

Ch6. Électronique de Puissance



The background of the slide is a deep blue with several flowing, translucent, light blue ribbons or waves that curve and swirl across the frame, creating a sense of motion and depth.

1. Introduction

1. Introduction

En tant qu'Electronicien vous allez normalement être plus à l'aise avec ce qui suit. Il s'agit du domaine récent de **l'Electronique de Puissance** (~50ans). Les convertisseurs statiques travaillent autour de composants actifs faisant partie des familles des transistors, des thyristors et des diodes. Nous parlerons d'**interrupteur statique** :

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

- **Transistors** (IGBT, MOSFET)
- **Thyristors** (IGCT, GTO, Thyristors)
- **Diodes**

1. Introduction - Applications

Prenons quelques exemples d'applications travaillant autour d'IGBT :

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

Queen Mary 2 (POD)



Plaques à induction



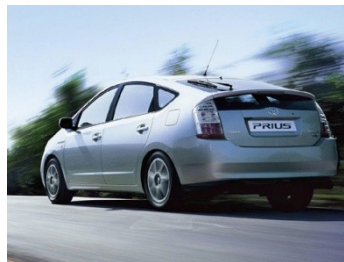
AGV- Alstom



TGV Duplex - Alstom



Toyota PRIUS



Module IGBT AGV

1. Introduction - Applications

Prenons encore quelques exemples d'applications travaillant autour d'IGBT ou de MOSFET :

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

Alimentation de PC
portable



Alimentation de PC fixe



Alimentation XBOX 360
(MOSFET)



Variateur de vitesse Altivar 61
(IGBT)



1. Introduction - Applications

Prenons quelques exemples d'applications travaillant autour de thyristors (GTO, IGCT, TRIAC ...):

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

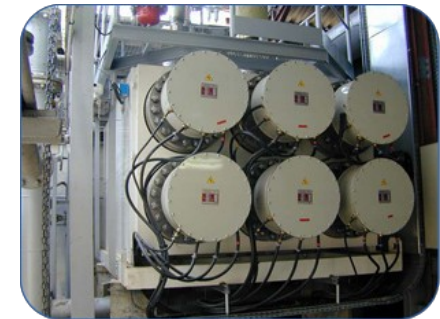
- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

IFA 2000 station de redressement
HVDC France-Angleterre (Thyristors)



Chauffeur d'air de TATT (Thyristors)



Thalassa de Ifremer (Thyristors)



1. Introduction - Technologie

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

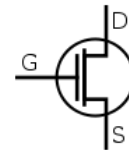
4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

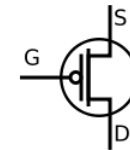
5. Onduleurs

Voici les différents symboles associés aux interrupteurs statiques rencontrés en Electronique de puissance :

• MOSFET :

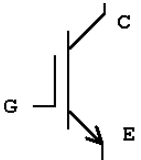


Canal n

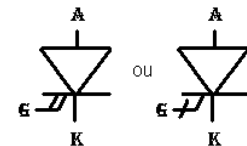


Canal p

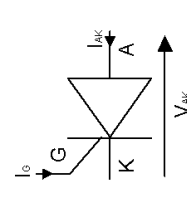
• IGBT (Transistor Bipolaire à Grille Isolée) :



• GTO (Gate Turn Off Thyristor) :



• Thyristor :



... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

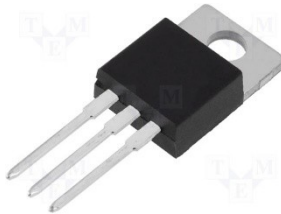
4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

En Electronique de puissance, les transistors ne sont utilisés qu'en commutation. En très forte puissance, ces composants sont dits à structures verticales :

MOSFET 600V 20A



IGBT 3300V 1200A



GTO 6000V 6000A



↓
Circulation verticale du
courant

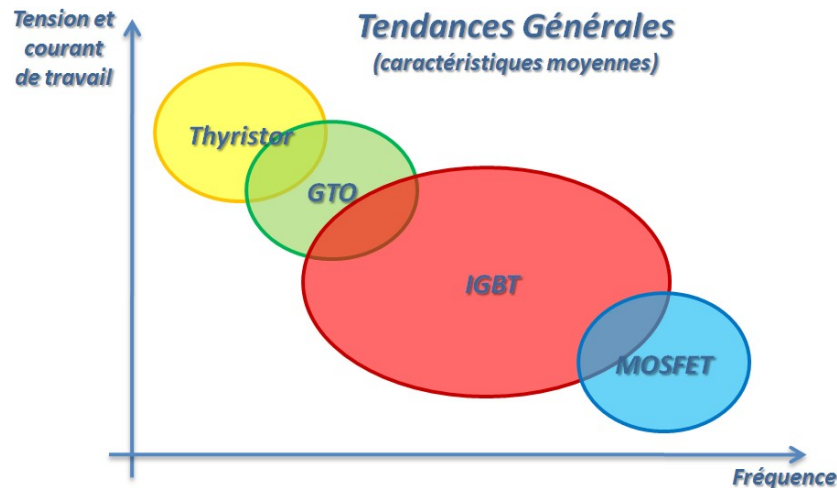


Le choix des transistors utilisés se fait essentiellement en fonction de la gamme de tension et de courant à couper ainsi que de la fréquence de travail

