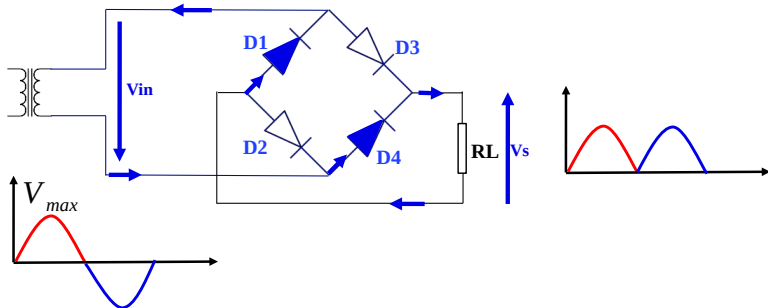
$$\text{Tension moyenne : } \widehat{V}_{in} = 0 \Rightarrow \widehat{V}_s = 2 \frac{V_{max}}{\pi} \quad (5)$$

Convertisseur AC-DC : 2-redressement

Redressement par un pont de Graetz :

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

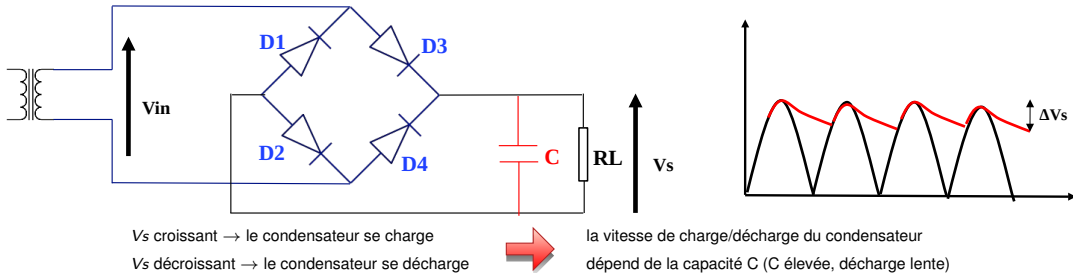
$$\frac{T}{2} < t < T : V_{in} < 0 \quad (4)$$



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

Convertisseur AC-DC : 3-filtrage

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



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

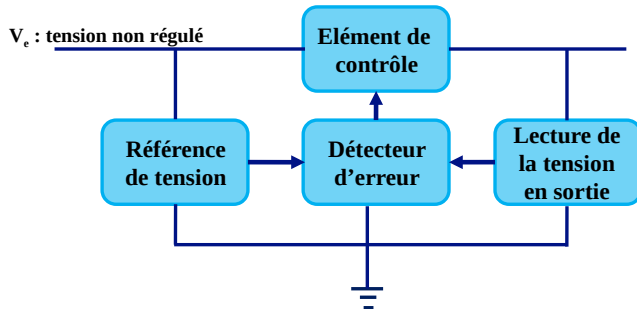
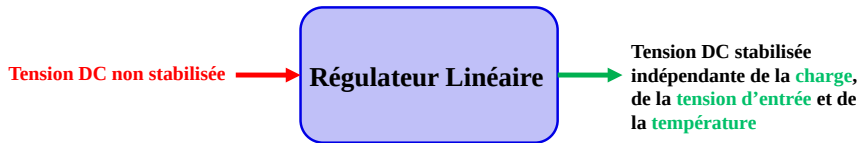
Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

Principe

La diode Zener

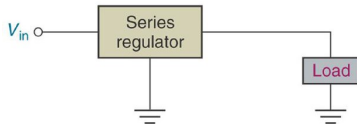
Régulateur de Zener

Régulateur linéaire: Principe

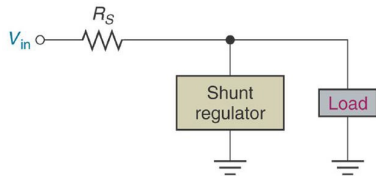


Régulateur linéaire: Principe

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

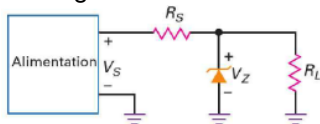
Régulateur de Zener

Régulateur linéaire

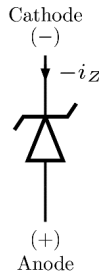
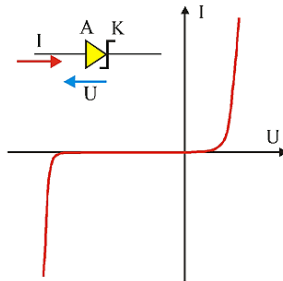
La diode Zener :

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

Régulateur de Zener



Fonctionnement ?



