



# CONVERTISSEURS STATIQUES

Cours

CPGE

Rappels de PTSI

v1.21

*Lycée Jean Zay - 21 rue Jean Zay - 63300 Thiers - Académie de Clermont-Ferrand*



## Compétences visées:

- A3-08** Analyser une association de pré actionneurs et d'actionneurs.
- B2-10** Choisir la nature des interrupteurs de la cellule de commutation.
- B2-11** Caractériser le comportement de l'association convertisseur, machine et charge associée en vue de caractériser la réversibilité de la chaîne d'énergie.
- B2-12** Identifier les quadrants de fonctionnement d'une chaîne d'énergie.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>L'électronique de puissance</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Les composants de l'électronique de puissance</b>	<b>4</b>
2.1	Notions de commutation . . . . .	4
2.2	Interrupteur idéal . . . . .	5
2.3	La diode . . . . .	5
2.3.1	Symbole et caractéristiques statiques . . . . .	5
2.3.2	Fonctionnement en interrupteur . . . . .	5
2.4	Le thyristor . . . . .	6
2.4.1	Symbole et caractéristiques statiques . . . . .	6
2.4.2	Fonctionnement en interrupteur . . . . .	6
2.5	Les transistors de puissance . . . . .	6
2.5.1	Symbole et caractéristiques statiques . . . . .	6
2.5.2	Fonctionnement en interrupteur . . . . .	7
2.6	Interrupteurs synthétisés . . . . .	7
2.7	Choix des interrupteurs . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Les hacheurs</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Les onduleurs</b>	<b>10</b>
4.1	Généralités . . . . .	10
4.2	Onduleur monophasé . . . . .	10
4.2.1	Principe . . . . .	10
4.2.2	Commande MLI . . . . .	10
4.3	Onduleur triphasé . . . . .	11

## 1 L'électronique de puissance

L'électronique de puissance a pour objet l'échange d'énergie entre au moins deux systèmes électriques. Pour cela, elle assure d'une part une **fonction de modulation** de l'énergie électrique en rendant compatibles les caractéristiques (fonction de la tension, du courant et de la fréquence) de ces deux systèmes et d'autre part (en général) **une fonction de contrôle** de cet échange d'énergie. C'est, par conséquent, une discipline qui correspond au traitement de l'énergie électrique (en combinant les aspects « conversion » et « contrôle »). Les dispositifs électriques permettant d'assurer ces fonctions portent le nom générique de **convertisseurs statiques** (on devrait d'ailleurs plutôt parler de **modulateurs d'énergie**).

Les fonctions de base de l'électronique de puissance trouvent leurs applications dans tous les domaines d'utilisation de l'électricité, c'est-à-dire dans toutes les industries et notamment dans la variation de vitesse des moteurs électriques.

Certains convertisseurs sont **réversibles**, c'est-à-dire qu'ils permettent de renvoyer l'énergie électrique de la charge vers la source en permutant les rôles de l'entrée et de la sortie. Si la charge est réversible (elle peut, par exemple, restituer de l'énergie : un train en descente) et qu'on souhaite récupérer cette énergie, la source d'entrée et le convertisseur devront l'être aussi.

Les applications de l'électronique de puissance couvrent une large gamme de puissance :



FIGURE 1 – Exemples d'applications de l'électronique de puissance

Les systèmes chargés de manipuler l'énergie électrique sont les **convertisseurs statiques** qui permettent d'adapter de manière **réversible ou non** la forme alternative ou continue de l'énergie entre le réseau et la charge.

Ces transformations apparaissent sous quatre formes pour lesquelles sont associés quatre types de convertisseurs :

- **redresseur** : conversion alternatif  $\rightarrow$  continu ;
- **hacheur** : conversion continu  $\rightarrow$  continu ;
- **onduleur** : conversion continu  $\rightarrow$  alternatif ;
- **gradataeur** : conversion alternatif  $\rightarrow$  alternatif ;

Les fonctions de base peuvent être utilisées seules ou associées entre-elles pour adapter les modes de conversion aux besoins de l'utilisateur.

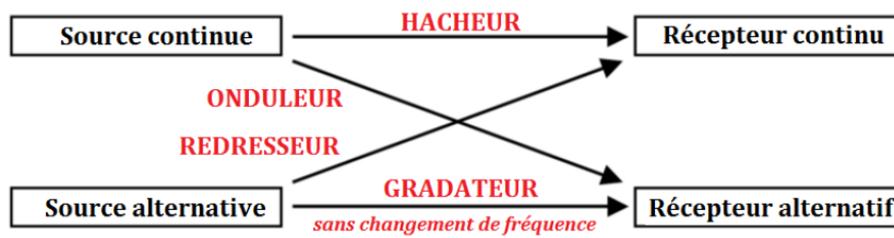


FIGURE 2 – Les différents types de convertisseurs statiques

## 2 Les composants de l'électronique de puissance

Puisqu'ils sont destinés à traiter de l'énergie, ces dispositifs doivent être le siège de pertes aussi faibles que possible, pour des raisons évidentes de rendement, mais aussi afin de minimiser le poids et le coût des dispositifs d'évacuation de ces pertes. Pour ce faire, les convertisseurs statiques utilisent des composants jouant le rôle d'interrupteurs électroniques (ouverts ou fermés) selon un principe de découpage complété par des circuits passifs de filtrage.

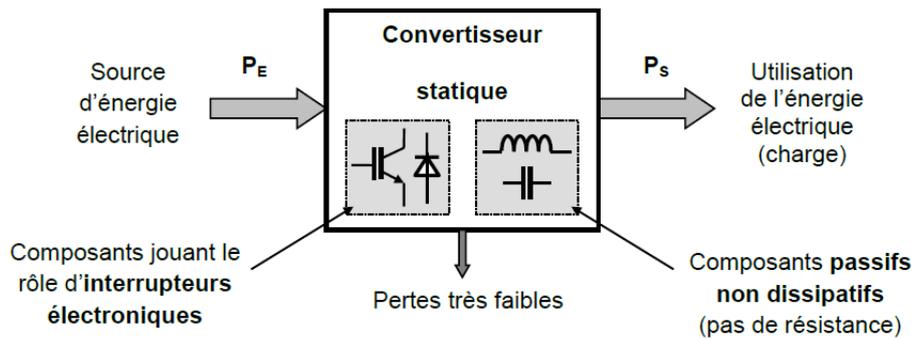


FIGURE 3 – Architecture générique d'un convertisseur statique

### 2.1 Notions de commutation

On distinguera deux régimes de fonctionnement pour les circuits :

- **régime statique** : on distinguera deux types de régimes statiques qui conduiront chacun à un type de commutation différent :
  - ◊ l'**état passant** : l'interrupteur est dit conducteur ou fermé, résistance très faible ( $R = 0$ ) ;
  - ◊ l'**état bloqué** : l'interrupteur est ouvert, résistance très grande ( $R \rightarrow \infty$ ).
- **régime dynamique** : entre ces deux états, il y a une commutation de mise en conduction ou de blocage suivant les cas.

On distinguera deux types de commutations qui se rencontreront sur les différents composants d'électronique de puissance (interrupteurs électroniques) :

- **commutations commandées** : l'interrupteur électronique possède en plus des deux électrodes principales une électrode de commande (mise en conduction, ou extinction, ou les deux).
- **commutations spontanées** : la condition de commutation ne dépend que des éléments du circuit externe au composant, commutation de type naturelle.

Les modes de commutation correspondant à chaque type de composant se déduisent alors des situations initiales et finales de celui-ci.

## 2.2 Interrupteur idéal

Un interrupteur idéal présente deux états correspondant aux deux caractéristiques ci-dessous.

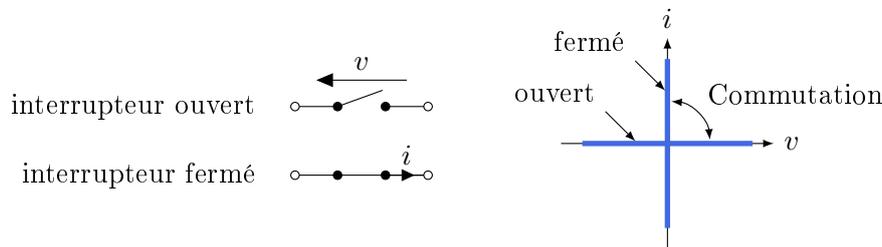


FIGURE 4 – Symbole et caractéristique statique idéale d'un interrupteur

Il possède les propriétés suivantes :

- supporte (bloque) des tensions directes ( $> 0$ ) ou inverses ( $< 0$ ) de valeur arbitraire avec un courant nul à l'état ouvert ;
- conduit des courants de valeur arbitraire avec des chutes de tension nulles à l'état fermé ;
- commute de façon instantanée de l'état fermé à l'état ouvert et réciproquement (sans perte d'énergie) ;
- nécessite une puissance nulle pour la commande.

## 2.3 La diode

### 2.3.1 Symbole et caractéristiques statiques

La diode est le semi-conducteur élémentaire constitué par une seule jonction PN.

Dans l'étude des convertisseurs, on substitue à la caractéristique réelle la caractéristique idéale en négligeant la chute de tension et le courant de fuite circulant en inverse. La diode joue alors le rôle d'un **interrupteur parfait, unidirectionnel en courant et en tension**.

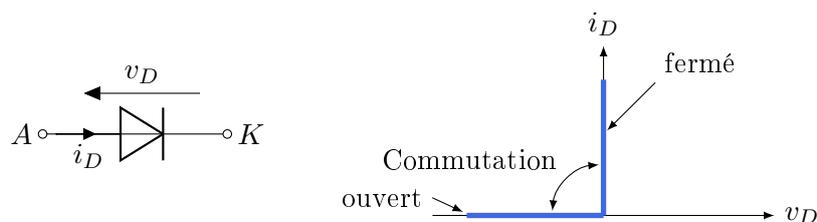


FIGURE 5 – Symbole et caractéristique statique idéale d'une diode

### 2.3.2 Fonctionnement en interrupteur

L'interrupteur diode est caractérisé par le fonctionnement suivant :

- il se **ferme** pour  $v_D = v_0 > 0$  (avec  $v_0$  tension de seuil de l'ordre du volt). Le courant  $i_D$  est alors imposé par le reste du circuit ;
- il s'**ouvre** dès que le courant  $i_D$  le traversant s'annule et reste ouvert quand  $i \leq 0$ . La tension peut prendre des valeurs élevées sous l'effet du reste du circuit.

## 2.4 Le thyristor

### 2.4.1 Symbole et caractéristiques statiques

Le thyristor est un semi-conducteur à 3 jonctions. Outre l'anode  $A$  et la cathode  $K$ , il est muni en plus d'une électrode de déblocage ou gâchette  $G$ .

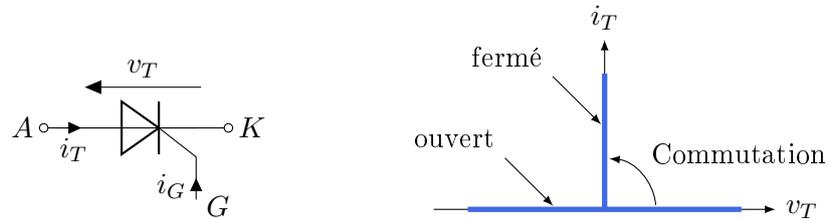


FIGURE 6 – Symbole et caractéristique statique idéale d'un thyristor

Ce composant **unidirectionnel en courant** mais **bidirectionnel en tension** permet de contrôler l'énergie électrique dans différents montages rencontrés électronique de puissance (gradateurs, redresseurs commandés,...)

### 2.4.2 Fonctionnement en interrupteur

L'interrupteur thyristor est caractérisé par le fonctionnement suivant :

- en l'absence de courant de gâchette  $i_G$ , il est **ouvert** quel que soit le signe de  $v_T$  ;
- **amorçage** : lorsque  $v_T > 0$ , il se **ferme** si on envoie une **impulsion de courant**  $i_G$  dans la gâchette. Après l'amorçage, la gâchette perd son pouvoir de contrôle (le courant  $i_G$  peut être supprimé).
- **blocage (désamorçage)** : une fois amorcé, l'interrupteur s'ouvre si  $i_T \leq 0$ , quelque soit  $v_T$ .

## 2.5 Les transistors de puissance

### 2.5.1 Symbole et caractéristiques statiques

Un transistor est un interrupteur commandé à deux segments de même signe. En plus de ces électrodes principales, un transistor possède une électrode de commande sur laquelle il est possible d'agir pour provoquer son changement d'état de façon quasi-instantanée.

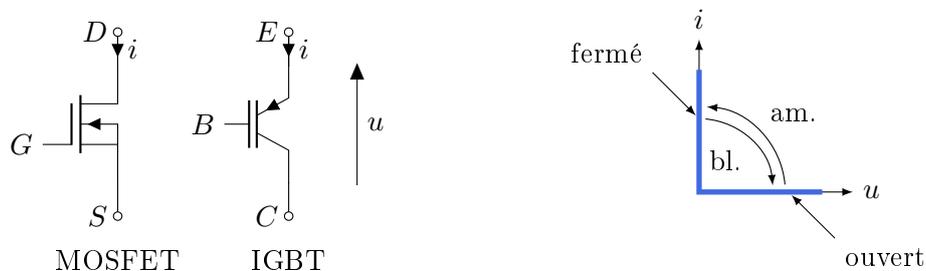


FIGURE 7 – Symbole et caractéristique statique idéale des transistors MOSFET et IGBT

On retrouve plusieurs technologies remplissant globalement la même fonction. Dans le cadre de ce rappel de cours, nous ne nous intéresseront qu'aux transistors MOSFET (transistor à effet de champ, Métal Oxyde Semi Conducteur) et IGBT (transistor bipolaire à grille isolée, Insulated Gate Bipolar Transistor). Ce sont tous deux des composants **unidirectionnels en tension** et en **courant**.

### 2.5.2 Fonctionnement en interrupteur

L'interrupteur transistor est caractérisé par le fonctionnement suivant (cas du MOSFET) :

- il se **ferme** pour  $v_{GS} > V_{th} > 0$  (tension de seuil - threshold voltage). Cette tension **doit être maintenue** pendant tout l'intervalle de conduction du transistor mais aucun courant  $i_G$  ne circule.
- il s'**ouvre** pour  $v_{GS} < V_{th}$ .



#### Remarque

Pour le transistor IGBT, le comportement est sensiblement différent, dans le sens où un IGBT est commandé en courant (par le courant  $i_B$ ).

## 2.6 Interrupteurs synthétisés

Il est possible de synthétiser un interrupteur à 3 segments en associant un transistor (MOSFET ou IGBT) avec une diode.

Une association **série** permet d'avoir une **réversibilité en tension** et une association **antiparallèle** permet d'avoir une **réversibilité en courant**.

L'association antiparallèle est appelée le transistor dual. C'est le composant utilisé dans les hacheurs réversibles et les onduleurs de tension.

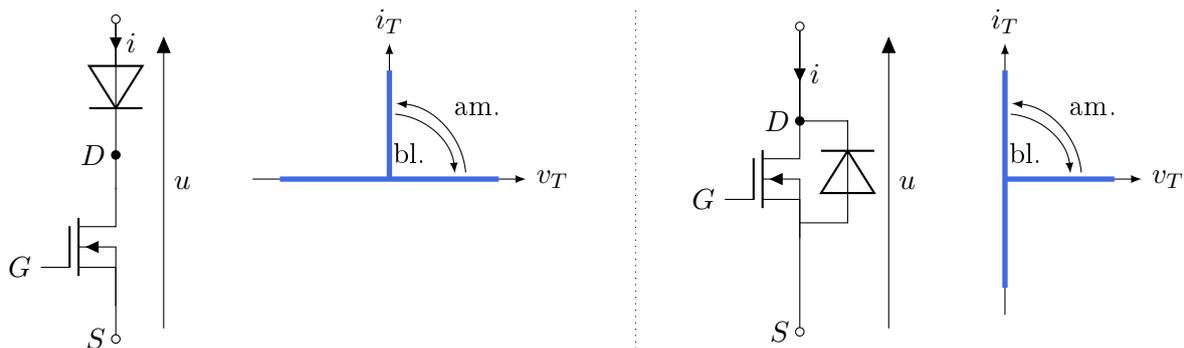


FIGURE 8 – Association série et antiparallèle d'un transistor MOSFET avec une diode et caractéristiques statique idéales associées

## 2.7 Choix des interrupteurs

Selon le composant utilisé, la fréquence de « découpage »  $f = \frac{1}{T}$  à laquelle est soumis le composant change. En général, on cherche à utiliser la fréquence la plus élevée possible.

Cependant, plus la puissance nominale  $P_n$  d'un convertisseur est élevée, plus cette fréquence est faible.

La FIGURE 9 ci-après présente un diagramme à échelle logarithmique des domaines d'utilisation de chaque composant.

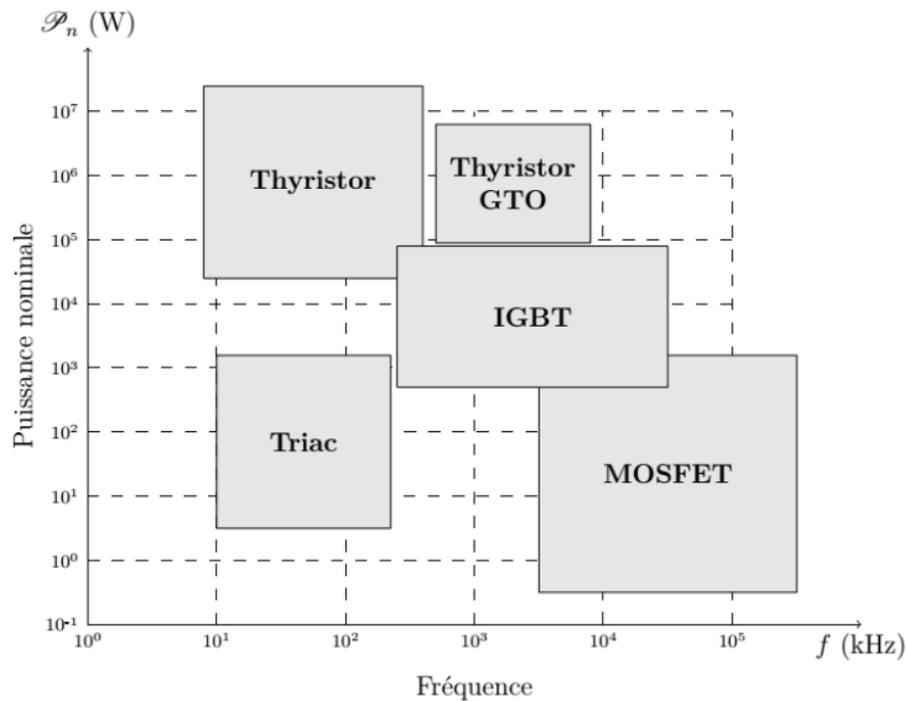
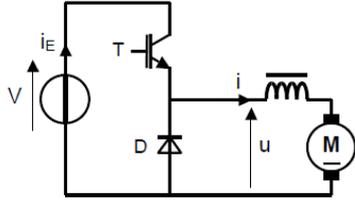
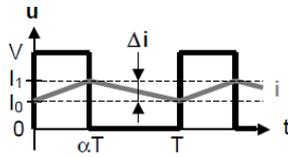
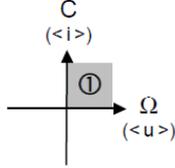
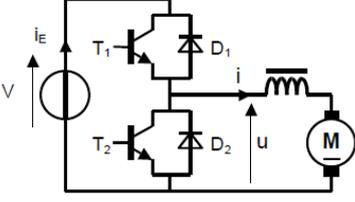
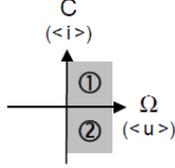
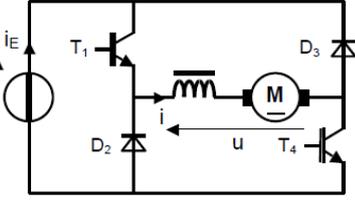
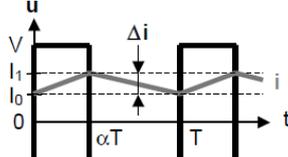
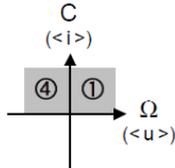
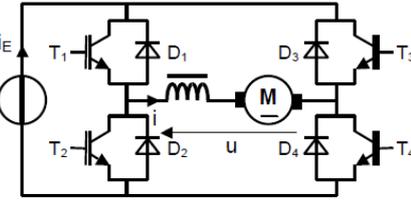
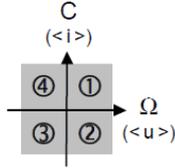