1. Introduction - Technologie

Contrairement aux thyristors existants depuis plus de 30 ans, les IGBT sont de conception récente (~1990) et autorisent l'utilisation à fréquence élevée du principe de MLI. De part leurs polyvalences, les transistors IGBT sont les plus répandus en forte puissance :

	MOSFET 600V	IGBT 600V	IGBT 1700V	IGBT 3300V	IGBT 6500V	GTO 6000V	Thyristor 16000V
Fréquence typique	15-100KHz	6-40KHz	3-10KHz	1-5KHz	0,8-2KHz	0,3-1KHz	300Hz



... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- **Technologie**
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

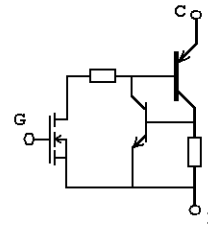
3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

Les IGBT sont en fait des transistors bipolaires attaqués par un MOSFET. Ils allient ainsi les avantages des deux familles de transistors :



• Avantages liés à l'étage MOSFET :

- commande en tension (V_{GE})
- consommation plus faible de la commande

• Avantages liés à l'étage Bipolaire :

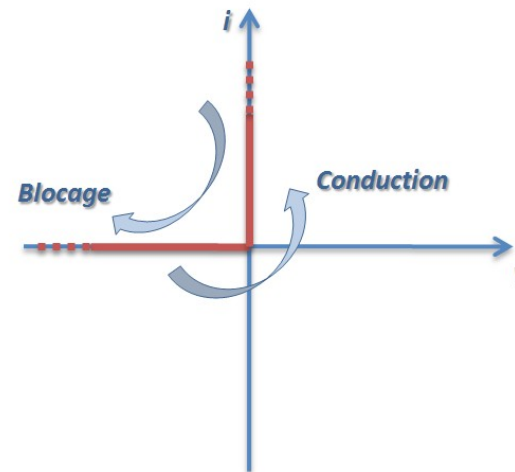
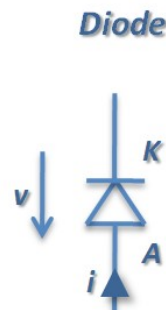
- faibles pertes en conduction
- gammes plus élevées des tensions et courants de travail

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance



**Dans la suite de ce cours, les
différents interrupteurs statiques seront
supposés idéaux !**

Commençons par la caractéristique idéale de la
diode :



1. Introduction

- Applications
- Technologie
- **Composants**
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

1. Introduction - Composants

Continuons avec la caractéristique idéale des transistors (IGBT, MOSFET ...) :

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- **Composants**
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

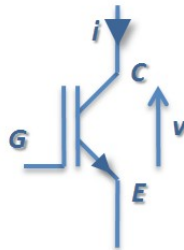
3. MLI

4. Hacheurs

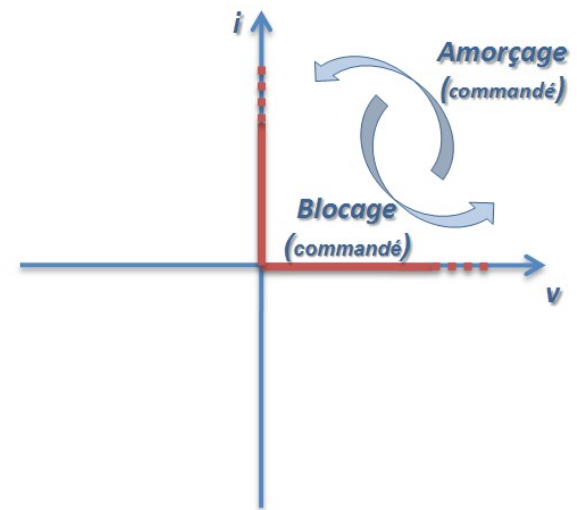
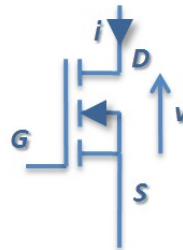
- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

IGBT



MOSFET



1. Introduction - Composants

Continuons avec la caractéristique idéale des thyristors (IGCT, GTO, SCR ...):

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- **Composants**
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

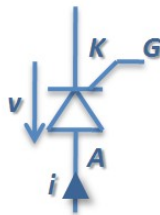
3. MLI

4. Hacheurs

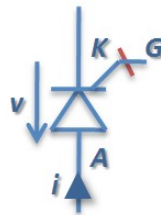
- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

