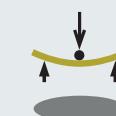
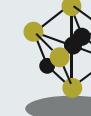
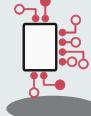


# Chapitre 6

# Convertisseurs



Nous traitons dans ce chapitre uniquement des convertisseurs électro-électriques, dont l'objectif est de convertir un signal électrique ayant certaines caractéristiques (AC ou DC, tension, fréquence, ...) en un autre signal électrique avec d'autres caractéristiques.

Les convertisseurs électro-mécaniques (machines électriques) sont plutôt dédiés à la production d'énergie électrique et ont leur chapitre dédié (Ch5. Machines électriques).

Les convertisseurs électro-chimiques (batterie) sont plutôt dédiés au stockage et seront abordés dans le chapitre sur ce thème (Ch7. Stockage).

# COMPOSANTS DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE



## Composants

L'**électronique de puissance** est un sous-domaine de l'électronique qui traite spécifiquement du transfert et de la conversion d'énergie électrique.

Ses principales considérations (en comparaison à l'électronique basse puissance) sont la tenue en courant et la tenue en tension des composants.

Bien que les technologies soient différents, on retrouve les mêmes types de composants :

- Passifs (avec un rôle de stockage) : bobines et condensateurs.
- Semi-conducteurs (avec un rôle d'interrupteur) : diodes, transistors et thyristors.

## Composant passif : la bobine

La **bobine** a pour rôle le stockage d'énergie par conversion électro-magnétique.

Pour les applications de puissance, plusieurs éléments sont à prendre en compte lors de la conception :

- La section des câbles doit permettre le passage de courant d'une grande intensité
- La disposition des spires doit permettre l'évacuation de la chaleur
- L'isolant et la disposition des spires doivent empêcher l'apparition d'arc électrique (tension entre spire)



Bobine avec noyau



Bobine haute précision



Bobine HVAC

## Composant passif : le condensateur

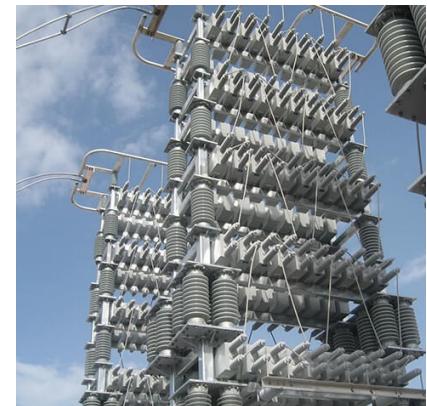
Le **condensateur** a pour rôle le stockage d'énergie par conversion électro-statique.

Pour les applications de puissance, plusieurs éléments sont à prendre en compte :

- La distance entre les électrodes et le matériau diélectrique doivent permettre d'éviter le claquage (et donc l'apparition de court-circuit)
  - Soupape de sécurité pour éviter l'explosion en cas de court-circuit
- Limiter la résistance série pour réduire l'échauffement du condensateur



High-voltage  
capacitor bank



## Interrupteur statique

Les **interrupteurs statiques** sont des composants à **semi-conducteur** dont le rôle est de permettre le passage ou le blocage du courant électrique.

Ils sont appelés ainsi en opposition aux interrupteurs électro-mécaniques (relais), qui ont une partie mobile.

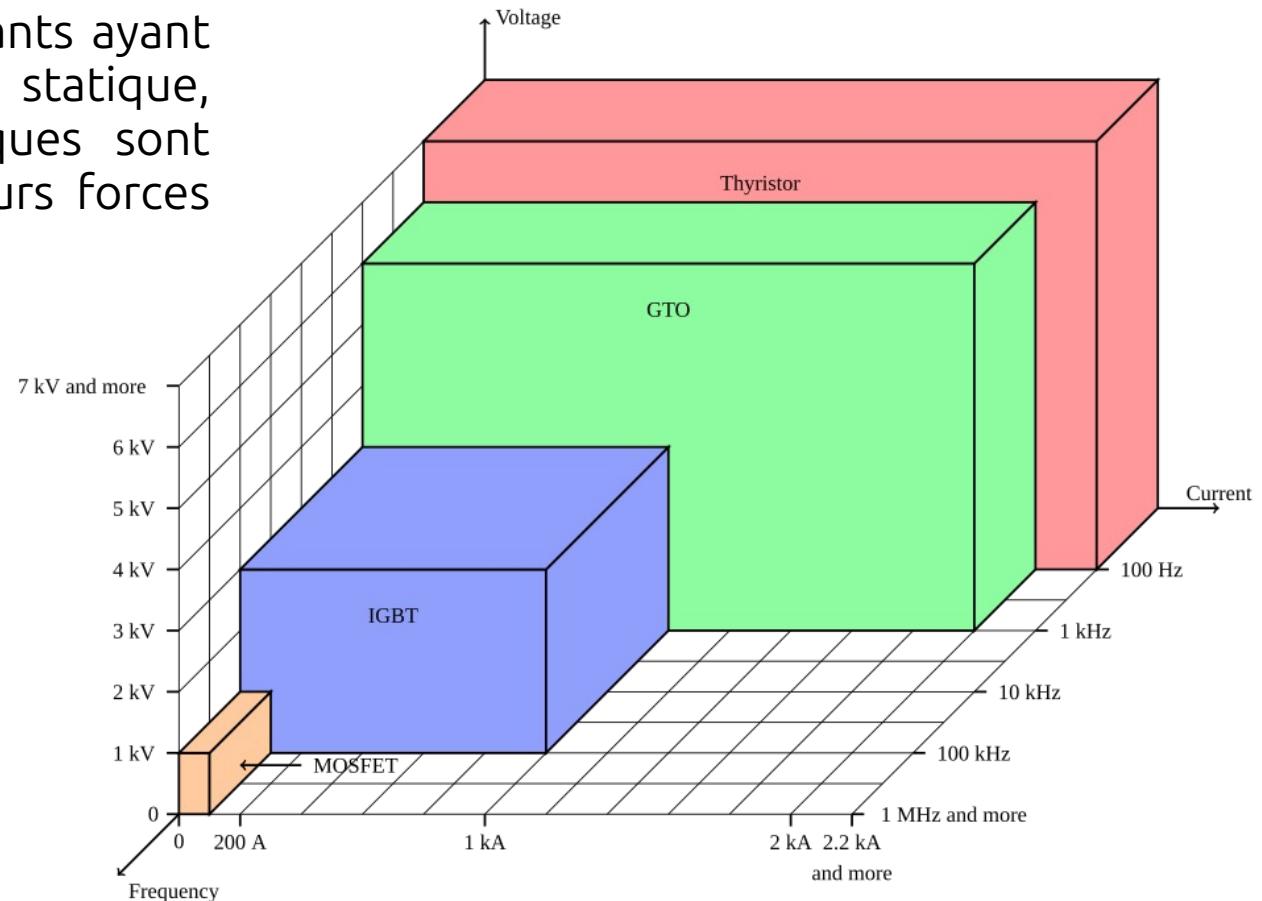
On distingue :

- Les interrupteurs non-commandés : diodes
  - La fermeture et l'ouverture du circuit dépendent uniquement des conditions électriques à l'instant  $t$ .
- Les interrupteurs commandés : transistors (BJT, MOS, IGBT) et GTO
  - La fermeture et l'ouverture du circuit sont contrôlées par un signal de commande
- Les interrupteurs semi-commandés : thyristors, triacs
  - L'ouverture est contrôlée par un signal de commande mais la fermeture est imposée par les conditions électriques à l'instant  $t$ .

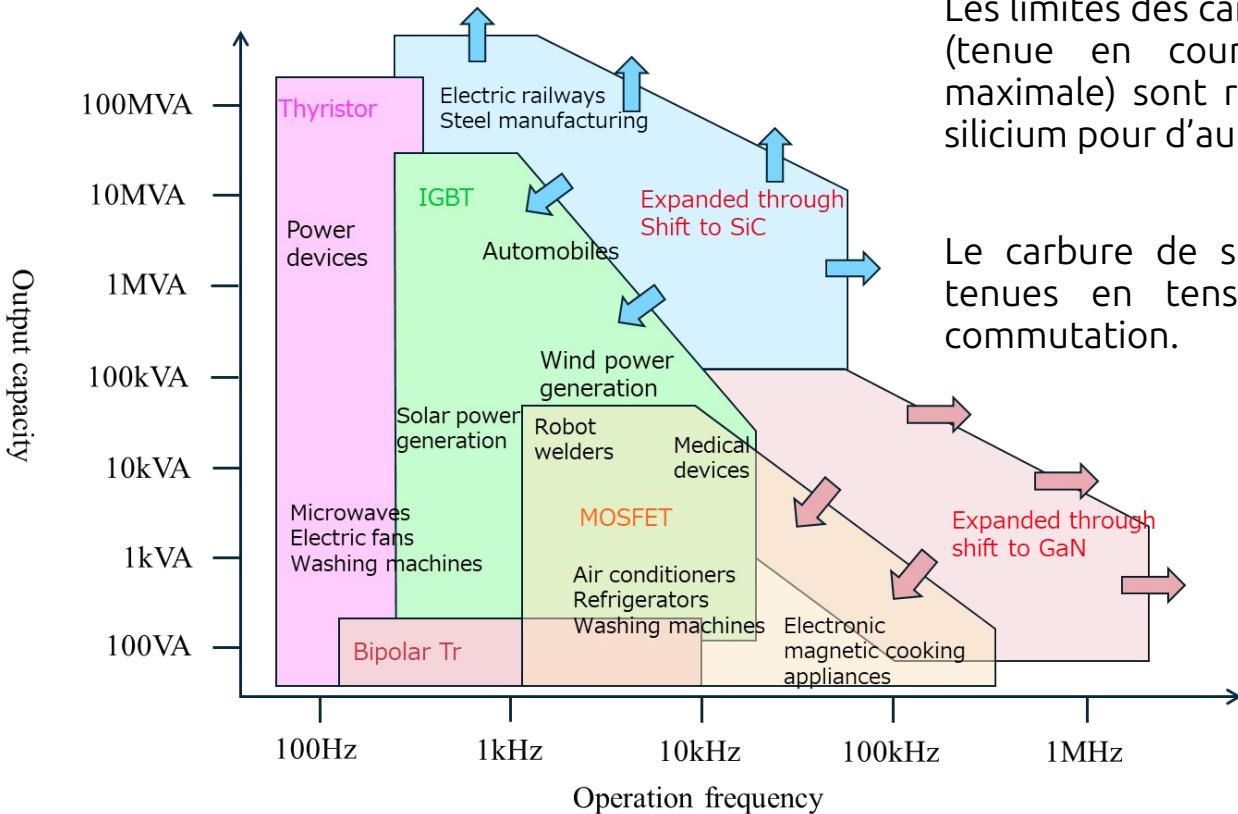
## Interrupteur statique

S'il existe autant de composants ayant le même rôle d'interrupteur statique, c'est que leurs caractéristiques sont différentes, chacune avec leurs forces et faiblesses.

Typiquement on retrouvera les thyristors dans des applications à très forte puissance mais faible fréquence (ex. convertisseur HVDC) alors que les MOSFET seront rencontrés à plus haute fréquence mais plus faible puissance (ex. convertisseur DC-DC).



## Interrupteur statique



Les limites des caractéristiques critiques des composants (tenue en courant, tenue en tension, fréquence maximale) sont repoussées en troquant le traditionnel silicium pour d'autres matériaux semi-conducteurs.

Le carbure de silicium (SiC) permet de plus grandes tenues en tension et jouit de faibles pertes de commutation.

Le nitrate de gallium (GaN) est capable d'une très grande fréquence de commutation.

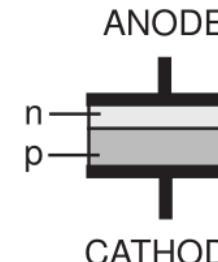
À noter que l'état de l'art ne fait part d aucun autre matériau intéressant pour la puissance.

## Interrupteur statique : la diode

La **diode** est un interrupteur non-commandé :

- si  $V_F > V_{th}$  alors la diode est passante
- Sinon la diode est bloquée ( $I_F = 0 \text{ A}$ )

Elle est construite à partir d'une jonction PN.



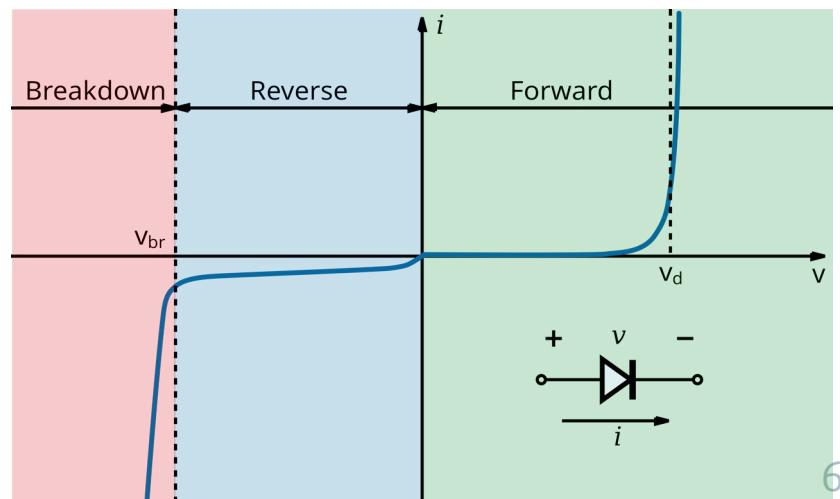
Structure simplifiée

Cas d'utilisation :

Redresseur AC/DC (en : *rectifier*), alimentation à découpage (hacheur), protection.

Alternative, la diode Schottky :

Plus rapides et plus faible tension de seuil (mieux pour du redresseur), mais tension limitée (60-100 V), grande capacité interne et courant de fuite important



# COMPOSANTS DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

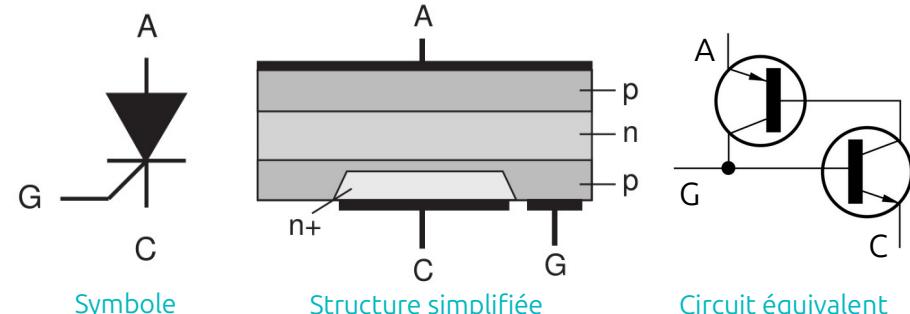
## Interrupteur statique : la diode



## Interrupteur statique : le thyristor (SCR)

Le **thyristor** se comporte comme une diode au détail près que la conduction est pilotée par un courant de gâche :

- L'entrée en conduction se fait pour  $V_F > V_{th}$  et  $I_G > 0$
- Le blocage se produit à  $V_F < 0$  (non commandée)

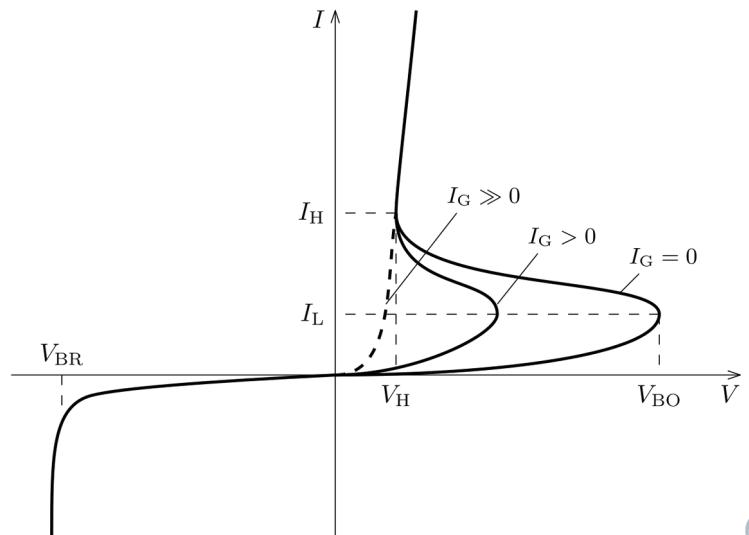


## Cas d'utilisation :

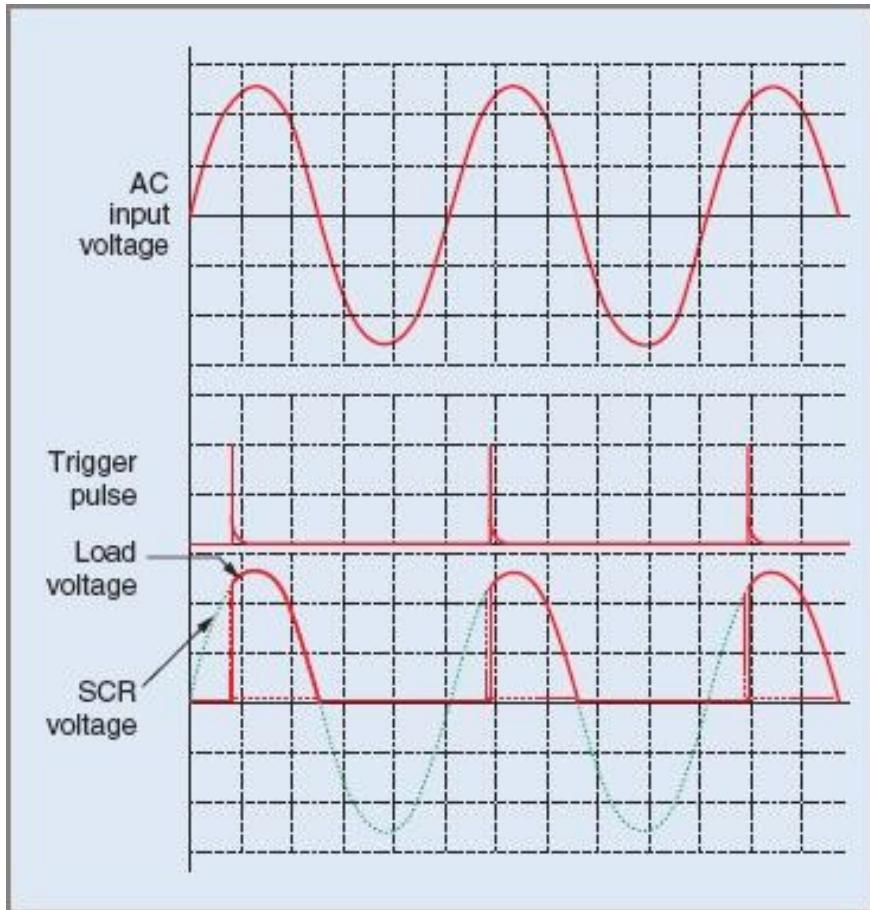
Assez rare car l'ouverture du composant n'est pas commandée, hormis en très grandes tensions.

Redresseur double-alternance commandé.

En anglais le thyristor s'appelle SCR (*Silicon Controlled Rectifier*).

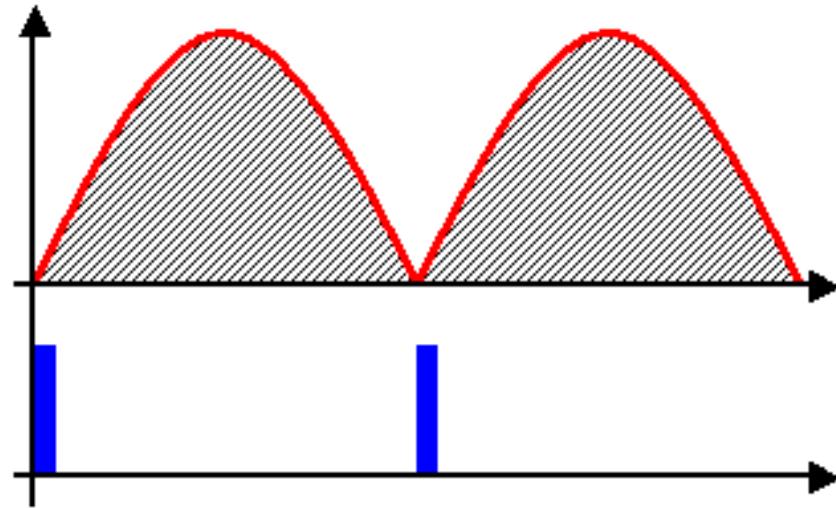


## Interrupteur statique : le thyristor (SCR)



Le thyristor entre en conduction si  $V_F > V_{th}$  et si  $I_G > 0$  (pas besoin de maintenir le courant de gâche, une impulsion suffit).

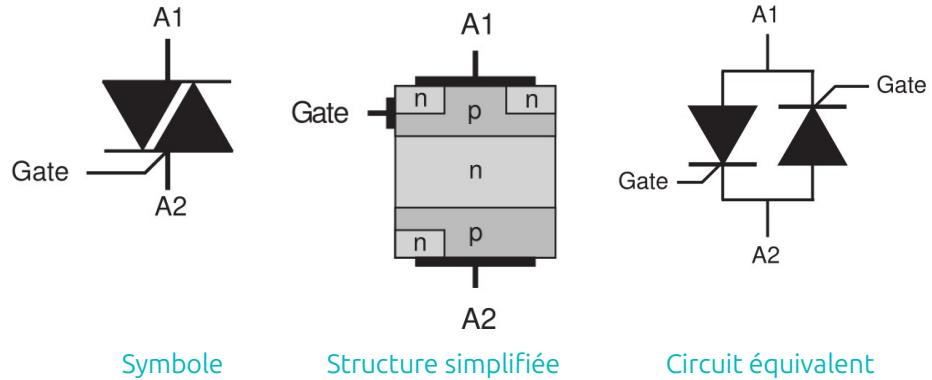
Le blocage se produit dès que  $V_F < V_{th}$ .



## Interrupteur statique : le TRIAC

Le **TRIAC** est une association de deux thyristors montés tête-bêche, avec une gâche commune.

- Si  $|V_F| > |V_{th}|$  et  $I_G > 0$ , l'un des deux thyristors entre en conduction.
- Si  $|V_F| > |V_{th}|$  les deux thyristors sont bloqués.

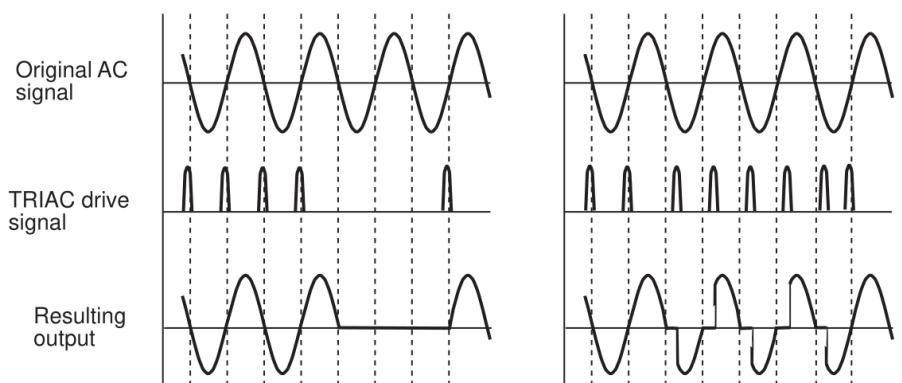


## Cas d'utilisation :

Pas cher → beaucoup d'utilisation bon marché nécessitant un contrôle du courant.

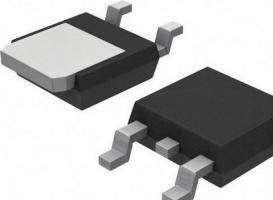
Très grande tenue en tension et courant → variateurs très fortes puissances, réseaux électriques et convertisseurs HVDC

En anglais TRIAC signifie *Triode for Alternating Current*.



# COMPOSANTS DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

## Interrupteur statique : le TRIAC

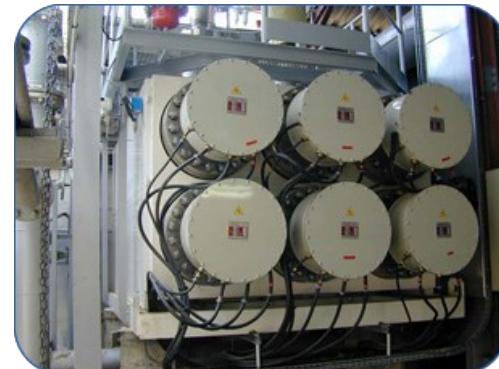


IFA 2000 station de HVDC France-Angleterre



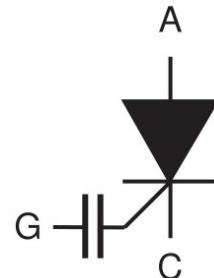
Thalassa, de IFREMER

Chauffeur d'air de TATT

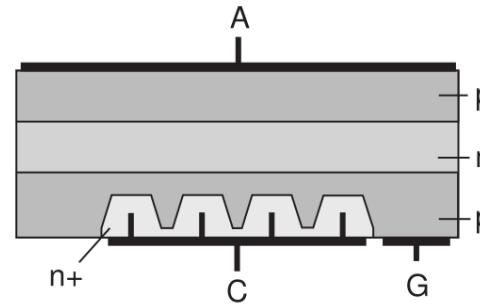


## Interrupteur statique : le GTO

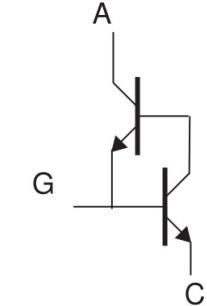
Le **GTO (Gate Turn-Off Thyristor)** est une variante de thyristor qui est pilotable à la conduction (fermeture) et au blocage (ouverture).



Symbole



Structure simplifiée



Circuit équivalent

## Cas d'utilisation :

Variateurs de vitesse, notamment ferroviaire.

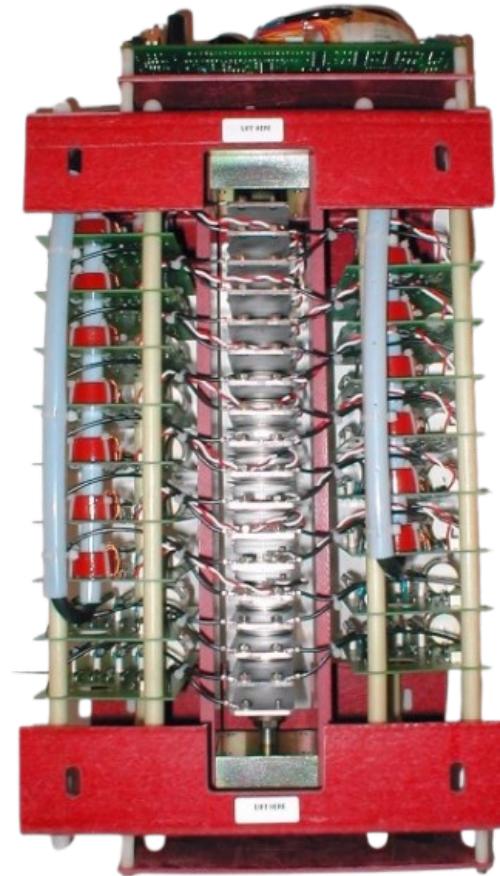
Progressivement remplacé par les IGBT.

# COMPOSANTS DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

## Interrupteur statique : le GTO



GTO Littelfuse  
1.2 kV – 4.5 kV  
400 A – 4 kA



GTO 6000 V, 6000 A

Empilement de GTO Littelfuse  
pour arriver à 20 kV et 4.5 kA.

## Interrupteur statique : le transistor bipolaire (BJT)

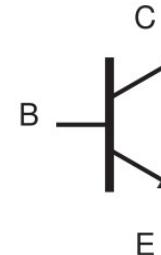
Le **transistor bipolaire (Bipolar Junction Transistor)** est un interrupteur commandé par le courant de base.

Utilisé uniquement en commutation dans les applications d'électronique de puissance.

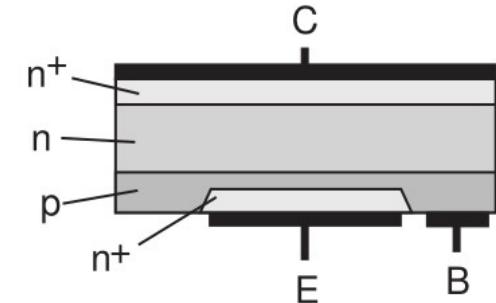
### Cas d'utilisation :

Obsolète et assez rare en puissance car lent et nécessite des drivers complexes.

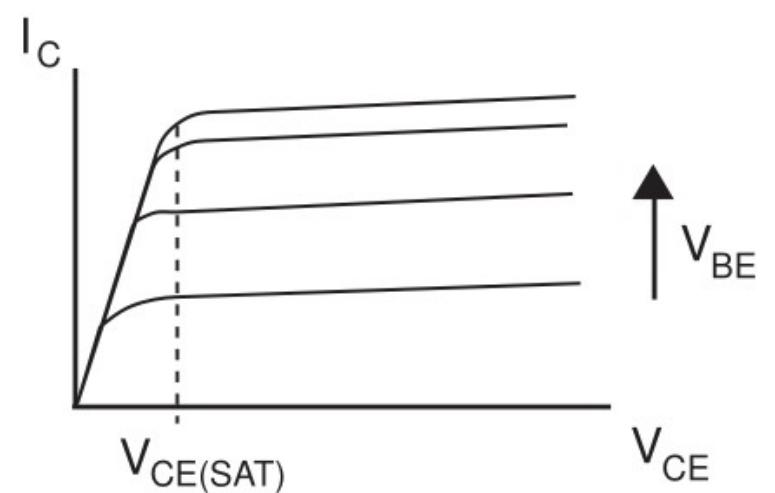
Utilisé dans des applications faible puissance bas marché pour remplacer les MOSFET ou IGBT.



Symbol



Structure simplifiée



## Interrupteur statique : le MOSFET

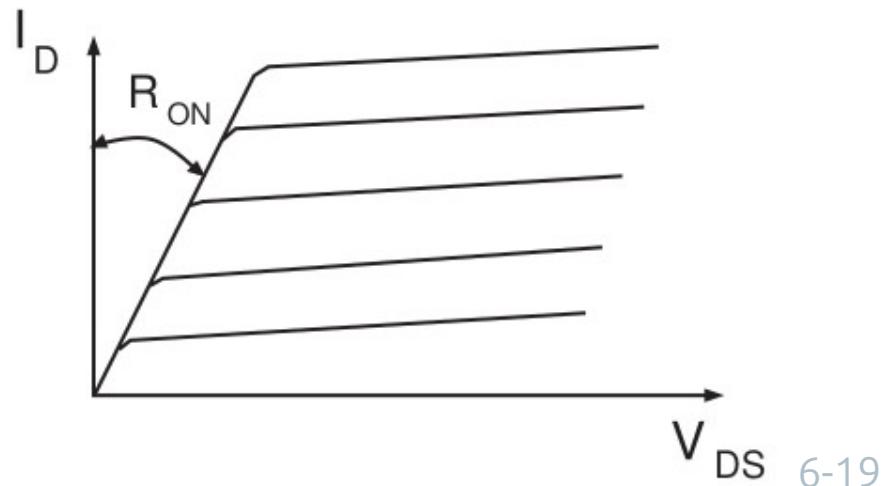
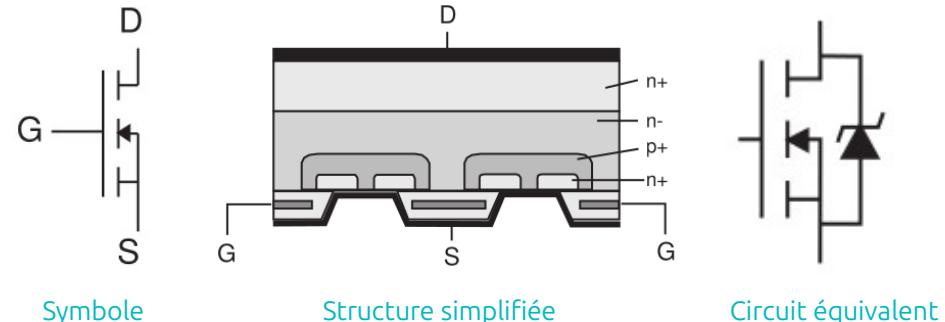
Le **MOSFET** (*Metal-Oxyde-Semiconductor Field Effect Transistor*) est un interrupteur commandé par la tension de grille.

Utilisé uniquement en commutation dans les applications d'électronique de puissance.

### Cas d'utilisation :

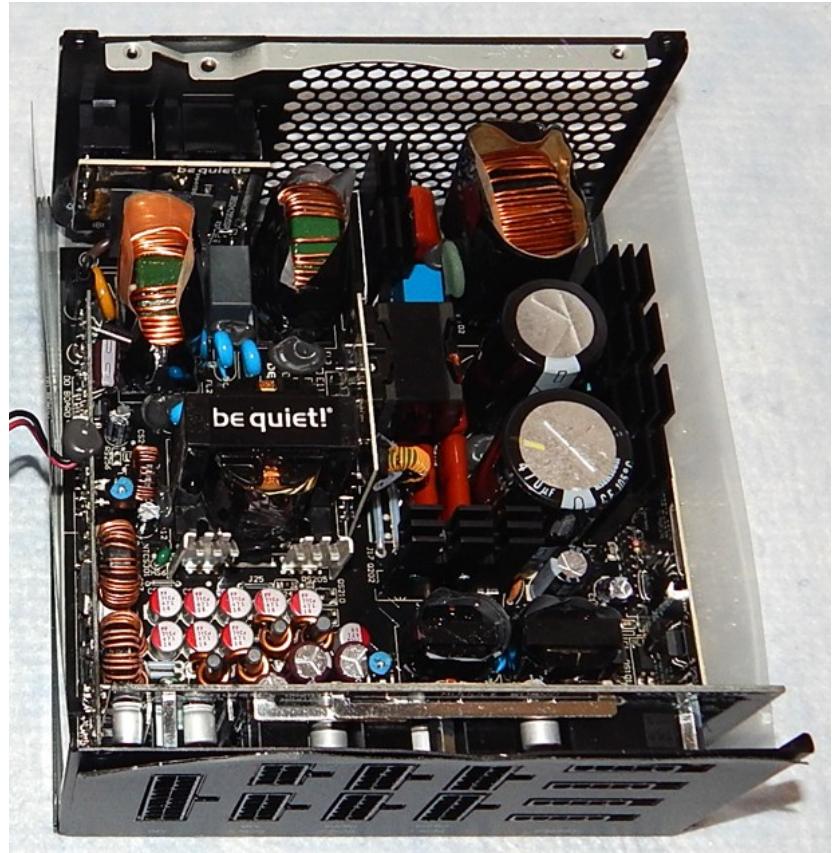
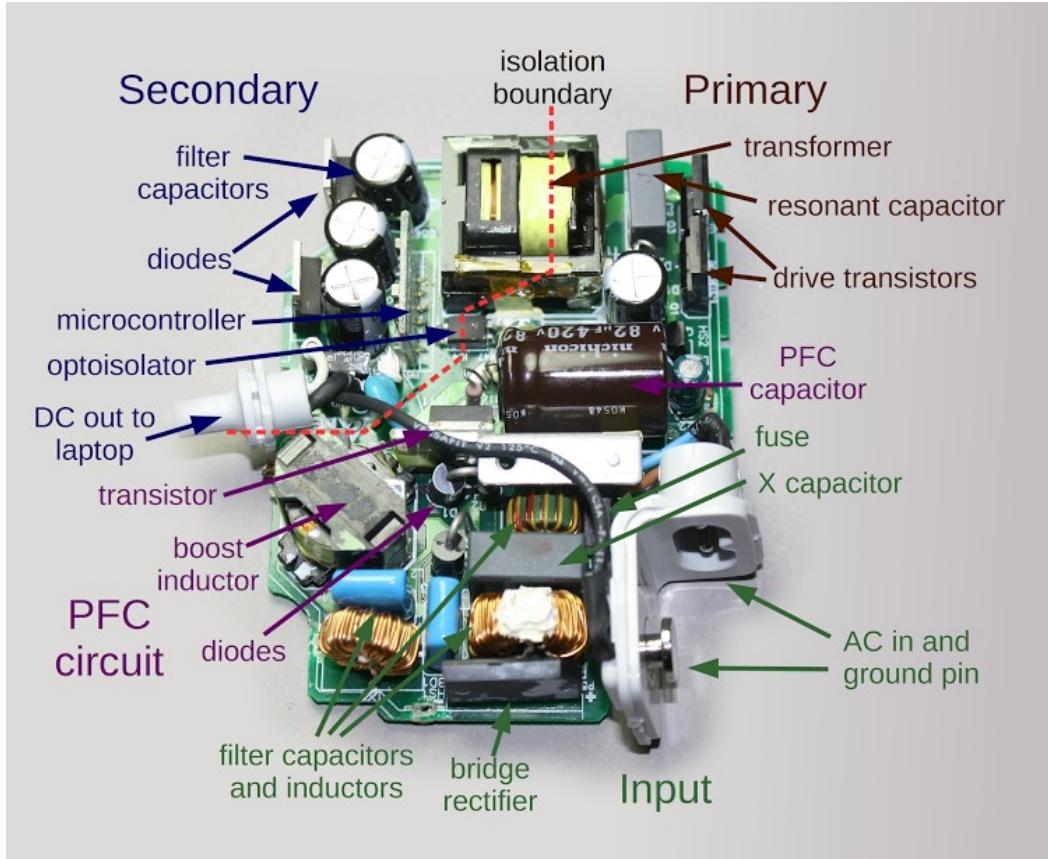
Applications moyenne puissance et haute fréquence, telles que alimentations à découpage (hacheurs), convertisseurs DC/DC,

Ou en tant que relai statique dans des applications embarquées (automobile).



# COMPOSANTS DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

## Interrupteur statique : le MOSFET



## Interrupteur statique : le transistor IGBT

**L'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)** est un transistor bipolaire dont la base est pilotée par un MOSFET.

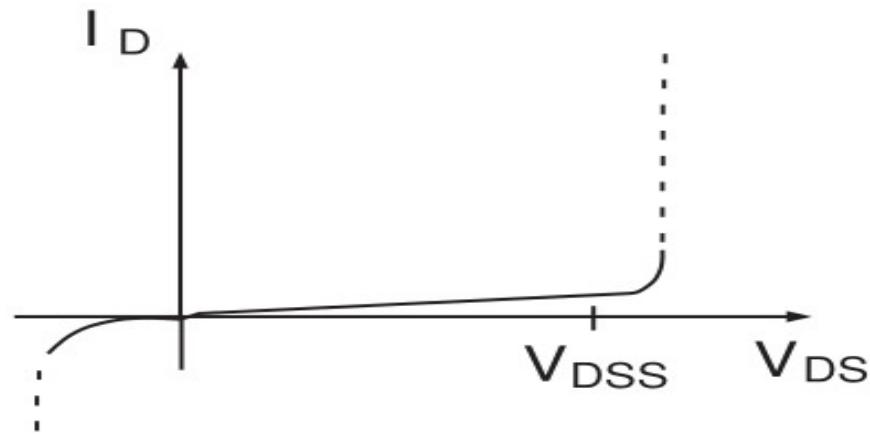
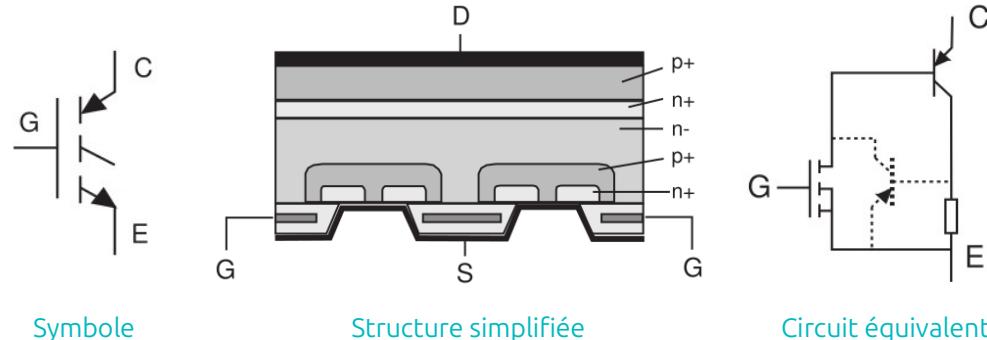
Il possède les avantages du BJT (tenue en courant et en tension, faibles pertes de conduction) et ceux du MOSFET (commande en tension, driver simple).

### Cas d'utilisation :

Variateurs de moteur, onduleurs, pilotage photovoltaïque, éolien, ...

Il est polyvalent donc le composant le plus répandu dans l'électronique de puissance.

Ex : Queen Mary II, Toyota Prius, ...



# COMPOSANTS DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

## Interrupteur statique : le transistor IGBT

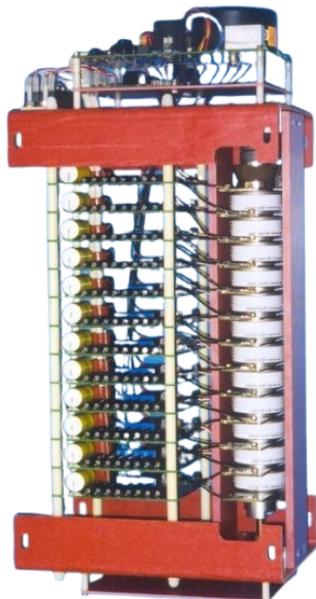


IGBT 3300 V, 1200 A

TGV Duplex - Alstom

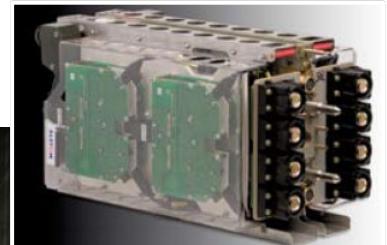


Variateur de vitesse Altivar 61



Associement de 12 IGBT pour arriver à une stack de 30 kV, 1 kA.  
Les grilles sont pilotées par fibre optique pour assurer la synchro.

Plaques à induction



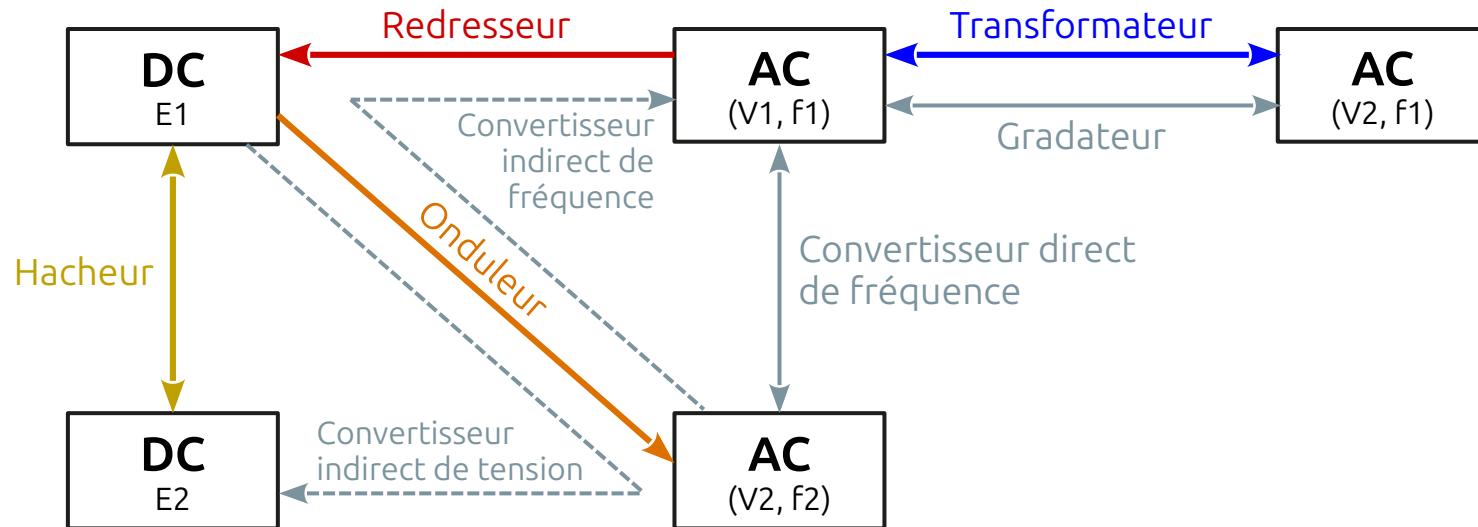
Module IGBT AGV

AGV- Alstom

## Convertisseurs

Associer les précédents composants permet de réaliser des systèmes de conversion électrique-électrique, de différentes natures.

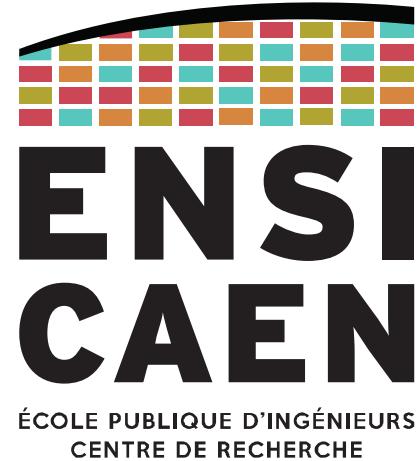
Nous aborderons dans la suite de ce chapitre plusieurs de ces structures.



Note : les structures à base de thyristor (gradateurs) sont volontairement omis pour des raisons de temps.

# CONVERTISSEURS AC/AC

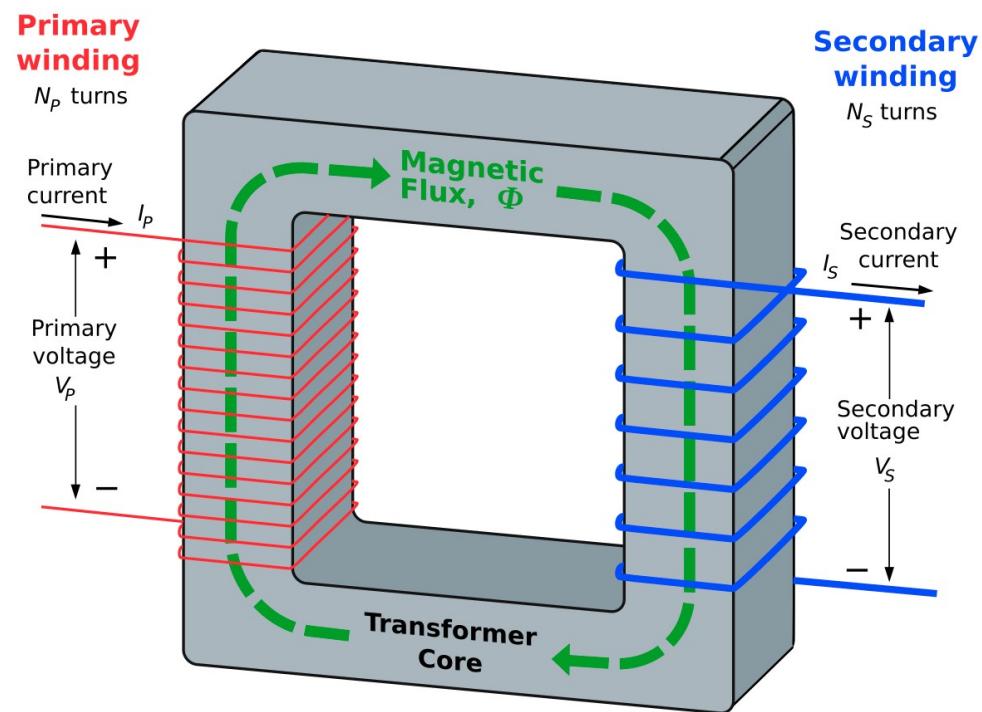
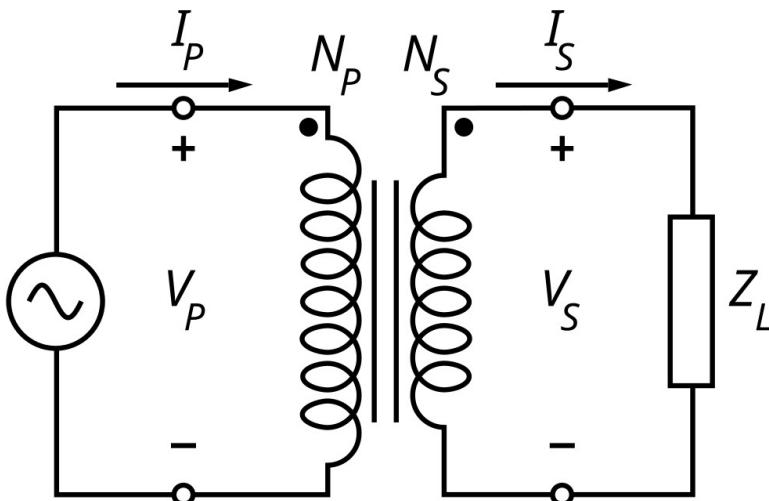
Transformateur



## Transformateur

Le **transformateur** est un convertisseur AC/AC permettant de modifier l'amplitude mais pas la fréquence.

Voir chapitre dédié (Ch.4).



# CONVERTISSEURS AC/DC

Redresseurs :

- simple alternance monophasé
- double alternance monophasé
- double alternance triphasé



Le redresseur est un convertisseur AC/DC, permettant de convertir une tension alternative en tension continue.

Il existe deux catégories de redresseurs :

- Les redresseurs non-commandés : à base diodes, la tension de sortie n'est pas ajustable par le redresseur
- Les redresseurs commandés : à base de thyristors ou d'associations transistors-diodes, la tension de sortie est ajustable grâce au pilotage des interrupteurs commandés

Nous distinguerons également :

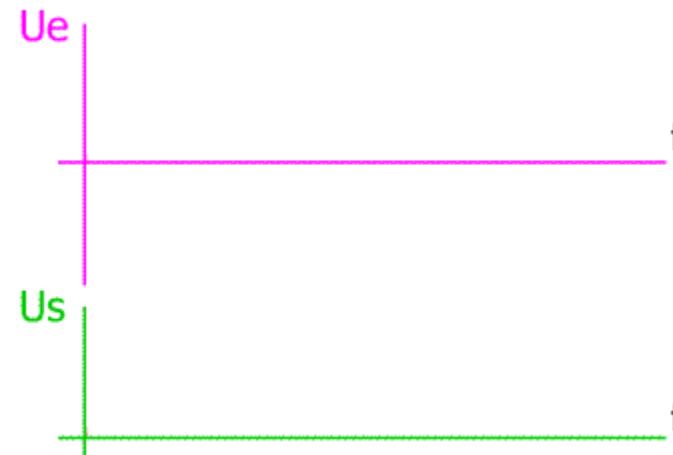
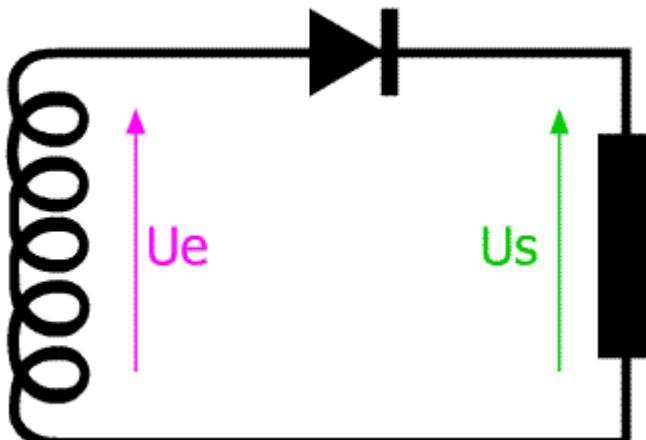
- Les redresseurs simple alternance : peu chers (car moins de composants) mais avec une tension moyenne de sortie plus faible et une ondulation de sortie très élevée (non-utilisés dans l'industrie, présentés ici pour faciliter la compréhension)
- Les redresseurs double alternance : que des avantages hormis le prix, qui au final n'est pas un frein pour l'industrie

## Redresseur monophasé simple alternance

Le **redresseur simple alternance** n'est équipé que d'une simple diode, située entre la source de tension et la charge.

Lors de l'alternance positive, la diode est passante car  $V_F > V_{th}$ .

Lors de l'alternance négative, la diode est bloquée.

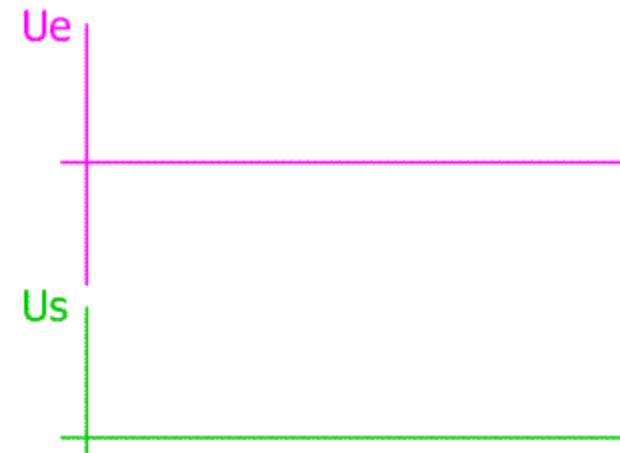
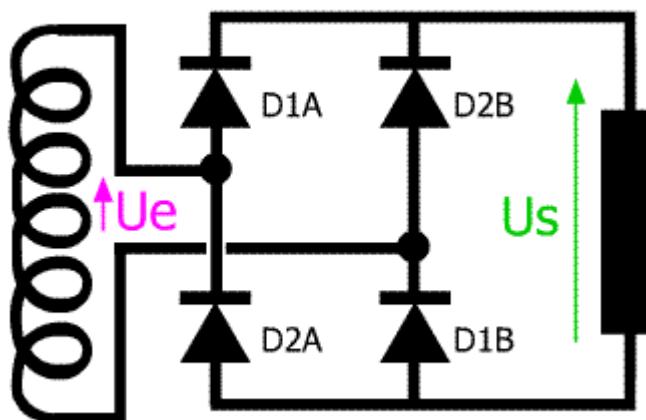


Valeur moyenne de la tension de sortie pour une charge résistive :

$$\langle V_s(t) \rangle = \frac{V_{max}}{\pi}$$

## Redresseur monophasé double alternance

Le **redresseur double alternance** peut se faire soit avec deux diodes et un point milieu sur la source de tension, soit par un pont de diodes appelé **Pont de Graetz**.  
Par cette construction, la charge voit toujours une tension positive à ses bornes.



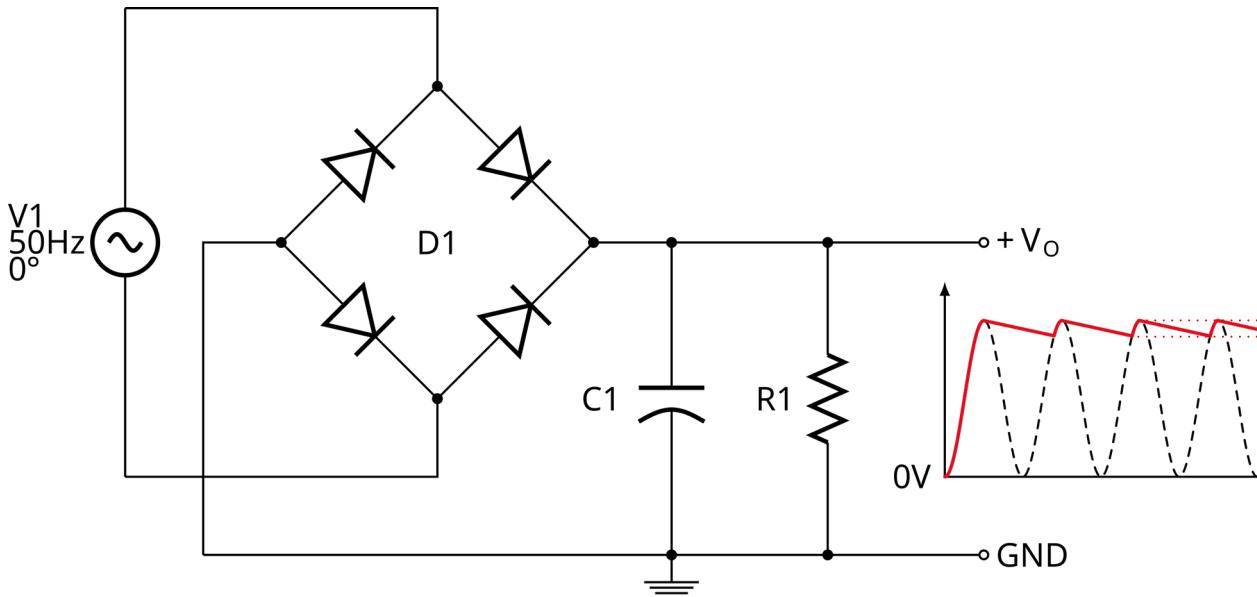
Valeur moyenne de la tension de sortie pour une charge résistive :

$$\langle V_s(t) \rangle = \frac{2 \cdot V_{max}}{\pi}$$

## Redresseur monophasé double alternance et filtrage

La tension de sortie obtenue avec des diodes seules a beau être positive en moyenne, elle n'est pas pour autant continue.

Pour s'approcher d'une tension continue, on ajoute généralement un condensateur appelée « capacité en tête » en sortie du redresseur (en parallèle de la charge donc).



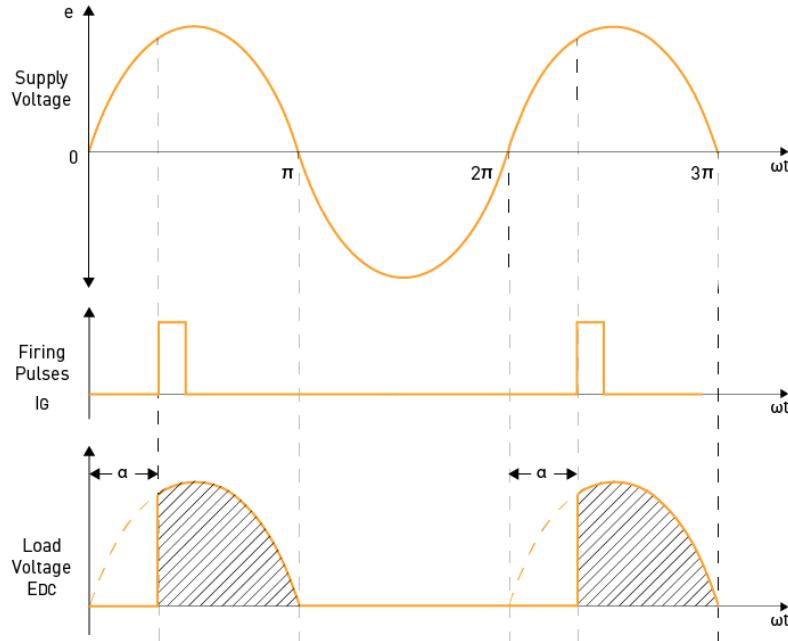
L'ondulation de la tension de sortie sur une charge résistive vaut :

$$\Delta V = \frac{V_{max}}{f \cdot R \cdot C}$$

Sous approximation de décroissance linéaire

## Redresseur monophasé commandé

Le **redresseur commandé** utilise des thyristors en lieu et place des diodes. En faisant varier l'angle d'amorçage (= en jouant sur le déclenchement du signal de gâche), les thyristors conduiront plus ou moins longtemps et la valeur moyenne de sortie variera.

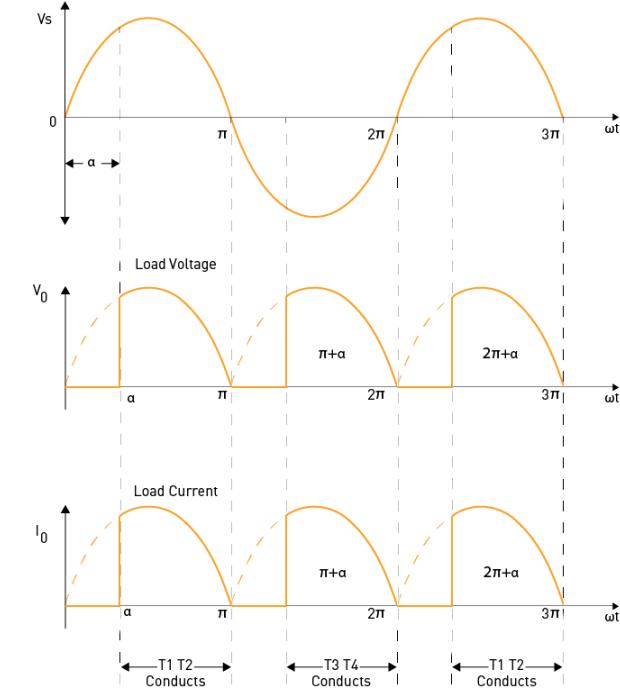


Redresseur commandé simple alternance :

$$\langle V_s(t) \rangle = \frac{V_{max}}{\pi} \cdot \cos(\alpha)$$

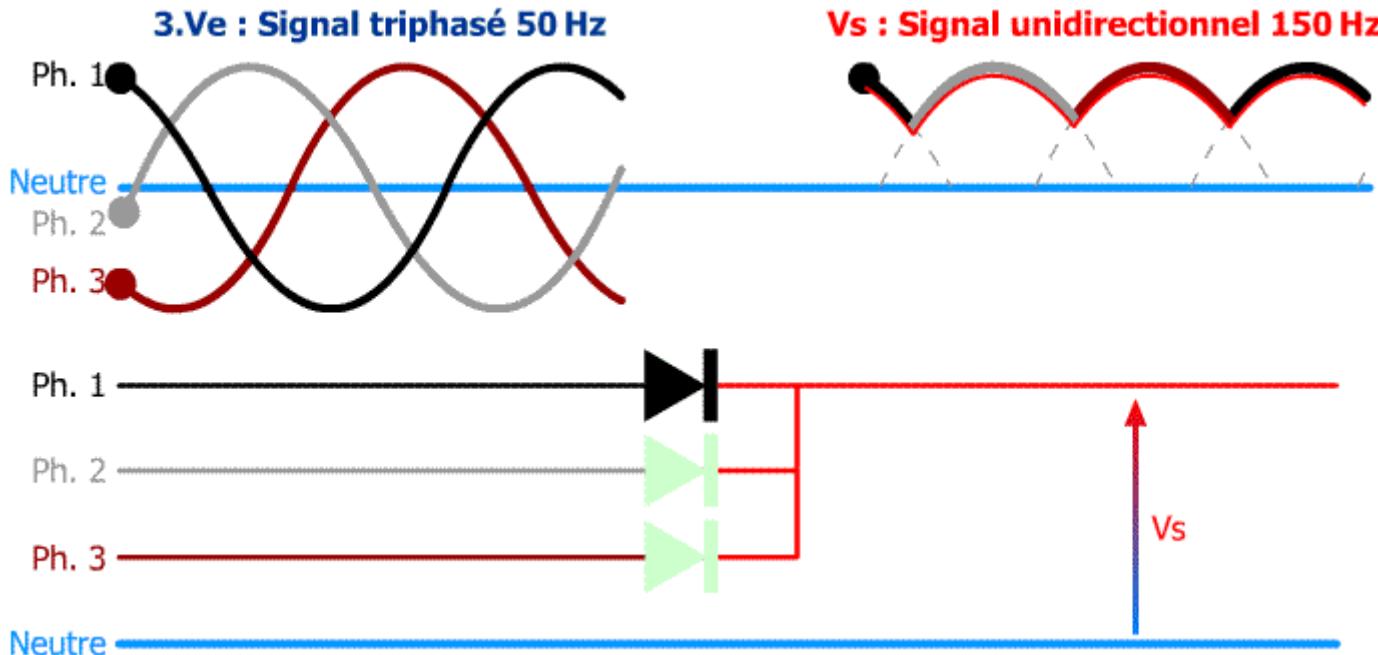
Redresseur commandé double alternance :

$$\langle V_s(t) \rangle = \frac{2 \cdot V_{max}}{\pi} \cdot \cos(\alpha)$$



## Redresseur triphasé simple alternance

Le **redresseur triphasé simple alternance** donne une tension positive égale à la plus grande tension simple instantanée.

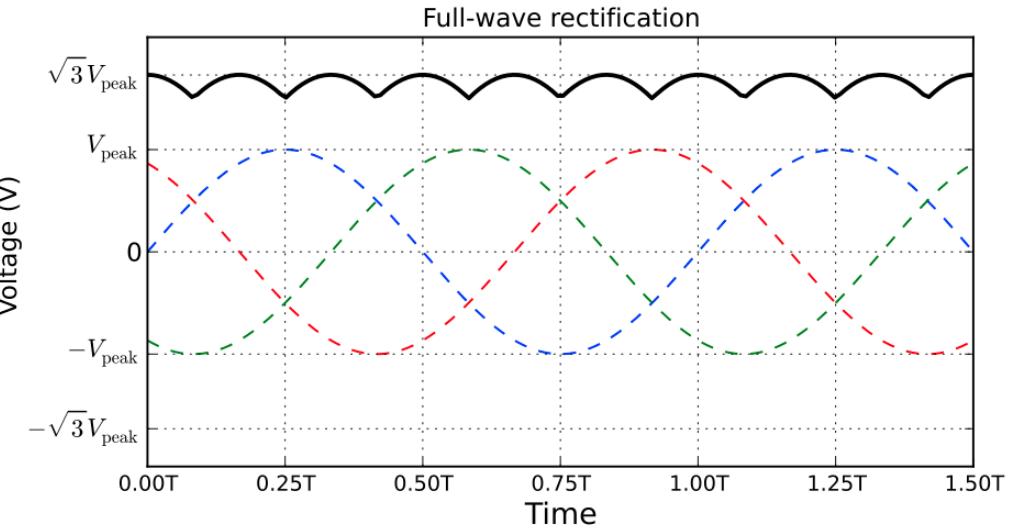
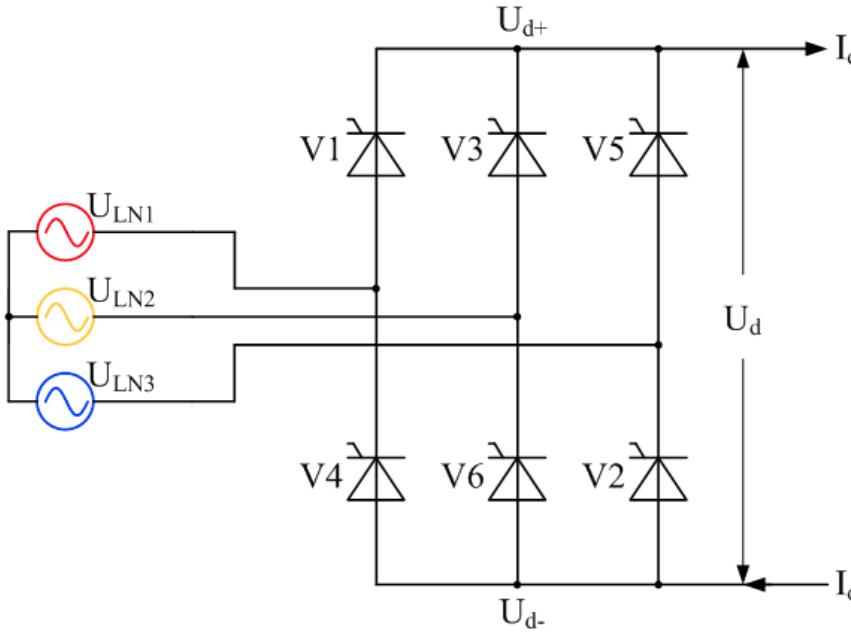


Valeur moyenne de la tension de sortie pour une charge résistive :

$$\langle V_s(t) \rangle = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot V_{max}}{2 \cdot \pi}$$

## Redresseur triphasé double alternance

Le **redresseur triphasé double alternance** donne une tension positive égale à la plus grande tension composée instantanée.



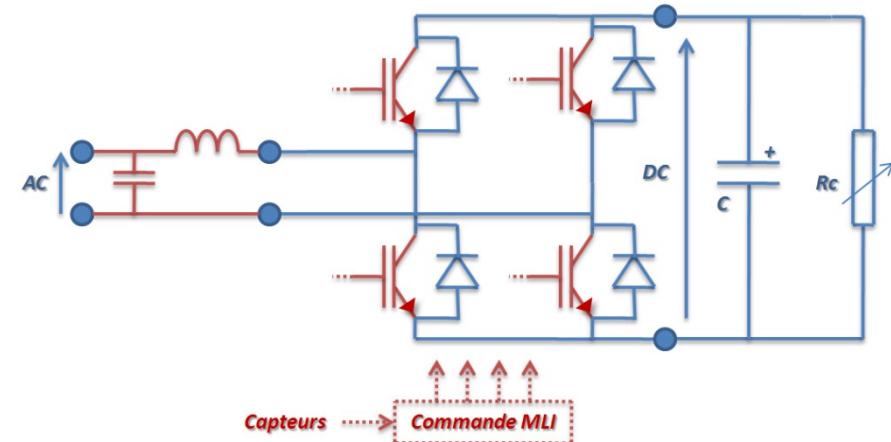
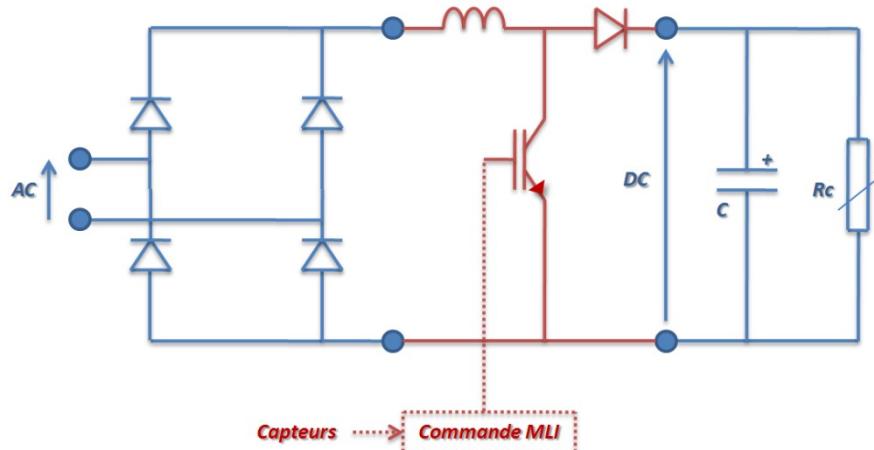
Diodes à cathodes communes : celle qui conduit est celle qui a le potentiel d'anode le plus positif.  
 Diodes à anodes communes : celle qui conduit est celle qui a le potentiel de cathode le plus négatif.

$$\langle V_s(t) \rangle = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot V_{max}}{\pi}$$

## Structures commandées

L'inconvénient du filtrage par condensateur est que le courant absorbé par le montage n'est plus sinusoïdal, ainsi de nombreuses harmoniques de courant circulent sur le réseau électrique (puissance déformante : échauffements, perturbations CEM, ...).

Pour limiter cela, les redresseurs sont commandés de sorte à (1) fournir la tension désirée et (2) imposer un courant absorbé sinusoïdal. En voici deux exemples :



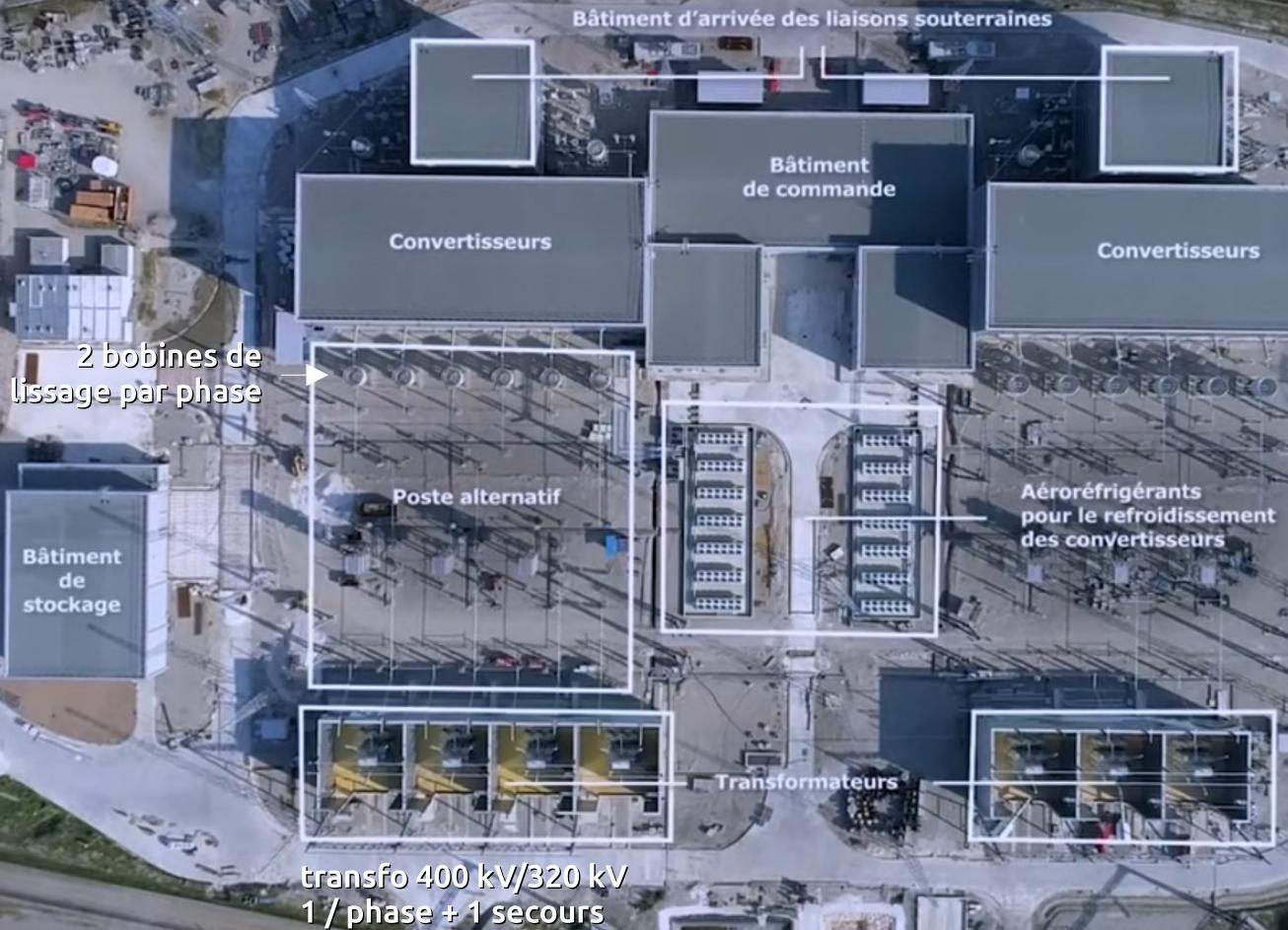
Les stations HVDC (*High Voltage Direct Current*) sont des stations de conversion AC/DC et DC/AC (réversibles donc) utilisées pour transporter de l'énergie électrique sur de longues distances en DC et/ou lors de franchissements d'obstacles naturels (mer, montagnes, ...).

Étudions dans cette partie la conversion AC/DC, en prenant l'exemple de la ligne Savoie-Piémont reliant la France et l'Italie à travers les Alpes.

⚡ Un convertisseur AC/DC de 320 000V ? Visite de la ligne HVDC France – Italie avec RTE !

Explication du convertisseur AC/DC (*Modular Multilevel Converter*) à base d'IGBT : de 15:14 à 17:35.

Convertisseur 1200 MW (2 x 600 MW, équipementier *General Electric*)



## CONVERTISSEURS AC/DC

### Convertisseur HVDC

À titre de comparaison, la Chine a récemment mis en œuvre une station HVDC à 18 milliards de \$.

28 convertisseurs Siemens associés pour générer une tension de 1100 kV DC sur 3324 km, avec une puissance de 12000 MW à rendement de 98-99 %.

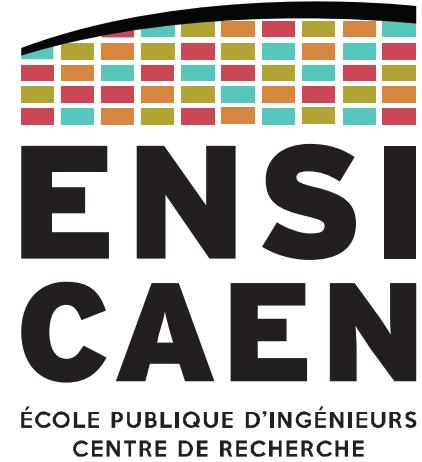
(rappel : un réacteur nucléaire  $\sim$  1000-1500 MW).

<https://www.downlink.com/a-monument-to-engineering-the-largest-power-transformer-ever-built/>

<https://www.reinhausen.com/impulses/components-and-solutions-for-transformer-manufacturers/the-most-powerful-transformers-in-the-world-for-a-1100-kv-hvdc-line-in-china>



# CONVERTISSEURS DC/DC



## Convertisseurs non-isolés ou isolés

Avec l'avènement des composants électroniques et donc de l'électronique de puissance, il est désormais possible de convertir une tension continue en une autre tension continue avec de bons rendements.

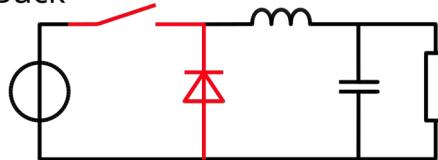
Il existe deux catégories de convertisseurs DC/DC :

- Les convertisseurs non-isolés (buck, boost, buck-boost, Ćuk)
- Les convertisseurs isolés (flyback, forward, LLC, ...)

Par soucis de temps, nous nous concentrerons sur les convertisseurs Buck et Flyback.

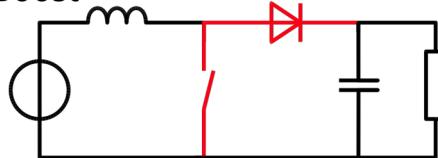
## Convertisseurs non-isolés

Buck



Les convertisseurs non-isolés se branchent directement sur une source de tension continue.

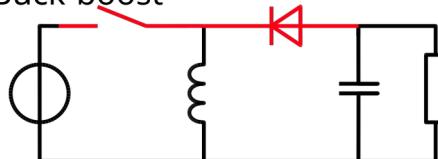
Boost



Le Buck est un circuit abaisseur de tension.

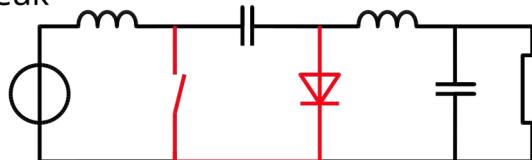
Le Boost est un circuit élévateur de tension.

Buck-boost



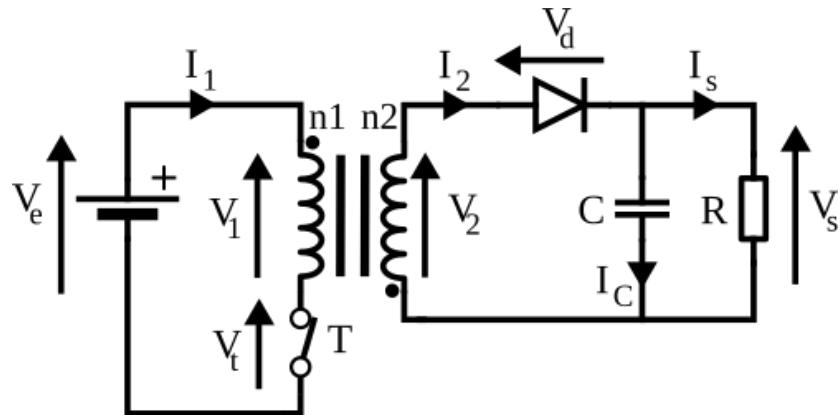
Le Buck-Boost peut éléver et abaisser la tension en valeur absolue, mais la tension de sortie sera toujours de polarité inverse.

Cuk



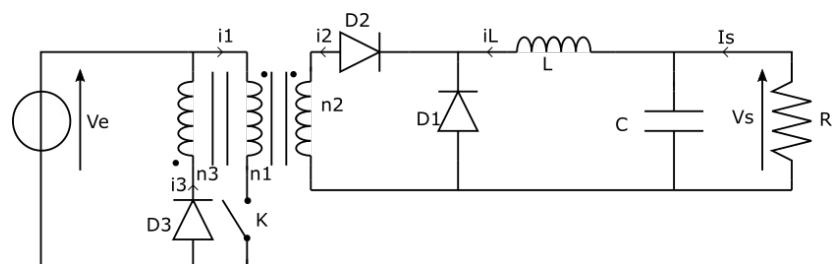
Le Cuk peut éléver et abaisser la tension en valeur absolue, mais la tension de sortie sera toujours de polarité inverse.

## Convertisseurs isolés



Les convertisseurs isolés possèdent une isolation galvanique, réalisée par un transformateur (ou des bobines couplées) placé entre la source de tension continue et la suite du montage.

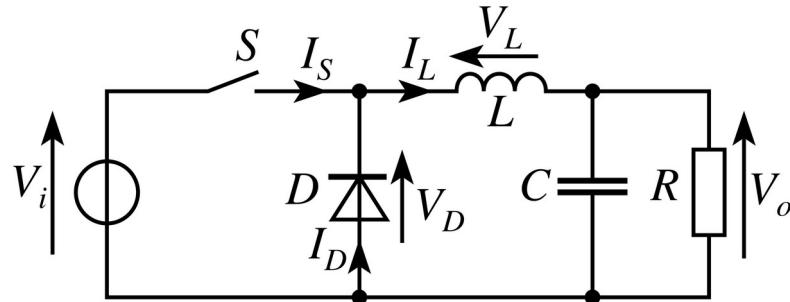
La source de tension continue est commutée pour transférer son énergie via le transformateur.



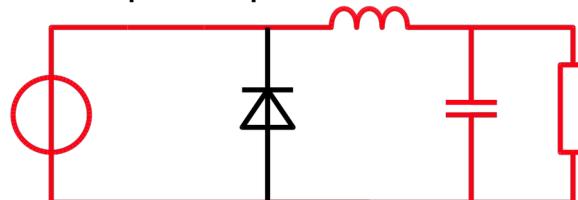
Le montage Flyback s'inspire du Buck-Boost dans lequel l'inductance est remplacée par des bobines couplées.

Le montage Forward s'inspire du Back et remplace l'inductance par un transformateur et une diode.

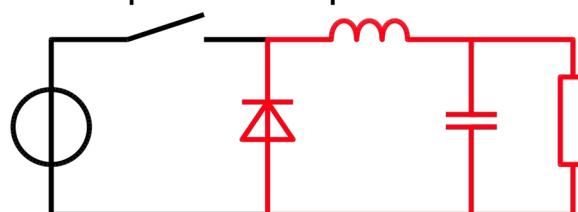
## