

# Convertisseurs électroniques de puissance

Alejandro Ospina Vargas– Enseignant-Chercheur UTC

Université de Technologie de Compiègne

## 1 Introduction

## 2 Interrupteurs

- Caractéristique V-I
  - Caractéristique statique
  - Caractéristique dynamique
- Types
  - Diode
  - Thyristor
  - GTO
  - BJT
  - MOSFET
  - IGBT
  - Critères de choix

## 3 Structures des convertisseurs

- Convertisseur DC-DC
- Convertisseur AC-DC

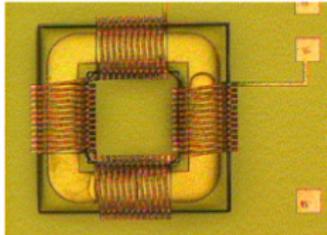
- 1 Introduction
- 2 Interrupteurs
  - Caractéristique V-I
    - Caractéristique statique
    - Caractéristique dynamique
  - Types
    - Diode
    - Thyristor
    - GTO
    - BJT
    - MOSFET
    - IGBT
    - Critères de choix
- 3 Structures des convertisseurs
  - Convertisseur DC-DC
  - Convertisseur AC-DC

- 1 Introduction
- 2 Interrupteurs
  - Caractéristique V-I
    - Caractéristique statique
    - Caractéristique dynamique
  - Types
    - Diode
    - Thyristor
    - GTO
    - BJT
    - MOSFET
    - IGBT
    - Critères de choix
- 3 Structures des convertisseurs
  - Convertisseur DC-DC
  - Convertisseur AC-DC

# Introduction à l'électronique de puissance

L'électronique de puissance concerne le traitement de l'énergie électrique.

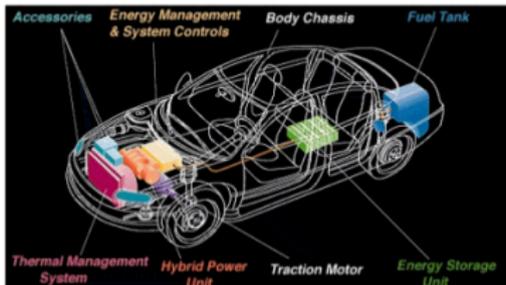
Ce n'est pas le niveau de puissance ou d'énergie traitée qui détermine ses spécificités, ce sont les applications et leurs contraintes d'usage.



Micro-transformateur pour alimentation intégrée sur silicium : 100 $\mu$ W



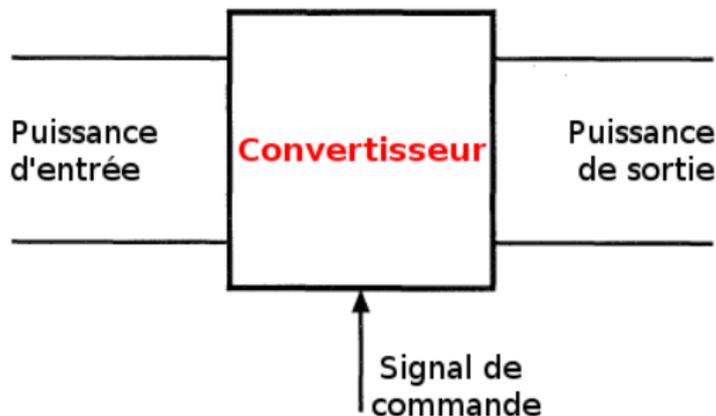
lampes fluorescentes alimentées par un onduleur résonnant : 15W



locomotive FRET : 4,2MW

# Introduction à l'électronique de puissance

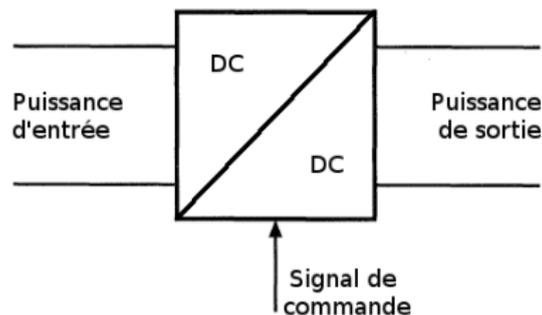
Le dispositif central de cette conversion d'énergie est le **convertisseur**



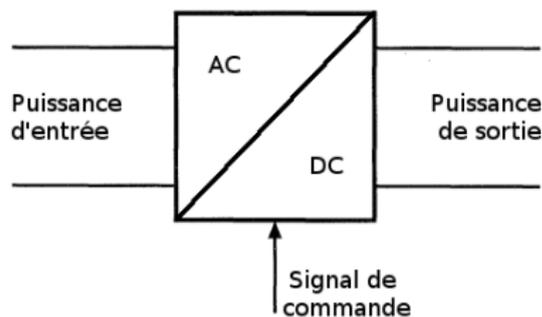
L'énergie d'entrée est donc traitée en suivant des consignes imposées par le signal de commande et envoyée vers la charge (puissance de sortie).

# Introduction à l'électronique de puissance

Différents types des convertisseurs peuvent être construits selon le type de traitement d'énergie entre l'entrée et la sortie



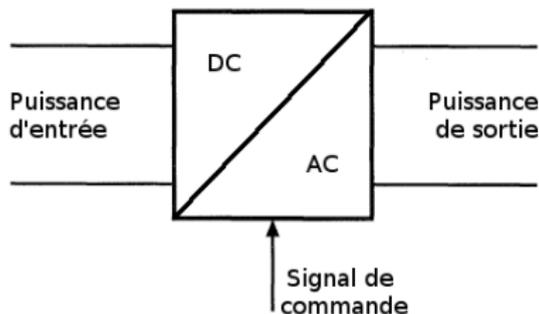
**Convertisseur DC/DC** : amplitude plus grande ou plus petite de la tension d'entrée ou de polarité inversée ou isolation de la masse entrée-sortie.



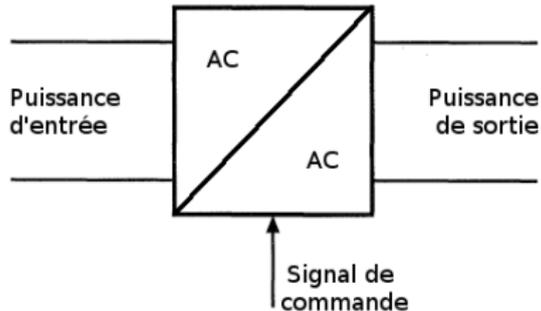
**Redresseur** : une tension AC est redressée afin de produire une tension DC en sortie.

# Introduction à l'électronique de puissance

Différents types des convertisseurs peuvent être construits selon le type de traitement d'énergie entre l'entrée et la sortie



**Inverseurs** : transformer une tension DC dans une tension AC de magnitude et fréquence contrôlable.



**Cycloconverseurs** : transformer une tension AC dans une autre tension AC de magnitude et fréquence contrôlable.

# Introduction à l'électronique de puissance

Les rendements de conversion recherchés : très proche de 100%, de telle sorte que les pertes ne doivent représenter qu'une fraction minimale de l'énergie convertie.

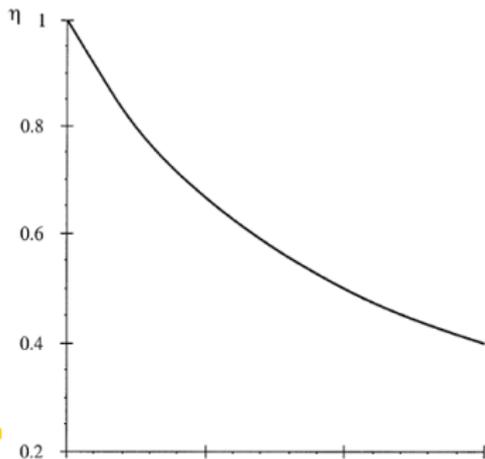
Le rendement d'un convertisseur est défini comme :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Les pertes à l'intérieur sont,

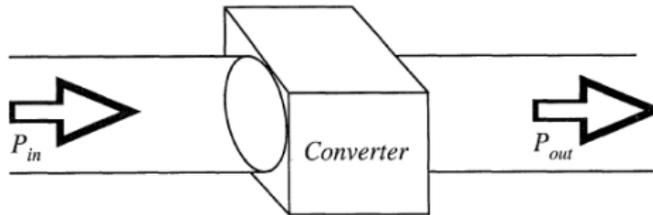
$$\Delta P = P_{in} - P_{out} = P_{out} \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)$$

Les pertes produisent des échauffements qui doivent être évacués.