FIGURE 9 – Diagramme puissance-fréquence des composants

### 3 Les hacheurs

	Structure	Formes d'ondes Relations fondamentales	Quadrants de fonctionnement
Hacheur série	 <p>[ 0 ; <math>\alpha T</math> ] : T passant - D bloquée [ <math>\alpha T</math> ; T ] : T bloqué - D passante</p>	 <p>Pour le hacheur série :</p> $i > 0$	 <p>1 sens de rotation sans freinage (par récupération d'énergie)</p>
Hacheur réversible en courant	 <p>Commande complémentaire des IGBTs</p>	<p>Pour le hacheur réversible en courant :</p> $i > 0 \text{ ou } i < 0$ <p>Dans les deux cas :</p> $\langle u \rangle = \alpha \cdot V$ $\Delta i = \frac{\alpha(1-\alpha) \cdot V \cdot T}{L}$	 <p>1 sens de rotation avec freinage</p>
Hacheur réversible en tension	 <p>[ 0 ; <math>\alpha T</math> ] : T<sub>1</sub>, T<sub>4</sub> passants - D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> bloquées [ <math>\alpha T</math> ; T ] : T<sub>1</sub>, T<sub>4</sub> bloqués - D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> passantes</p>	 <p>Pour le hacheur réversible en tension :</p> $i > 0$	 <p>2 sens de rotation avec freinage à "vitesse constante" dans un sens (descente d'un treuil)</p>
Hacheur réversible en courant et en tension	 <p>Commande complémentaire des IGBTs</p>	<p>Pour le hacheur réversible en courant et en tension :</p> $i > 0 \text{ ou } i < 0$ <p>Dans les deux cas :</p> $\langle u \rangle = (2\alpha - 1) \cdot V$ $\Delta i = \frac{2\alpha(1-\alpha) \cdot V \cdot T}{L}$	 <p>2 sens de rotation avec freinage</p>



### Remarque

Dans toutes les structures proposées, les IGBTs peuvent être remplacés par des transistors MOS de puissance.

## 4 Les onduleurs

### 4.1 Généralités

L'objectif d'un onduleur est de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue.

Il utilise la technologie des interrupteurs de la même manière qu'un hacheur 4 quadrants. C'est grâce à une loi de commande particulière qu'il permet d'obtenir un signal sinusoïdal.

### 4.2 Onduleur monophasé

#### 4.2.1 Principe

Nous prendrons le cas d'une charge  $R, L$  qui est le cas d'un enroulement d'une phase d'un moteur asynchrone ou synchrone.

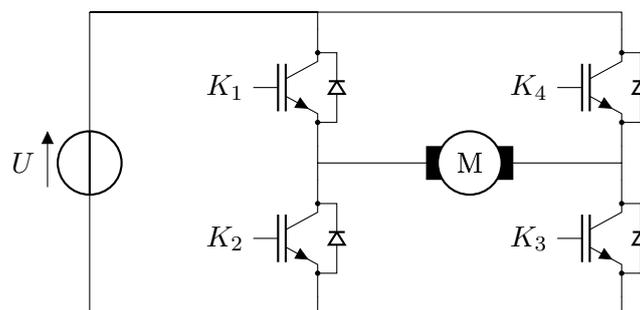


FIGURE 10 – Onduleur monophasé

$K_1$  à  $K_4$  sont des interrupteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (transistor bipolaire, transistor MOS, transistor IGBT, GTO, thyristor avec circuit d'extinction).

#### 4.2.2 Commande MLI

Il s'agit d'une commande symétrique (pas de décalage) présentant un grand nombre de commutations par période avec des ouvertures et des fermetures d'interrupteurs de durées modulées. La tension de sortie  $v_s$  (tension de charge) présente alors des « impulsions » de largeurs variables (**Modulation de Largeur d'Impulsion**).