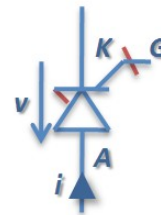
Thyristor



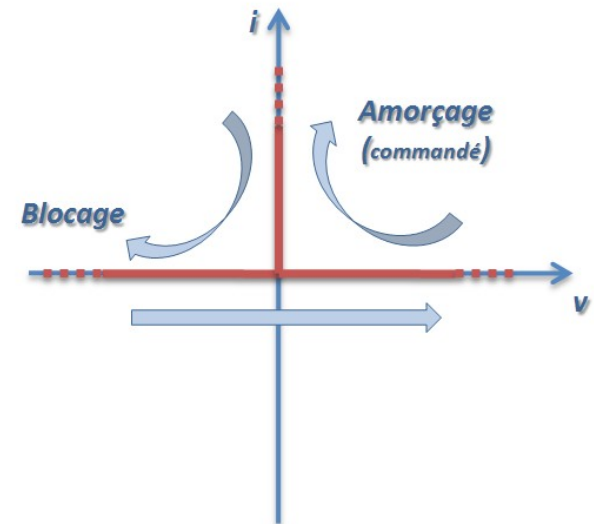
GTO



IGCT



...



Faute de temps, nous ne nous intéresserons qu'aux familles des diodes et des transistors. Les thyristors étant la chasse gardée des très fortes puissance, application chauffage, HVDC ...

1. Introduction - Conversion

Nous allons dans la suite de ce cours nous atteler à découvrir les principales structures à base d'interrupteurs statiques (**redresseurs**, **hacheurs** et **onduleurs**). Toutes ces structures permettent de réaliser des conversions électrique/électrique :

... à la découverte de
l'Électronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

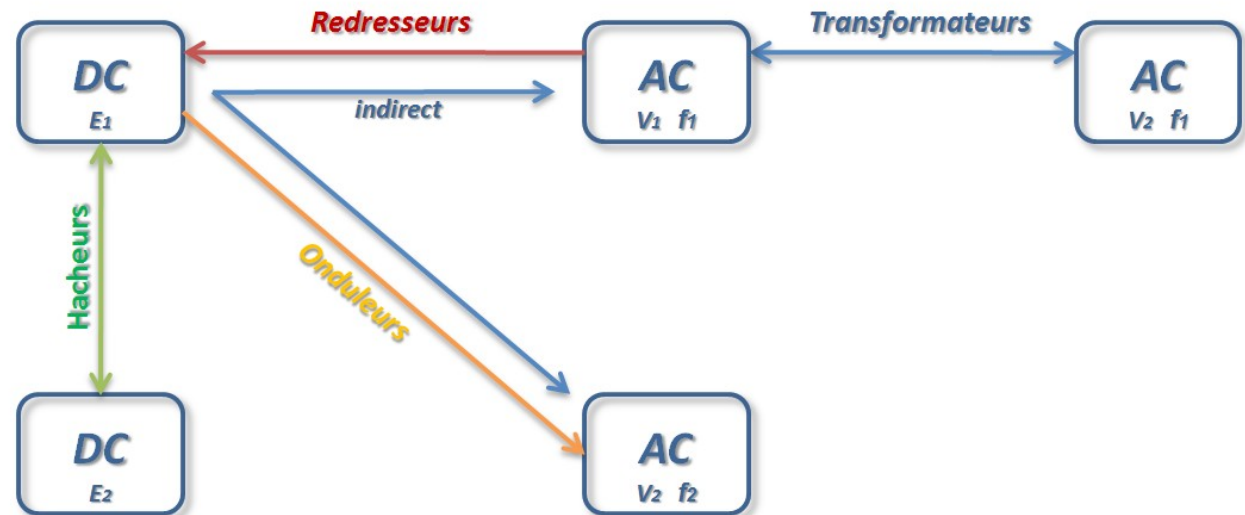
- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs



1. Introduction - Conversion

Faute de temps, nous ne découvrirons pas certaines structures travaillant autour de Thyristors (**gradateur**, **cycloconvertisseur** ...). Rappelons que les thyristors sont principalement rencontrés dans les applications en forte puissance :