# Introduction à l'électronique de puissance

Le mesure du rendement est un indice de la performance d'une méthode de conversion.



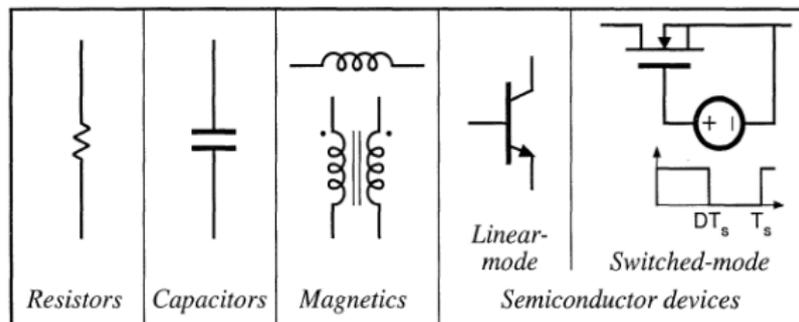
Un rendement très élevé implique des pertes très faibles :

- très haute densité → très petite taille
- faible élévation de température

# Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance (sans pertes Joule) ?

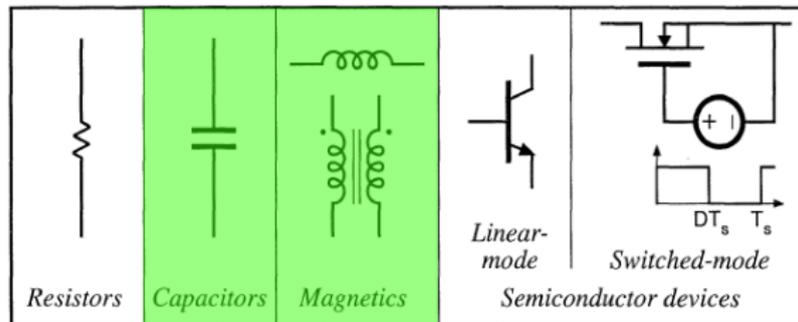
Types de composants présents dans les convertisseurs :



# Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

Types de composants présents dans les convertisseurs :

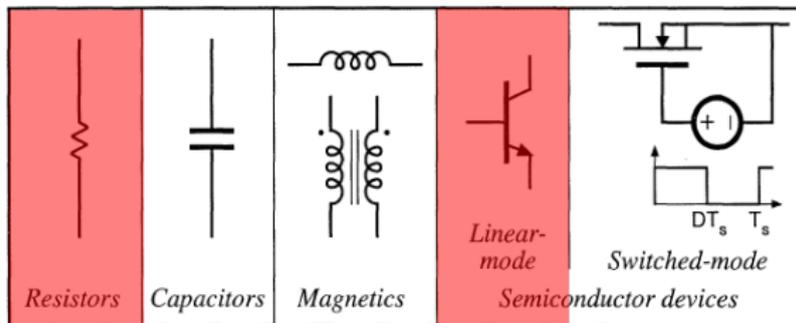


Les capacités et les inductances (idéales) ne dissipent pas de la puissance : stockage de puissance électrique sous forme de champ électrique ou magnétique.

# Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

Types de composants présents dans les convertisseurs :

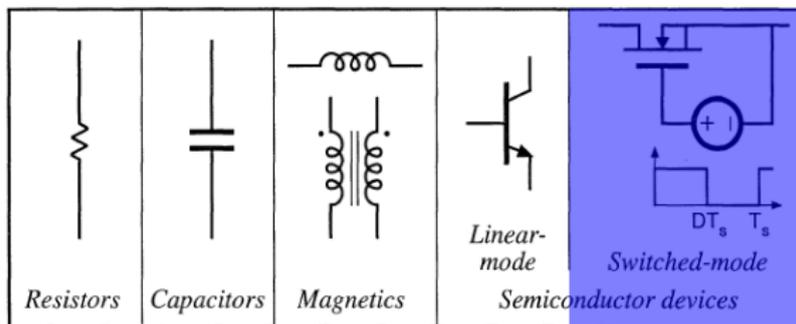


Les résistances et les transistors (en mode linéaire) sont des éléments présentant des pertes élevées.

# Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

Types de composants présents dans les convertisseurs :

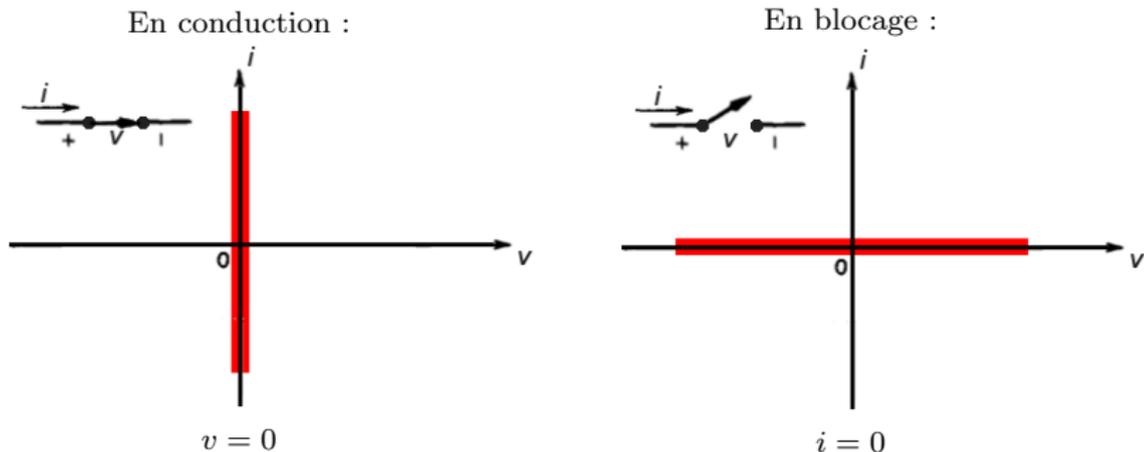


Et les transistors (semi-conducteurs) fonctionnant en **commutation** ?

## Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

Transistors (semi-conducteurs) fonctionnant en commutation : le dispositif fonctionne comme un interrupteur idéal