Un signal modulé est envoyé à l'onduleur afin d'obtenir le signal souhaité. Ce modulé est défini à partir de la comparaison du modulant et d'un signal triangulaire de même amplitude (porteuse) :

- modulant **au dessus** : le modulé vaut **1** ;
- modulant **en dessous** : le modulé vaut **0**.

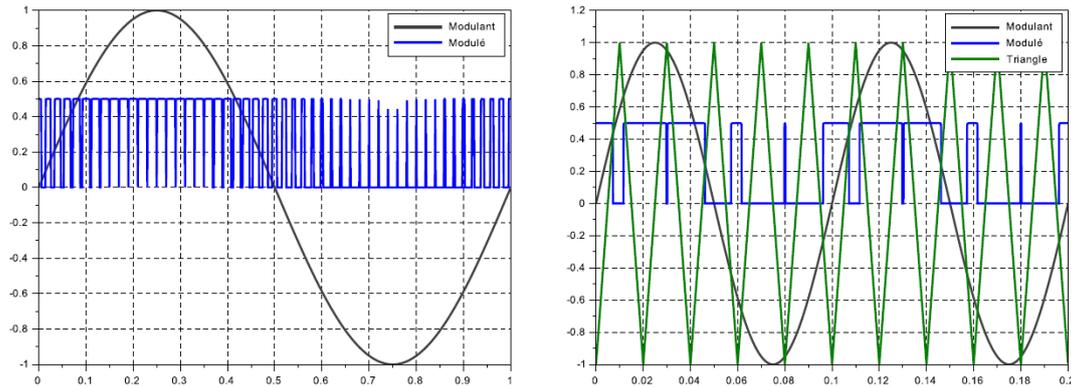


FIGURE 11 – Génération du signal modulé

La simulation Scilab suivante présente un exemple d'allure de  $v_s$  et de  $i$  en fonction du modulé.

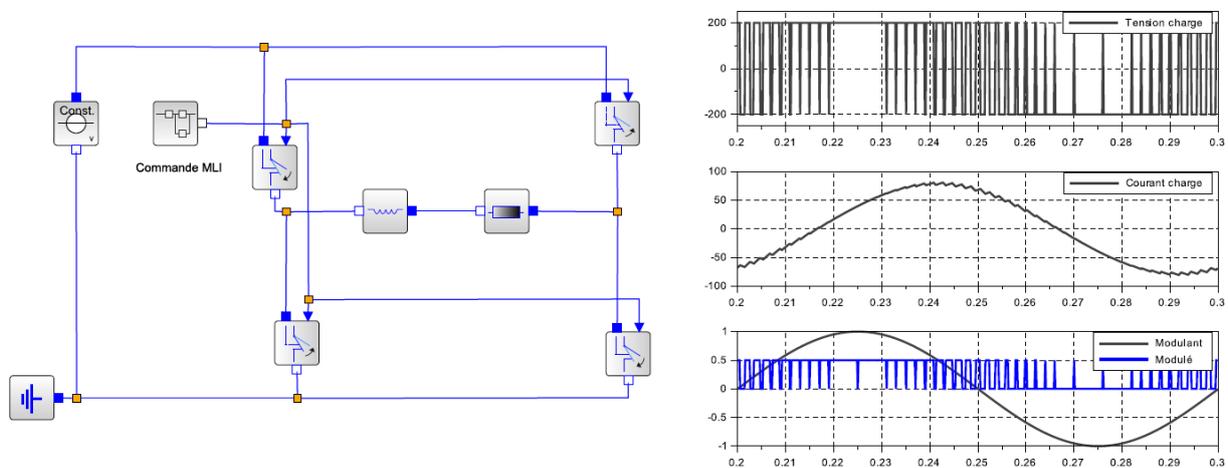


FIGURE 12 – Simulation avec Scilab

On remarque alors que :

- la forme de la **tension** est la même que celle du signal modulé,
- la forme du **courant** est lissée par la bobine.