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

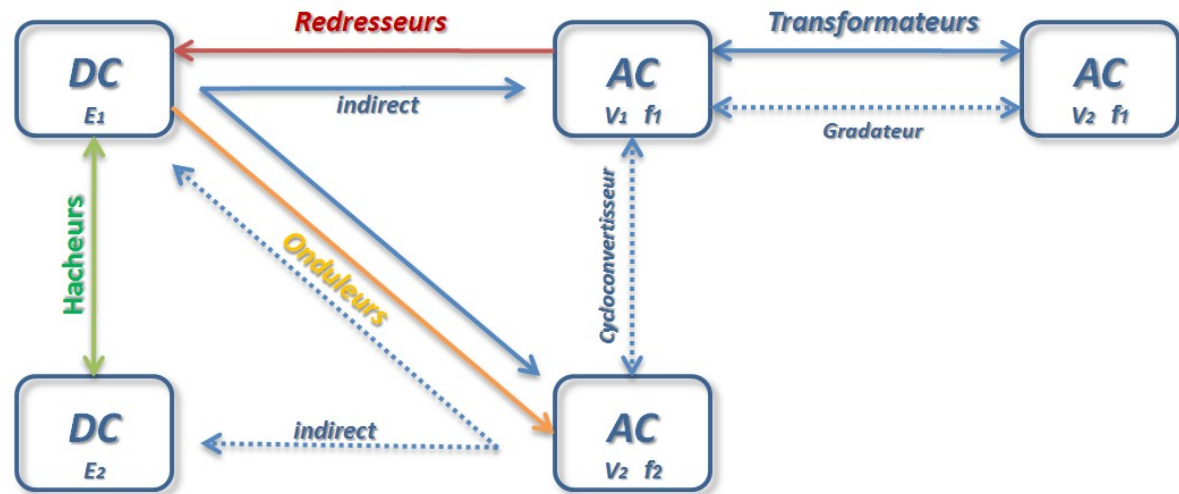
- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs



The background is a deep blue with several translucent, flowing, ribbon-like shapes that curve and swirl across the frame, creating a sense of motion and depth. The text is centered in the middle of the image.

2. Redresseurs

2. Redresseurs

Les redresseurs sont des convertisseurs alternatif vers continu. La source est généralement une source de tension. Ils sont classés en deux grandes familles :

... à la découverte de
l'Électronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

- **Non commandés** : N'utilisent que des diodes. Aucune possibilité d'ajuster le niveau de tension en sortie sur le bus continu.

- **Commandés** : Ajout d'un hacheur pour ajuster le niveau de tension sur le bus continu. Ils sont souvent utilisés pour assurer une absorption sinusoïdale du courant en entrée. Des solutions à base de thyristors existent encore en forte puissance mais tendent à disparaître en faible et moyenne puissance.

2. Redresseurs - Non Commandé

La structure la plus rencontrée en Electronique de puissance est celle du **redresseur à double alternance** souvent appelé **pont de Graetz**. Voici ci-dessous le schéma correspondant en monophasé. Seul le monophasé sera étudié, le passage au triphasé étant guère plus complexe :

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

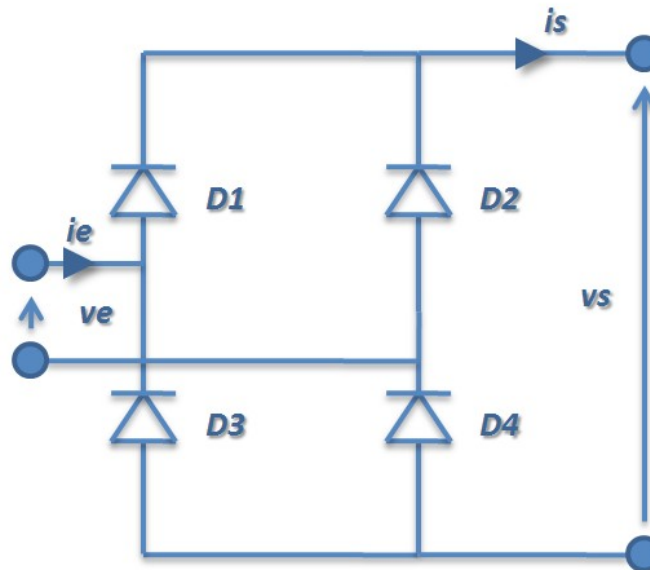
- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs



2. Redresseurs - Non Commandé

Observons les formes d'ondes en sortie du redresseur lorsque celui-ci attaque une charge résistive :

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

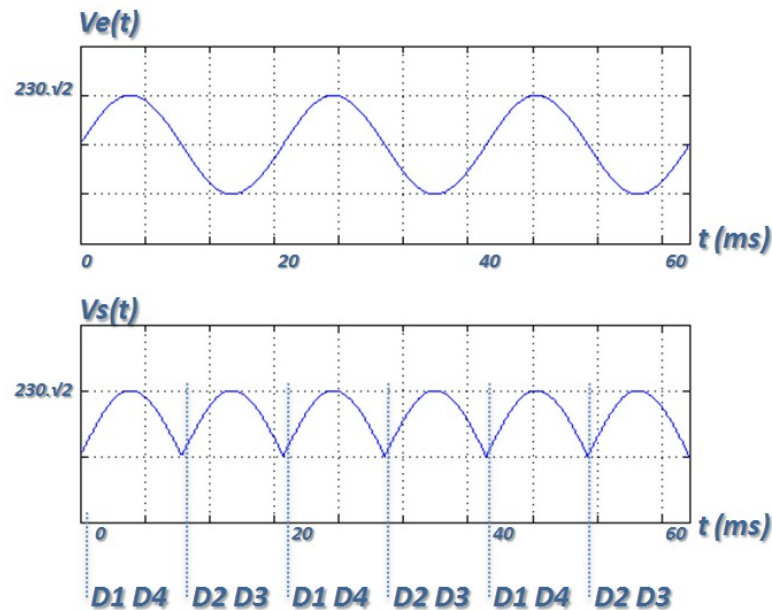
- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs



2. Redresseurs - Non Commandé

Les redresseurs sont le plus souvent utilisés avec un condensateur de filtrage. Nous parlons alors de redresseur à "capa en tête". Observons les formes d'ondes en sortie du redresseur lorsque celui-ci attaque une charge résistive :

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

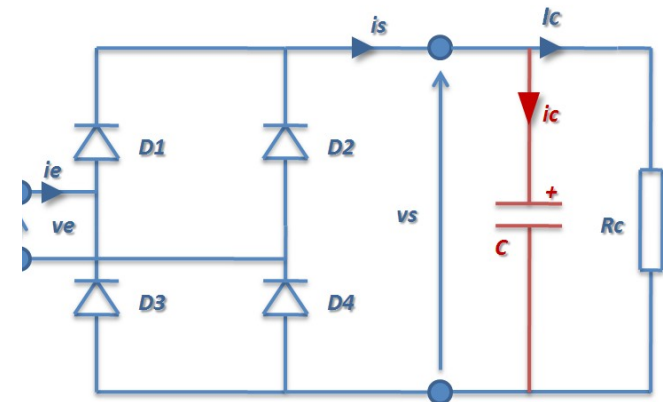
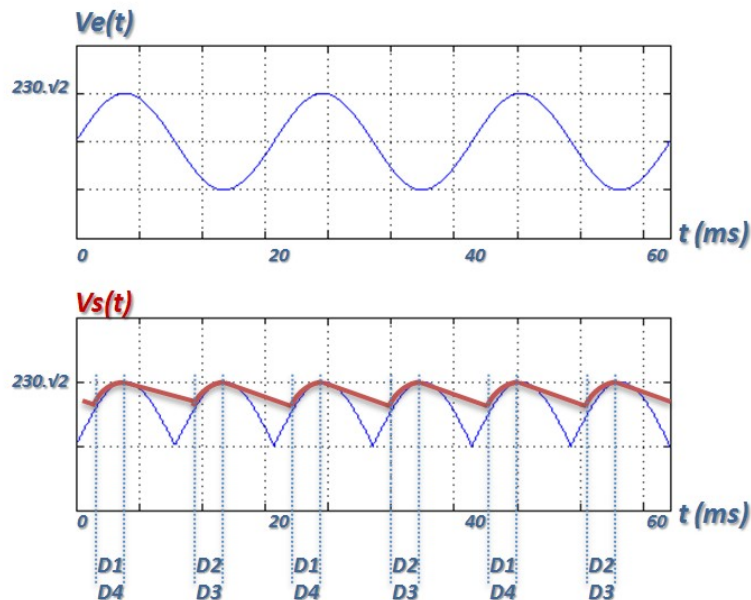
- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs



2. Redresseurs - Non Commandé

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

L'ondulation de tension aux bornes de la charge dépend de la constante de temps $R_c.C$, qui doit être supérieure à une demi période du réseau. Au fonctionnement nominal de la charge, en augmentant C nous diminuons l'ondulation de tension en sortie. Cependant l'encombrement et le coût de l'ensemble augmentent. Suite à quelques approximations (courant constant en sortie, décharge sur une demi période du réseau et linéarisation de l'expression de la décharge), l'expression de l'ondulation de tension peut s'écrire :

$$\Delta_{vs} = \frac{I_c}{2 \cdot C \cdot f}$$

2. Redresseurs - Non Commandé

L'énorme inconvénient de ce type de montage réside dans la forme d'onde du courant absorbé par le redresseur sur le réseau. Ce courant est pulsé et est donc très riche en harmoniques (puissance déformante):