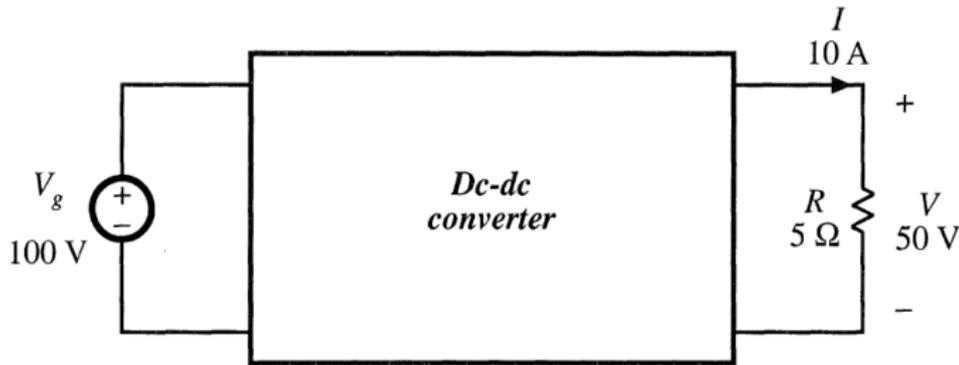


Dans les deux cas :  $P = vi = 0$

# Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

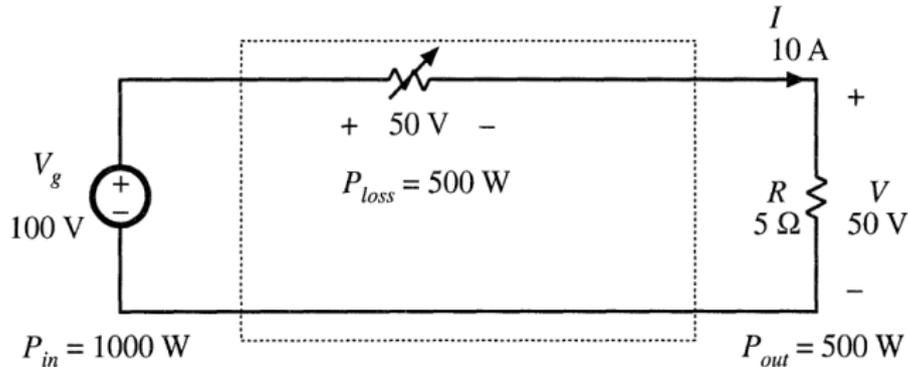
Convertisseur DC-DC élémentaire



# Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

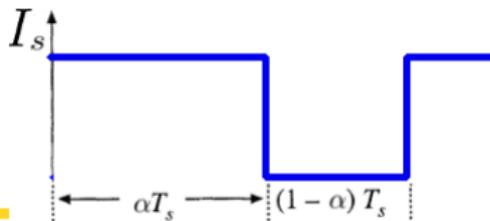
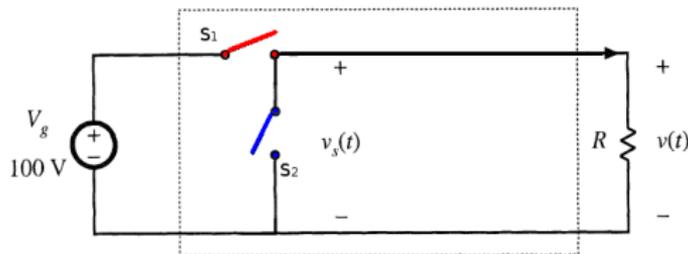
Convertisseur DC-DC élémentaire : une première solution



## Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

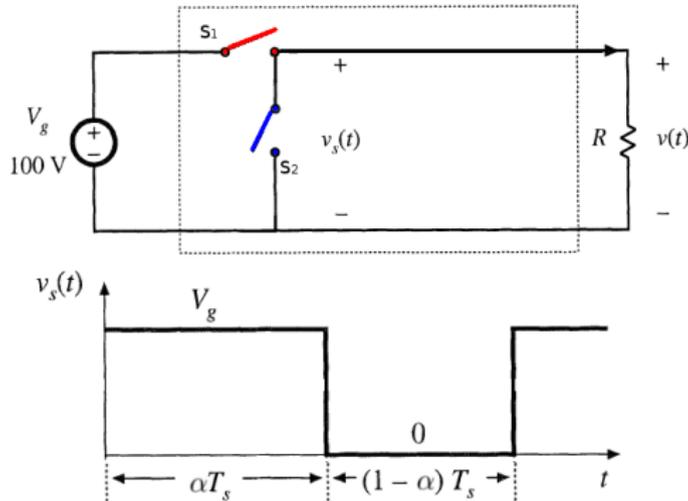
Convertisseur DC-DC élémentaire : autre solution



# Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

Convertisseur DC-DC élémentaire : autre solution

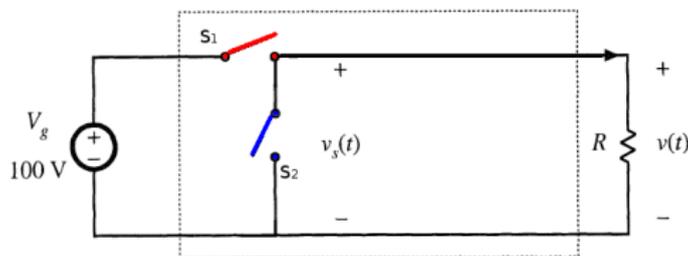


**Problème :** Pour certaines applications une tension constituée de impulsions n'est pas désirable : pour un éclairage, la perception visuelle est du noir suivi d'un aveuglement.

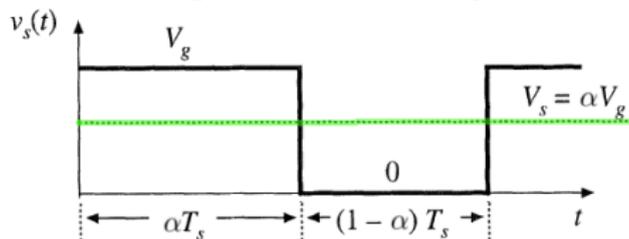
# Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

Convertisseur DC-DC élémentaire : autre solution



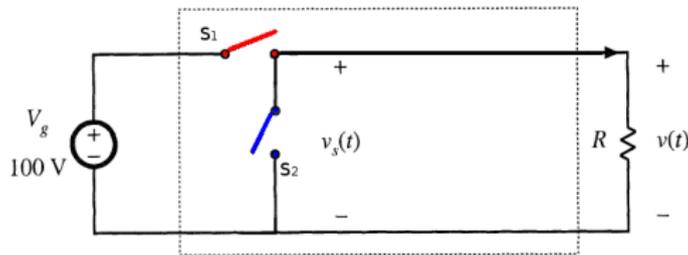
Comment obtenir que la tension moyenne à la sortie ?



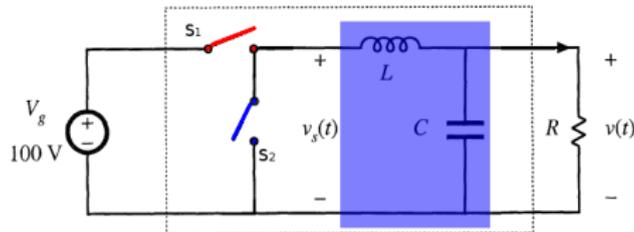
## Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

Convertisseur DC-DC élémentaire : autre solution



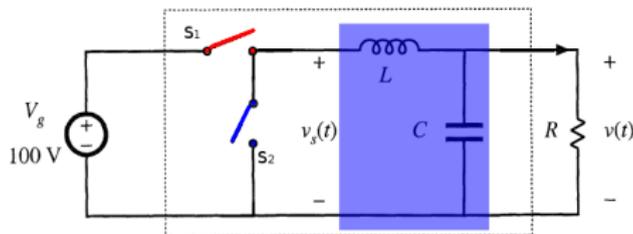
Faire un **filtrage**



# Introduction à l'électronique de puissance

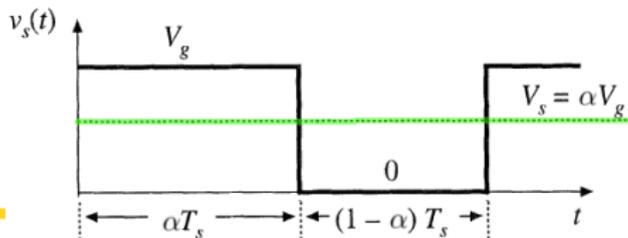
Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

Convertisseur DC-DC élémentaire : autre solution



Le filtre ne laisse passer que la valeur moyenne de la tension :

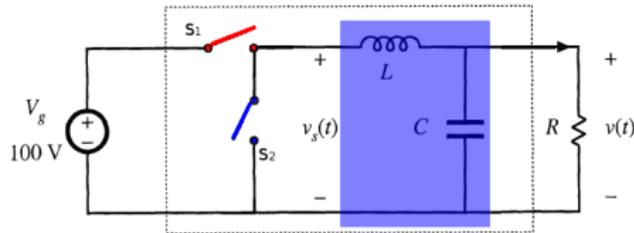
$$V_s = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} v_s(t) dt$$



# Introduction à l'électronique de puissance

Comment construire un circuit qui change la tension sans dissiper de la puissance ?

Convertisseur DC-DC élémentaire : autre solution

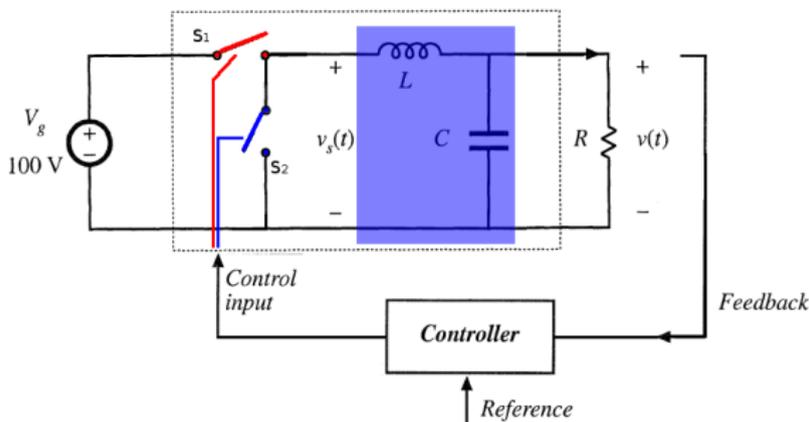


Ni le filtre, ni les interrupteurs ne dissipent pas de la puissance.

Le rendement est proche de 1.

# Introduction à l'électronique de puissance

Un système de commande peut être introduit afin de réguler la tension de sortie : la tension de sortie est une fonction du rapport cyclique  $\alpha$ .



La commande peut changer  $\alpha$  de manière à régler la sortie à une valeur déterminée (référence).

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Interrupteurs
  - Caractéristique V-I
    - Caractéristique statique
    - Caractéristique dynamique
  - Types
    - Diode
    - Thyristor
    - GTO
    - BJT
    - MOSFET
    - IGBT
    - Critères de choix
- 3 Structures des convertisseurs
  - Convertisseur DC-DC
  - Convertisseur AC-DC

## Interrupteurs

Une classification selon leur possibilité de passage de l'état bloqué à l'état passant :

- non commandables
  - changent d'état selon les grandeurs appliquées aux bornes
- semi commandables
  - semi commandables : peuvent passer d'un état à l'autre par application d'une commande, mais le retour est provoqué par les grandeurs aux bornes
- complètement commandables,

## Interrupteurs

Une classification selon leur possibilité de passage de l'état bloqué à l'état passant :

- non commandables
  - changent d'état selon les grandeurs appliquées aux bornes
- semi commandables
  - semi commandables : peuvent passer d'un état à l'autre par application d'une commande, mais le retour est provoqué par les grandeurs aux bornes
- complètement commandables,

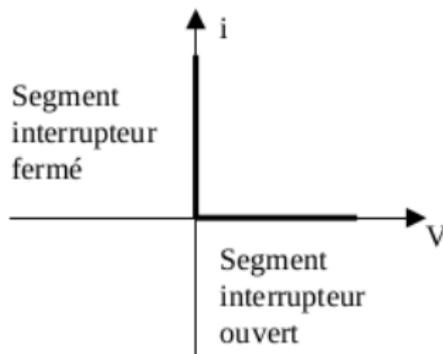
## Interrupteurs

Une classification selon leur possibilité de passage de l'état bloqué à l'état passant :

- non commandables
  - changent d'état selon les grandeurs appliquées aux bornes
- semi commandables
  - semi commandables : peuvent passer d'un état à l'autre par application d'une commande, mais le retour est provoqué par les grandeurs aux bornes
- complètement commandables,

## Interrupteurs : caractéristique statique

La caractéristique statique d'un interrupteur : segments situés sur les axes du repère  $(v, i)$

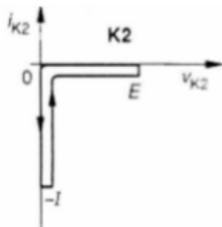


Des interrupteurs à 2, 3 ou 4 segments adaptés à la nature et aux réversibilités des sources et des charges.

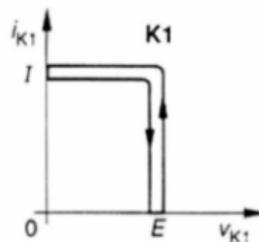
## Interrupteurs : caractéristique dynamique

La caractéristique dynamique d'un interrupteur : la trajectoire suivie par le point de fonctionnement pour passer d'un point situé sur un segment à un point situé sur un autre segment. Le type de trajectoire va définir le type de commutation :

- **commutation spontanée** : le point de fonctionnement se déplace le long des axes dans des quadrants où les segments sont de signes opposés (quadrants 2 et 4).
- **commutation commandée** : le point de fonctionnement se déplace dans un 1/4 de plan où les segments sont de mêmes signes : quadrants 1 et 3



commutation spontanée d'un interrupteur



commutation commandée d'un interrupteur

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Interrupteurs
  - Caractéristique V-I
    - Caractéristique statique
    - Caractéristique dynamique
  - Types
    - Diode
    - Thyristor
    - GTO
    - BJT
    - MOSFET
    - IGBT
    - Critères de choix
- 3 Structures des convertisseurs
  - Convertisseur DC-DC
  - Convertisseur AC-DC

## Interrupteurs : la diode

La diode est un interrupteur non commandable (commutation spontanée) qui est ouvert quand la tension appliquée est négative et fermé si elle est positive.

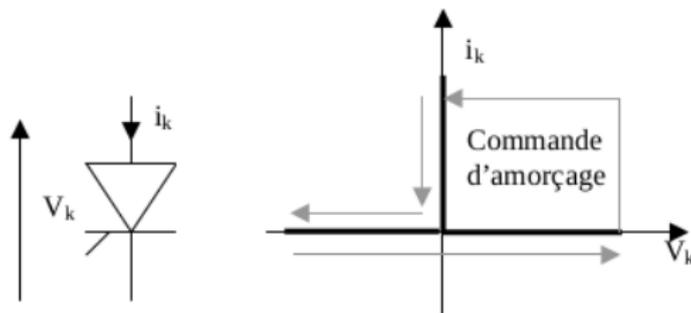


Pour tout courant positif la tension est nulle et pour toute tension négative le courant est nul.

## Interrupteurs : Thyristor

Le thyristor est semi-commandable (commutation spontanée/commandée),

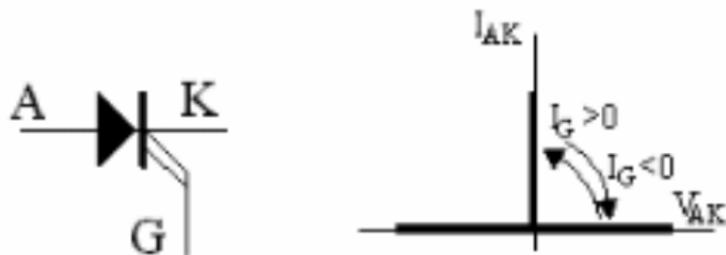
- état normal ouvert,
- quand la tension est positive, si un courant de gâchette positif est injecté, le thyristor passe à l'état passant et y reste,
- si le courant  $i_k$  s'annule, le thyristor revient à sa condition ouvert



Le thyristor est un interrupteur relativement lent et les applications dans lesquelles on l'utilise sont donc limitées en fréquence de commutation.

## Interrupteurs : GTO

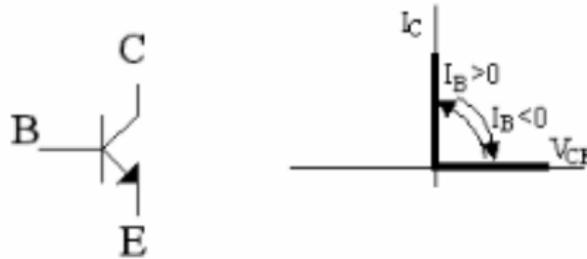
Le GTO (*gate turn off thyristor*) est complètement commandable, le courant  $I_G$  permet de passer de l'état bloqué à l'état passant ou le contraire selon son sens.



Le GTO ne permet pas d'obtenir des fréquences de commutations élevées.

## Interrupteurs : Transistor bipolaire

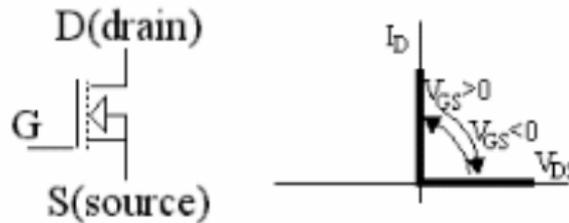
Le transistor bipolaire (BJT *Bipolar Junction Transistor*) est complètement commandable. Les caractéristiques en tension inverse (négative) sont inexistantes.