### 4.3 Onduleur triphasé

Un onduleur triphasé peut être utilisé pour l'alimentation d'un moteur triphasé, comme le moteur brushless, très utilisé en modélisme. Chaque entrée du moteur est connectée à une source de tension, ces phases étant déphasées de  $\varphi = \frac{2\pi}{3}$ .

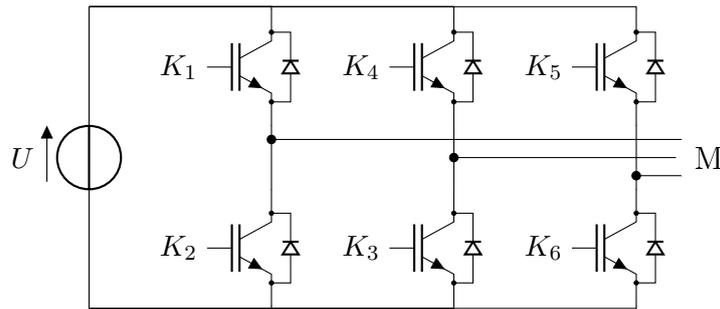


FIGURE 13 – Onduleur triphasé

La mesure de la **tension** et du **courant** dans chacune des bobines d'un moteur alimenté par un onduleur triphasé est présentée sur le résultat de simulation ci-dessous.

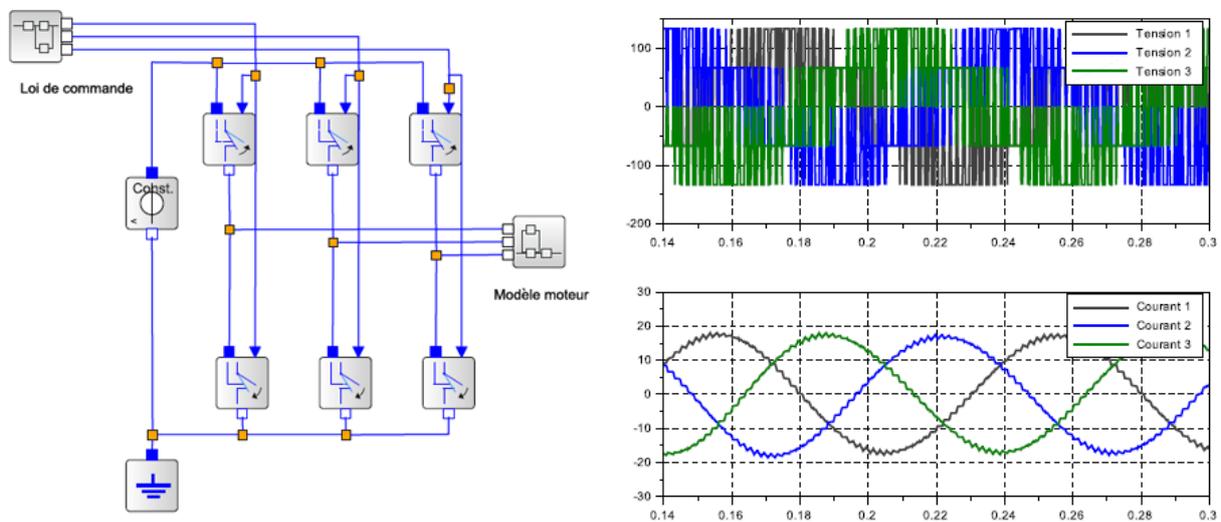


FIGURE 14 – Simulation avec Scilab

On constate que les formes des tensions et courants correspondent bien à celles présentées précédemment.

## Références

- [1] C. FRANÇOIS : *Génie électrique - Cours complet illustré*. Ellipses, 2004.
- [2] R. COSTADOAT : *Cours de sciences de l'ingénieur*, 2017. PTSI - Lycée Dorian - Paris.
- [3] S. GERGADIER : *Cours de génie électrique*, 2014. TSI2 - Lycée Richelieu - Rueil-Malmaison.
- [4] F. GOSSE : *Cours de sciences de l'ingénieur*, 2016. PT\* - Lycée Baggio - Lille.
- [5] F. MOTARD : *Cours de sciences de l'ingénieur*, 2017. PT\* - Lycée Eiffel - Bordeaux.