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

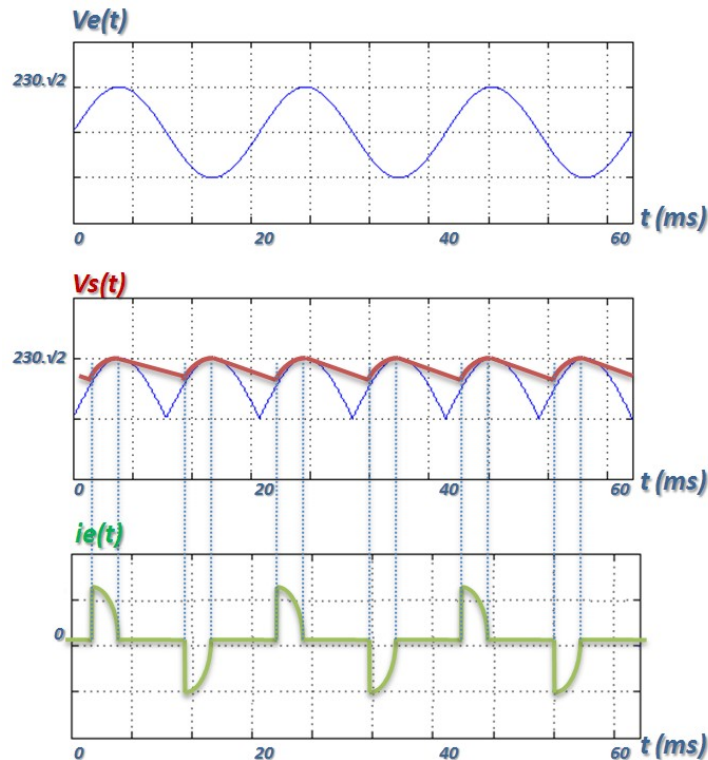
- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs



... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance



**Afin de solutionner le problème
précédemment rencontré (courant d'entrée riche
en harmoniques), non avons recours à l'utilisation
de redresseurs commandés !**

- Contrairement à celle des redresseurs non commandés, l'étude des redresseurs commandé commence à être complexe et demande de solide base en Automatique (modélisation du système, design des régulateurs en analogique ou en numérique, implémentation ...).

- En effet, seule l'implémentation de lois de commande peuvent permettre l'absorption du courant sinusoïdal en entrée tout en régulant le niveau de tension sur le bus continu !

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

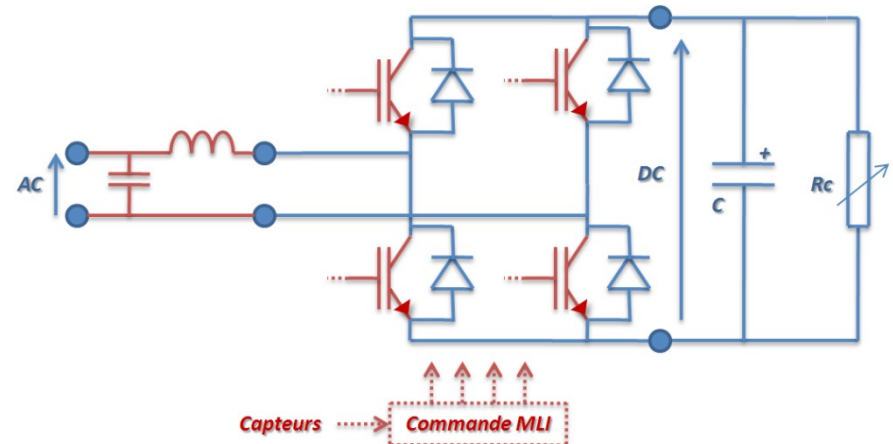
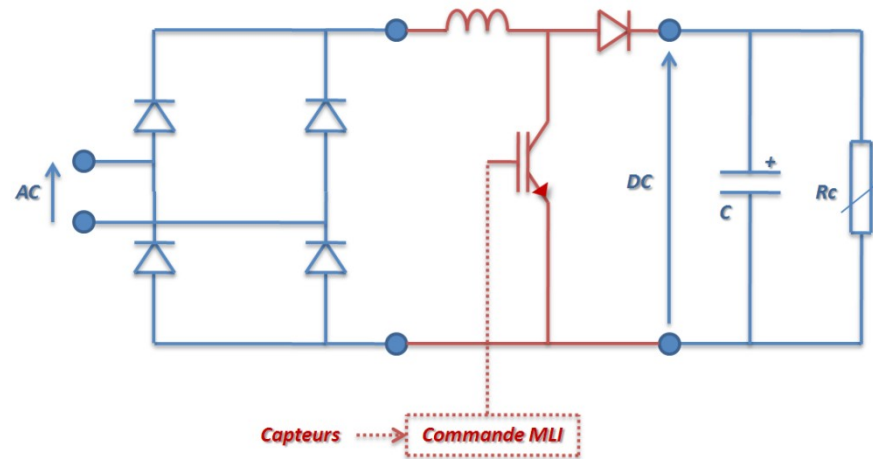
4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

2. Redresseurs-Commandé

Voici les deux principales structures
recontrôlées :



... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

3. MLI

*(Modulation par
Largeur d'Impulsion)*

3. MLI - Modulation par Largeur d'Impulsions

La **MLI** (Modulation par Largeur d'Impulsions) ou **PWM** (Pulse Width Modulation) est une technique très couramment rencontrée en Electronique de puissance afin de synthétiser des signaux analogiques à partir de signaux à états discrets. Les signaux de commandes TOR (Tout ou Rien) sont envoyés aux interrupteurs statiques.