La rapidité de passage d'un état à l'autre permet d'atteindre des fréquences de commutation élevées.

## Interrupteurs : MOSFET

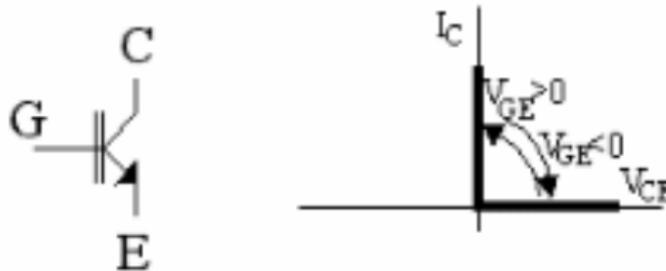
Le MOSFET a un comportement identique au transistor bipolaire, mais il est commandé par la tension  $V_{GS}$ .



Fréquences de commutation élevées.

## Interrupteurs : IGBT

Le IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) possède les avantages de la commande en tension du MOSFET avec une large gamme de tension et courant de fonctionnement du transistor bipolaire.



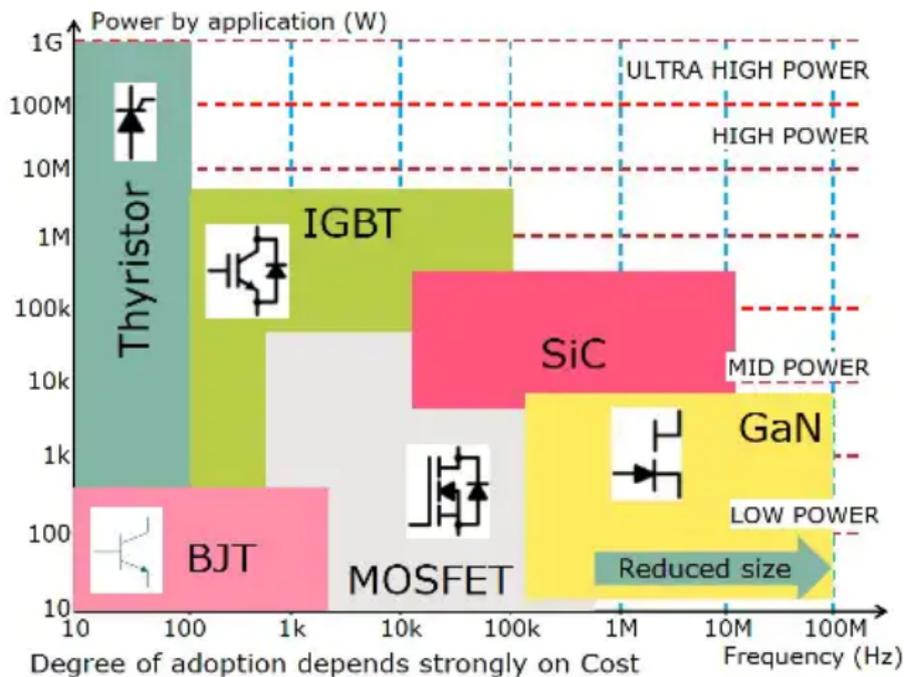
Rapidité de commutation accrue.

## Interrupteurs : critères de choix

- le domaine de fonctionnement,
- les limites en tension et en courant,
- la rapidité de passage de l'état bloqué à l'état passant,
- le coût.

## Interrupteurs : critères de choix

Une classification selon le niveau de puissance et la vitesse de commutation



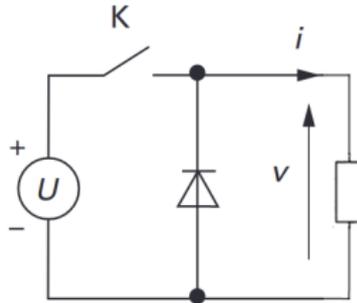
Source: P. Friedrichs & M. Buschkuhle, Infineon AG, Energetica India, May/June 2016

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Interrupteurs
  - Caractéristique V-I
    - Caractéristique statique
    - Caractéristique dynamique
  - Types
    - Diode
    - Thyristor
    - GTO
    - BJT
    - MOSFET
    - IGBT
    - Critères de choix
- 3 Structures des convertisseurs
  - **Convertisseur DC-DC**
  - Convertisseur AC-DC

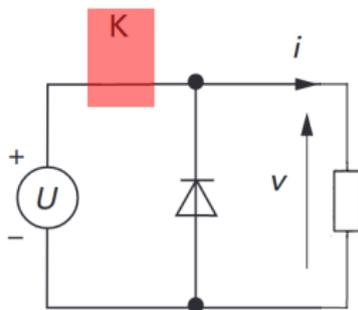
## Convertisseur DC-DC

Ces convertisseurs sont appelés des hacheurs. La structure la plus simple comporte une diode et un transistor.



## Convertisseur DC-DC

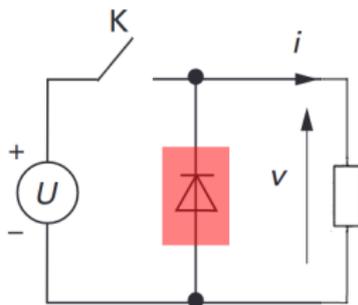
Ces convertisseurs sont appelés des hacheurs. La structure la plus simple comporte une diode et un transistor.



Si l'interrupteur  $K$  est fermé  $v = U$ , la diode ne conduit pas (polarisation inverse).

## Convertisseur DC-DC

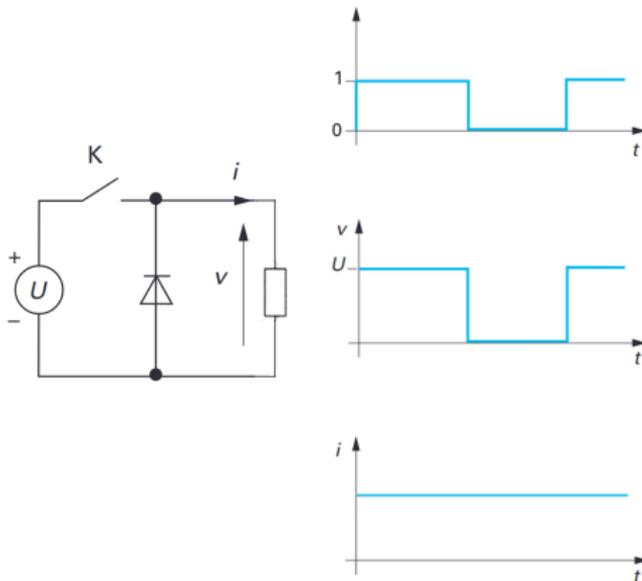
Ces convertisseurs sont appelés des hacheurs. La structure la plus simple comporte une diode et un transistor.



Si l'interrupteur  $K$  est ouvert, la diode conduit (continuité du courant  $i$  sur la charge).

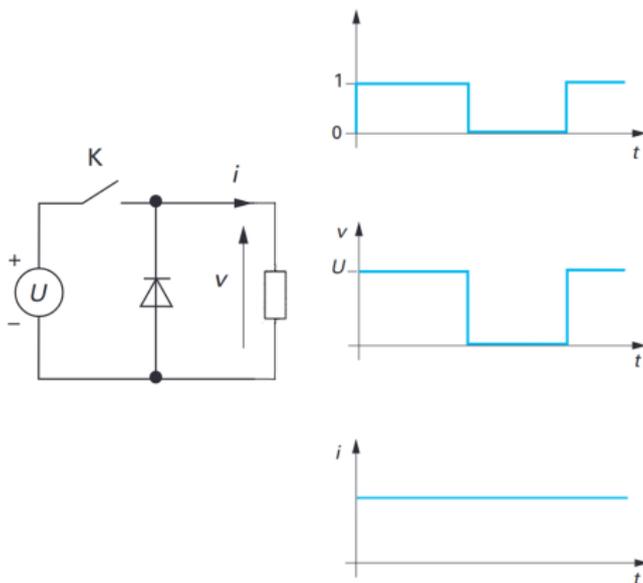
## Convertisseur DC-DC

Le courant  $i$  et la tension  $v$  ne peuvent être que positifs. Le fonctionnement est donc limité au premier quadrant.