Plan

Introduction

Sources de tension non stabilisées

Piles, Batteries et Accumulateurs

Terminologie

Caractéristiques de base

Batteries primaires et secondaires

Exercice

Convertisseur AC-DC

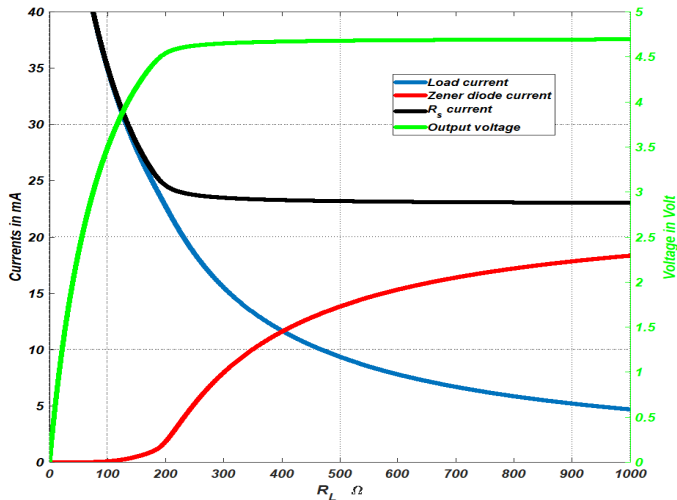
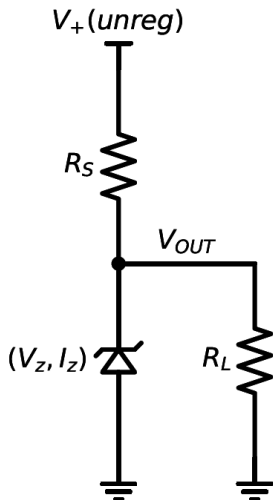
Sources de tension stabilisées : Régulation linéaire

Principe

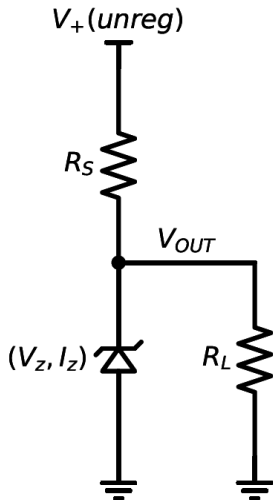
La diode Zener

Régulateur de Zener

Régulateur linéaire (1)



Régulateur linéaire (1)



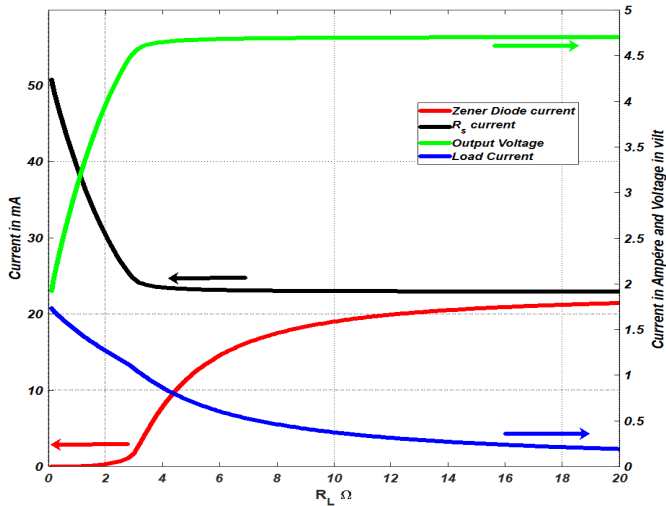
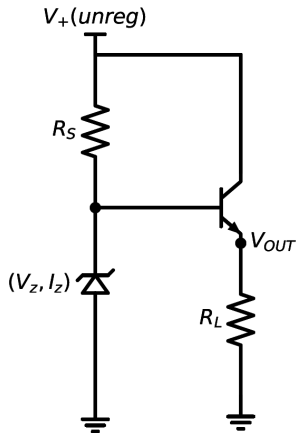
Avantage:

- Architecture simple

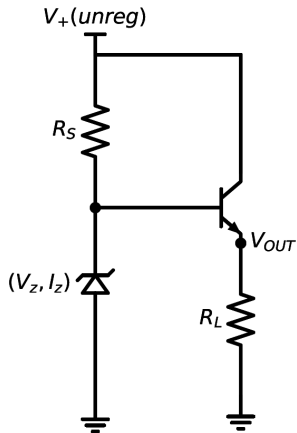
Inconvénients:

- 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 → Diode avec un courant Zener élevé → Difficile à fabriquer

Régulateur linéaire (2)



Régulateur linéaire (2)



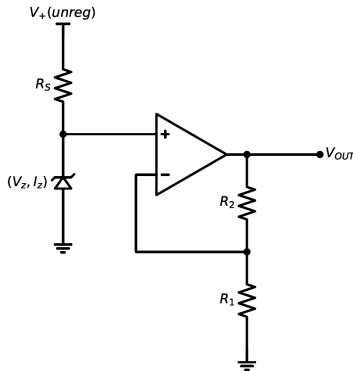
Améliorations:

- 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)



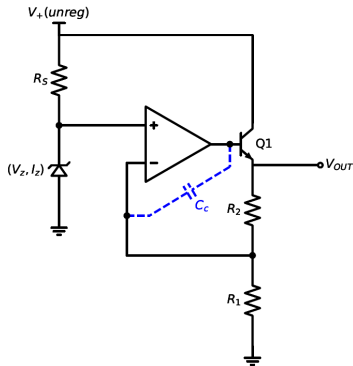
Améliorations:

- 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

Régleur linéaire (4)



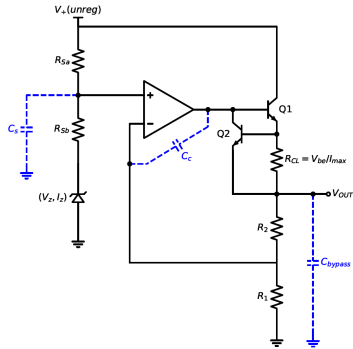
Améliorations:

- 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



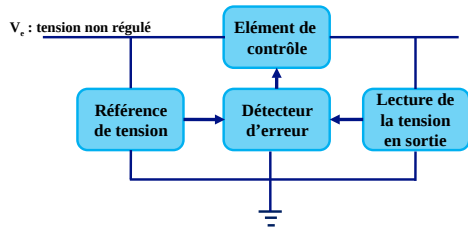
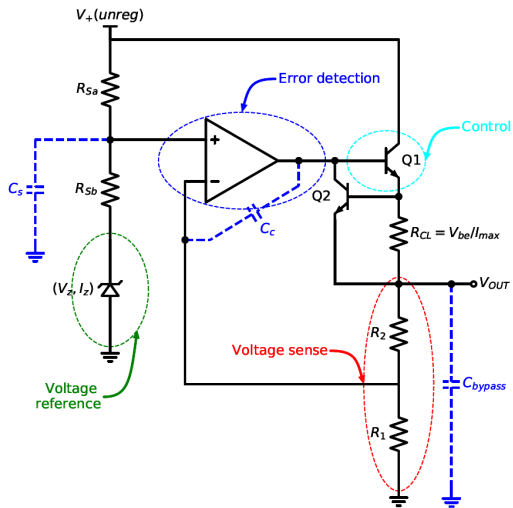
Améliorations:

- 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



Régulateur linéaire: Comment dimensionner un régulateur

Exercice:

On souhaite alimenter via une prise USB un circuit de capteur cardiaque qui nécessite 2 tensions pour un fonctionnement optimal, $V_{DD} = 4.2\text{ V}$ et $V_{CM} = 2\text{ V}$.

On utilise le régulateur MAX1857 qui a une tension de Dropout de 120 mV . La résistance R_2 est fixe. La résistance R_1 est composée d'une résistance variable de RV en série avec une résistance de valeur fixe R_f .

1. Ce régulateur a un temps de réponse de 1 ms . Est-ce que c'est problématique pour cette application?
2. Quelle est la tension d'entrée minimale? en vous basant sur le datasheet, choisir une valeur pour R_2 ?
3. Pour $V_i = 5\text{ V}$ (port USB) calculer la valeur de la résistance R_{f1} et $RV1$ qui permet de garantir une variation de V_{DD} entre 3.715 V et 4.715 V ?
4. Pour $V_i = 5\text{ V}$ (port USB) calculer la valeur de la résistance R_{f2} et $RV2$ qui permet de garantir une variation de V_{CM} entre 1.6 V et 2.6 V ?