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

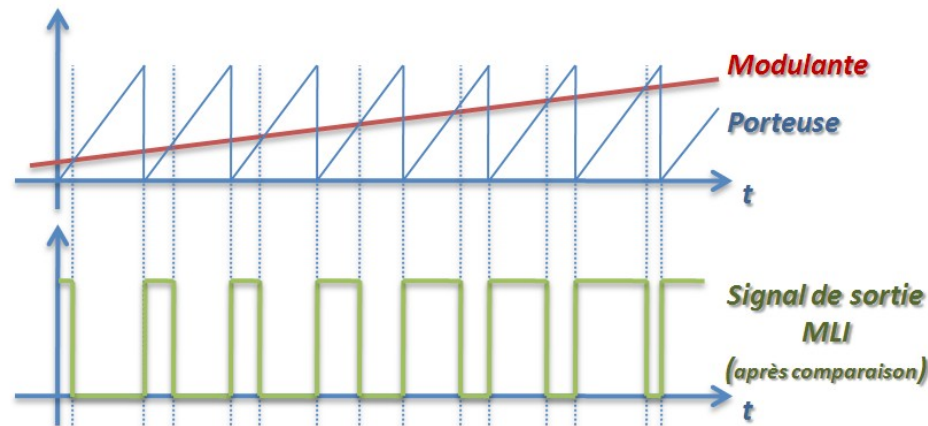
- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

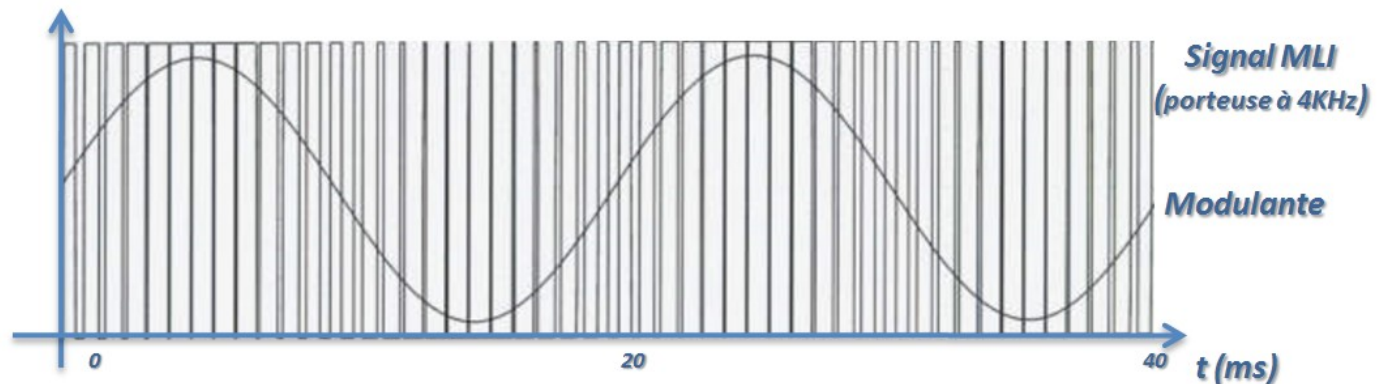


Période fixe mais rapport cyclique variable !

3. MLI - Modulation par Largeur d'Impulsions

Le type de modulation précédemment présentée est dite intersective. La porteuse est souvent réalisée à partir d'un signal triangulaire ou en dents de scie. Ce type de modulation peut aussi bien être analogique que numérique.

Observons un exemple de signal MLI. Le signal modulant est une sinusoïde à 50Hz et la porteuse un signal en dents de scie à 4KHz.



... à la découverte de
l'Électronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

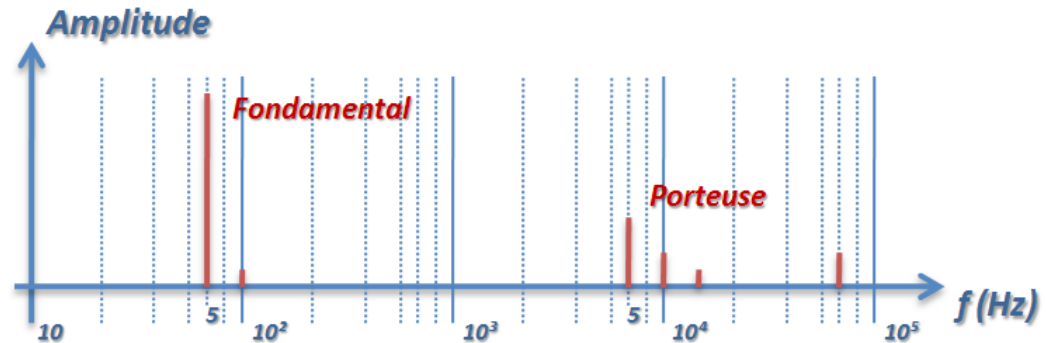
3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs

Observons l'allure du spectre du signal précédent avec une porteuse à 50KHz :



En travaillant à fréquence de découpage élevée, nous repoussons les raies parasites dans les hautes fréquences. Dans les limites technologiques (composants, CEM ...), nous chercherons le plus souvent à travailler à des fréquences de découpage élevées (IGBT - qq10KHz)



... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

The background is a deep blue with several translucent, flowing, ribbon-like shapes in lighter shades of blue and white. These shapes curve and swirl across the frame, creating a sense of motion and depth. The text '4. Hacheurs' is centered in the middle of the image.

4. Hacheurs

**... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance**

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs



**Cette partie n'a pas
encore été rédigée faute
de temps !!!**

The background is a deep blue with several translucent, flowing, ribbon-like shapes that curve and swirl across the frame, creating a sense of motion and depth. The text is centered in the middle of the image.

5. Onduleurs

5. Onduleurs

Un onduleur est en fait un hacheur 4 quadrants. Seule la loi de commande diffère. La référence de tension n'est plus une constante (comme pour un simple hacheur) mais une grandeur sinusoïdale.

... à la découverte de
l'Electronique de
Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

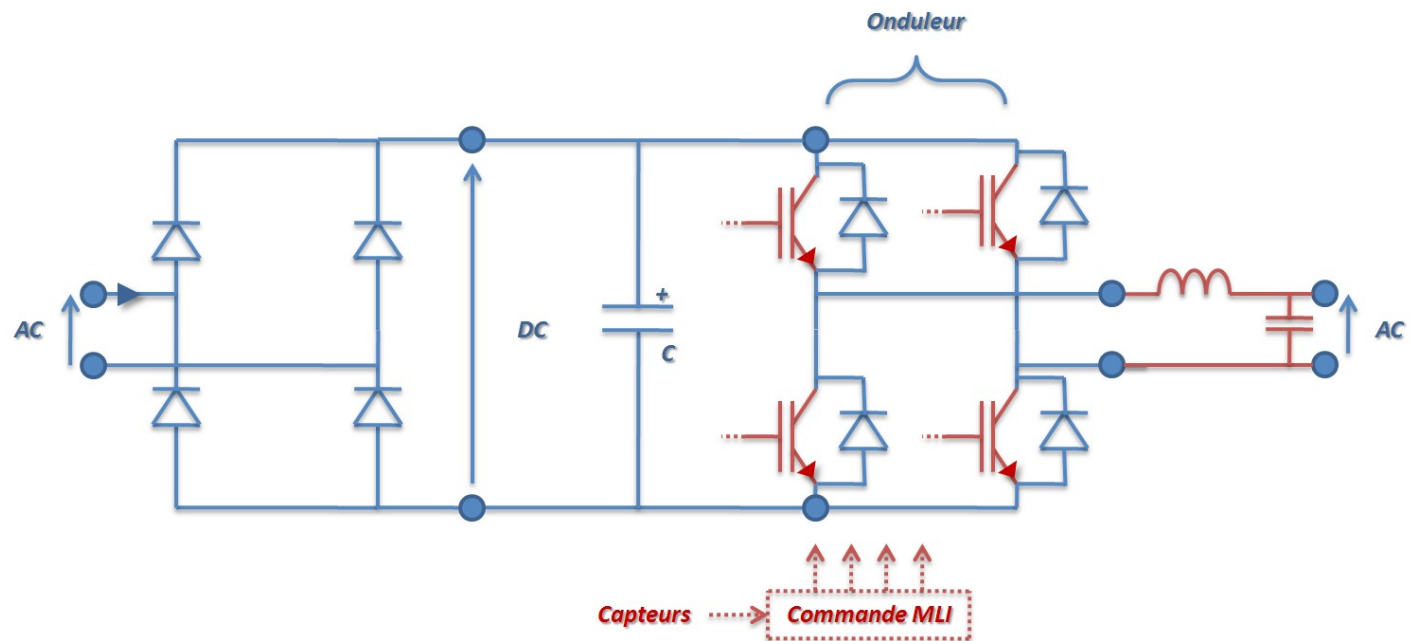
- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonnance

5. Onduleurs



The background is a deep blue with several translucent, flowing, ribbon-like shapes that curve and swirl across the frame, creating a sense of motion and depth. The text is centered in the middle of the image.

***Merci de
votre attention !***