## Convertisseur DC-DC

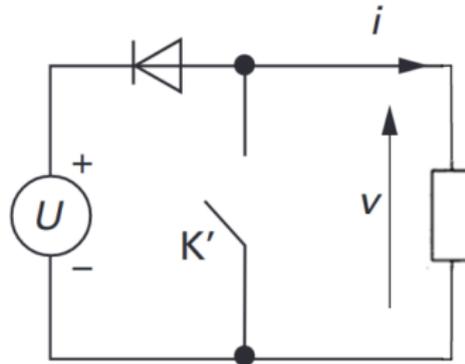
Le courant  $i$  et la tension  $v$  ne peuvent être que positifs. Le fonctionnement est donc limité au premier quadrant.



L'interrupteur est en série avec la charge : **hacheur série**.

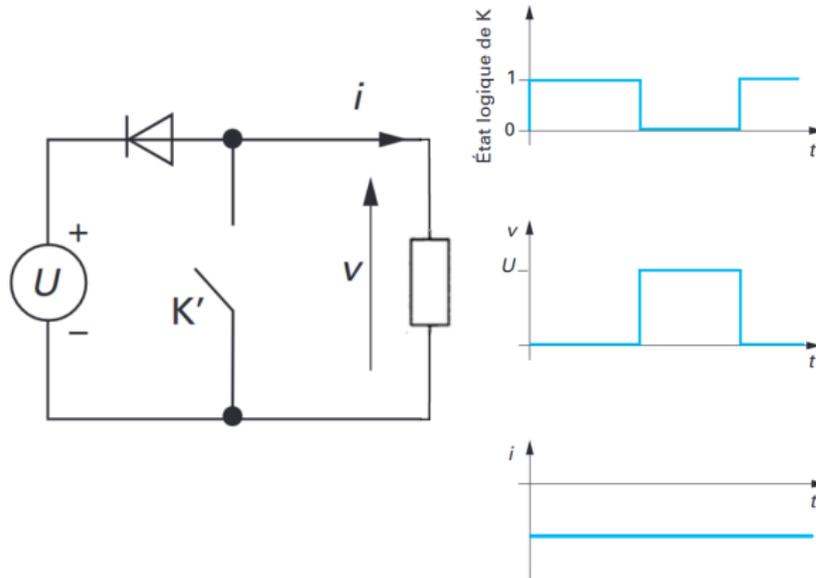
## Convertisseur DC-DC

L'interrupteur peut être en parallèle avec la charge : **hacheur parallèle**.



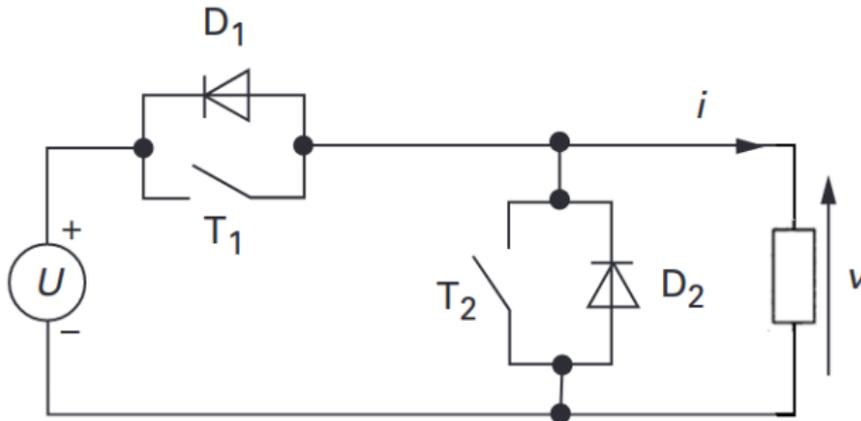
## Convertisseur DC-DC

Le courant  $i$  devra être négatif et la tension  $v$  positive. Le fonctionnement est au quatrième quadrant.



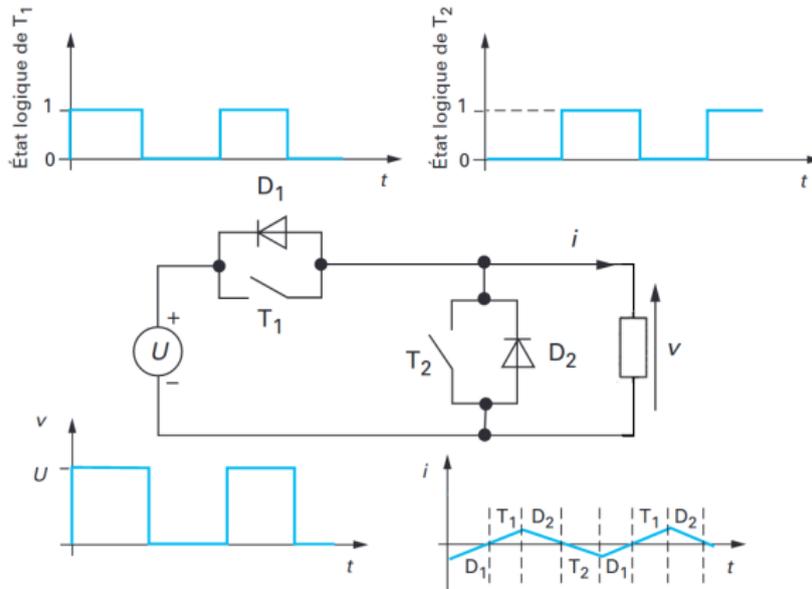
## Convertisseur DC-DC

La combinaison des hacheurs série et parallèle : **hacheur à deux quadrants**



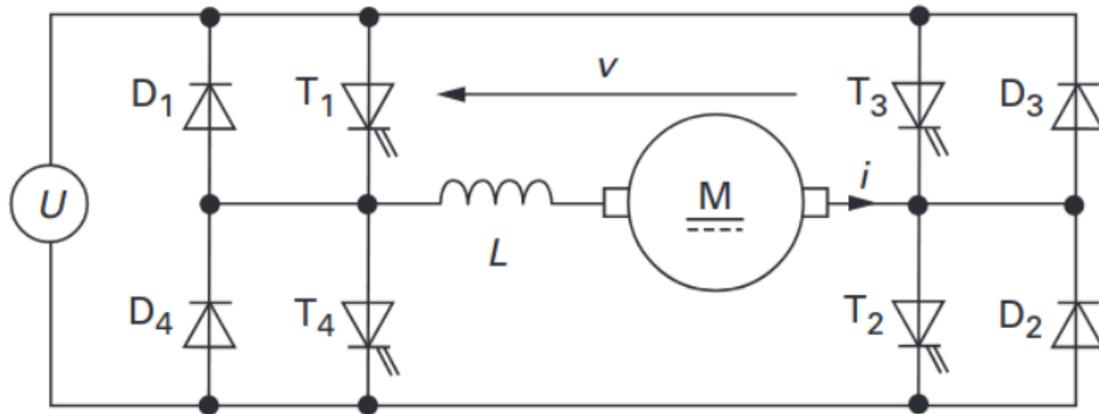
## Convertisseur DC-DC

Le courant  $i$  est réversible et la tension  $v$  toujours positive. Le fonctionnement est au premier et quatrième quadrant.



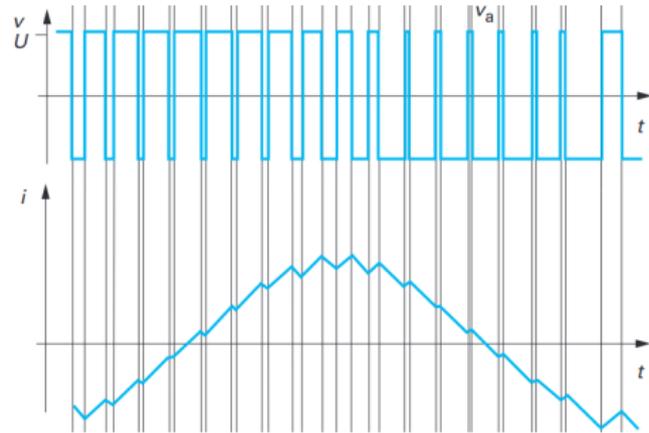
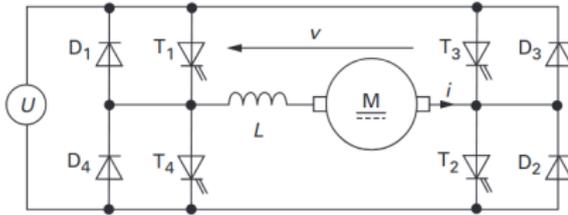
## Convertisseur DC-DC

La combinaison des deux hacheurs à deux quadrants : **hacheur à quatre quadrants**



## Convertisseur DC-DC

Le courant  $i$  est réversible et la tension  $v$  aussi.

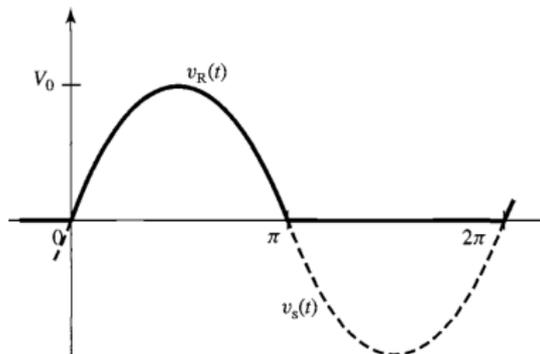
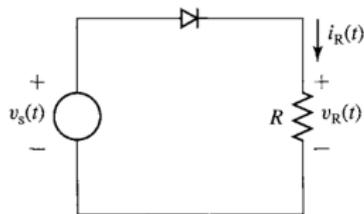


# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Interrupteurs
  - Caractéristique V-I
    - Caractéristique statique
    - Caractéristique dynamique
  - Types
    - Diode
    - Thyristor
    - GTO
    - BJT
    - MOSFET
    - IGBT
    - Critères de choix
- 3 Structures des convertisseurs
  - Convertisseur DC-DC
  - Convertisseur AC-DC

## Convertisseur AC-DC : redresseurs

Redresseur monophasé – demi-onde :



$$v_s(t) \geq 0 \quad v_s(t) = V_0 \sin(\omega t)$$

$$v_s(t) \leq 0 \quad 0$$

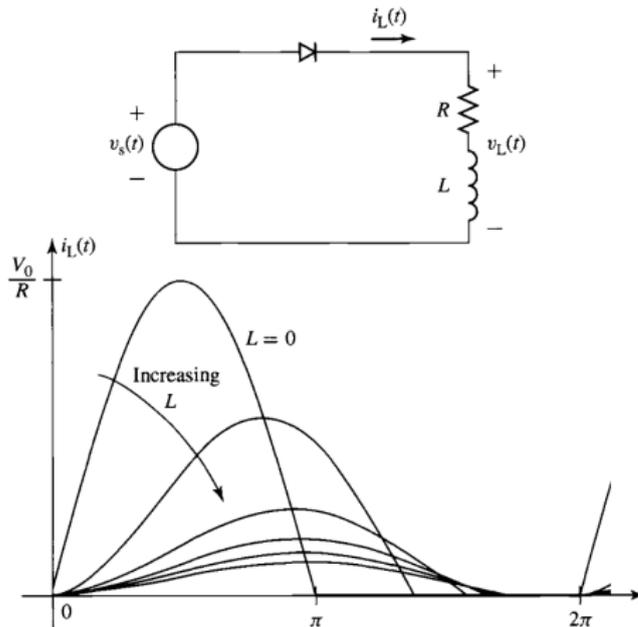
Valeur moyenne de la tension sur  
la charge :

$$\langle v_R \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_0 \sin(\omega t) dt = \frac{V_0}{\pi}$$

Utilisé pour des applications faible puissance, faible coût.

## Convertisseur AC-DC : redresseurs

Redresseur monophasé – demi-onde : charge inductive  $RL$



Si  $L$  augmente

la valeur maximale de  $i_L$  se réduit et,

*l'angle de conduction* de la diode ( $\theta = \omega t$ ) augmente

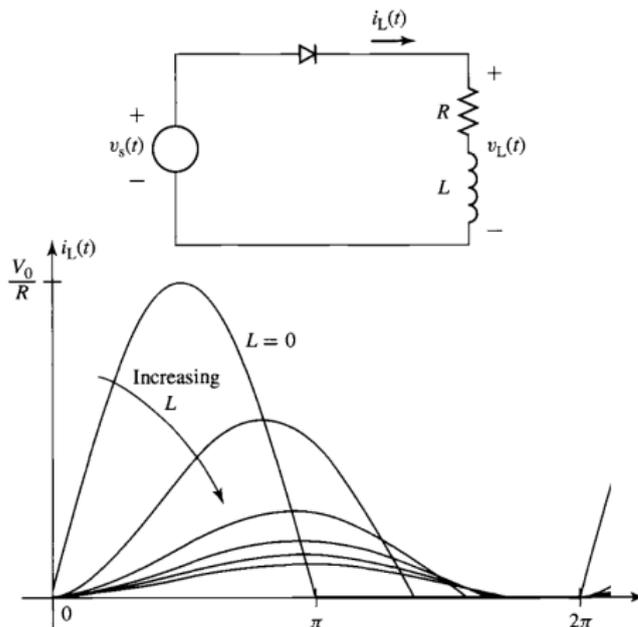
À la limite  $\omega L \gg R$

la valeur maximale de  $i_L \rightarrow 0$ ,

*l'angle de conduction*  
 $\theta \rightarrow 2\pi$  !!

## Convertisseur AC-DC : redresseurs

Redresseur monophasé – demi-onde : charge inductive  $RL$



Si  $L$  augmente

la valeur maximale de  $i_L$  se réduit et,

*l'angle de conduction* de la diode ( $\theta = \omega t$ ) augmente

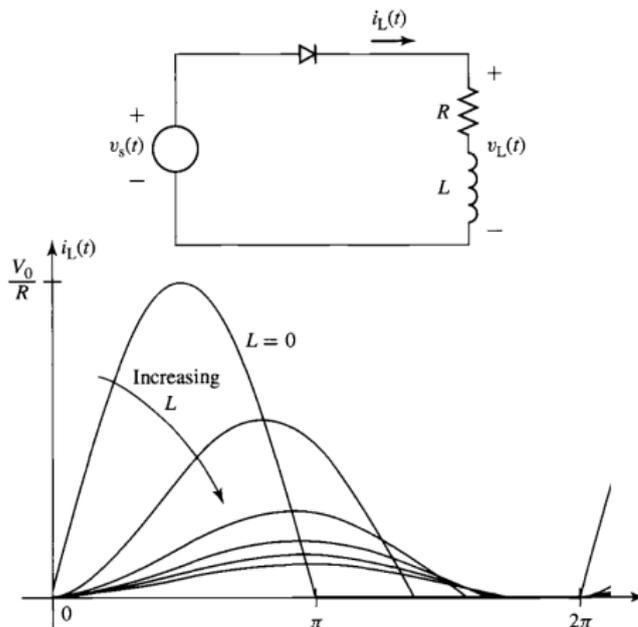
À la limite  $\omega L \gg R$

la valeur maximale de  $i_L \rightarrow 0$ ,

*l'angle de conduction*  
 $\theta \rightarrow 2\pi$  !!

## Convertisseur AC-DC : redresseurs

Redresseur monophasé – demi-onde : charge inductive  $RL$



Si  $L$  augmente

la valeur maximale de  $i_L$  se réduit et,

*l'angle de conduction* de la diode ( $\theta = \omega t$ ) augmente

À la limite  $\omega L \gg R$

la valeur maximale de  $i_L \rightarrow 0$ ,

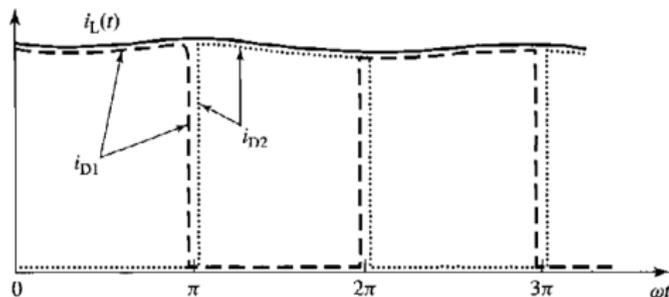
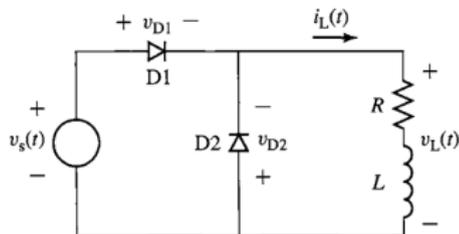
*l'angle de conduction*  
 $\theta \rightarrow 2\pi$  !!

## Convertisseur AC-DC : redresseurs

Redresseur monophasé – demi-onde :

Charge inductive  $RL$  avec  $\omega L \gg R$

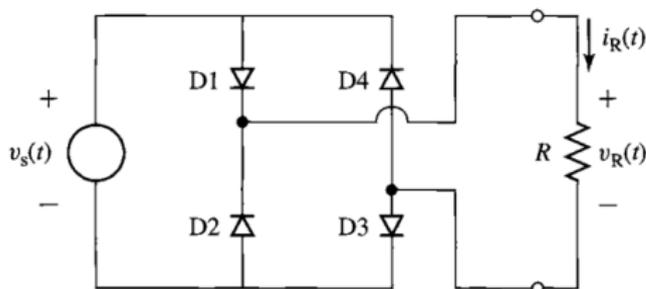
Une solution au problème de l'angle de conduction : la diode de roue libre



$\langle v_L \rangle = V_0/\pi$  (demi-onde)  
 $i_L$  devient continu

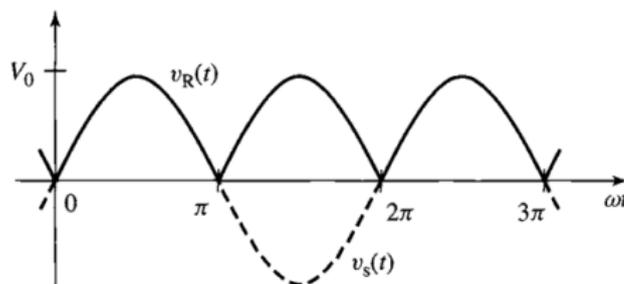
## Convertisseur AC-DC : redresseurs

Redresseur pleine onde :



$$\begin{aligned} v_s(t) \geq 0 & \quad v_R(t) = V_0 \sin(\omega t) \\ v_s(t) < 0 & \quad v_R(t) = -V_0 \sin(\omega t) \end{aligned}$$

Valeur moyenne de la tension sur  
la charge :

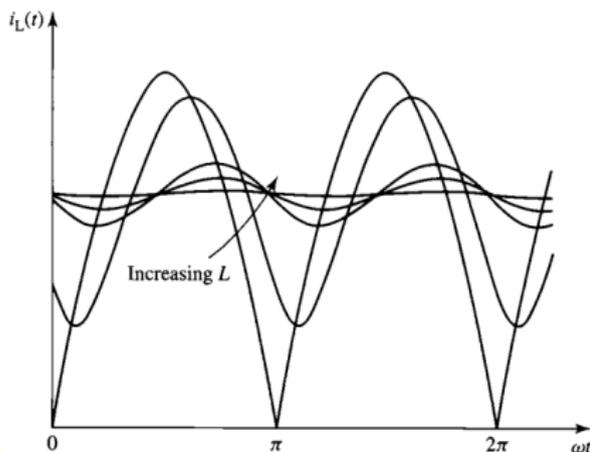
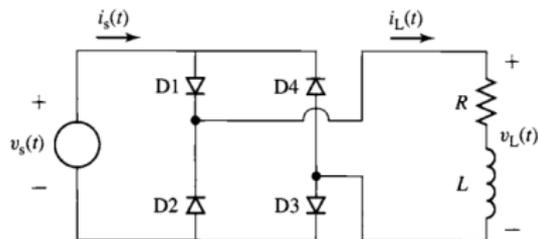


$$\langle v_R \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_0 |\sin(\omega t)| dt = \frac{2V_0}{\pi}$$

Les plus utilisés dans les applications de conversion AC-DC.

## Convertisseur AC-DC : redresseurs

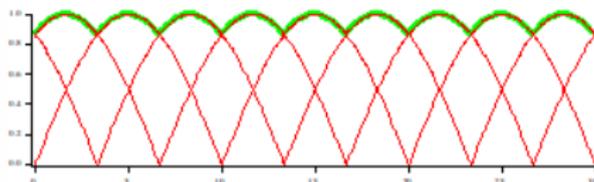
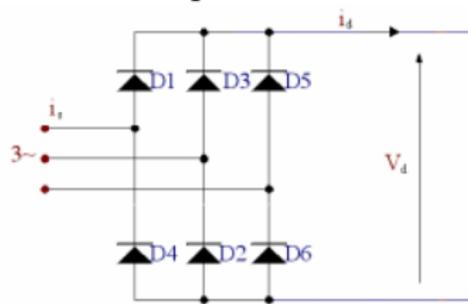
Redresseur pleine onde : charge inductive  $RL$  avec  $\omega L \gg R$



$$\langle i_L \rangle = 2V_0 / (\pi R)$$

## Convertisseur AC-DC : redresseurs

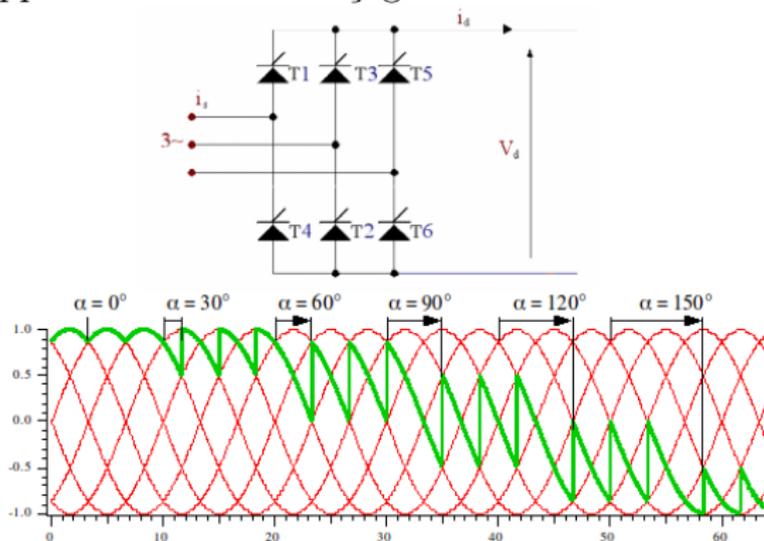
Redresseur triphasé :



Applications avec des puissances de plusieurs kilowatts

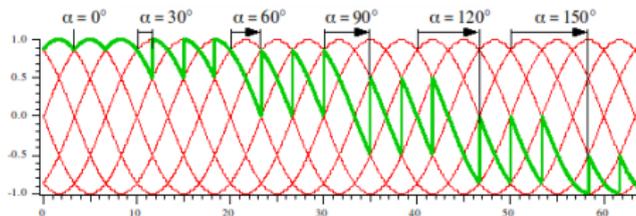
## Convertisseur AC-DC

Si nous remplaçons les diodes par des thyristors, l'instant de mise en conduction des composants est contrôlé et peut être retardé par rapport à l'instant normal de mise en conduction de la diode. Ce retard est appelé retard à l'amorçage.



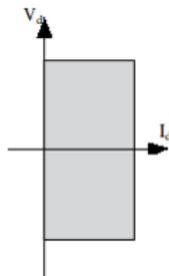
## Convertisseur AC-DC

La tension de sortie  $V_d$  a sa valeur moyenne qui varie entre  $+V$  et  $-V$ .



Le fonctionnement à tension moyenne négative n'est possible que si le courant  $I$  existe (et est positif). Nous avons un système qui fournit alors un courant positif et une tension négative donc l'énergie électrique échangée est négative.

**Convertisseur réversible en tension.**



## Convertisseur AC-DC

Double réversibilité (réversibilité complète) : placer un convertisseur équivalent en opposition sur le premier.

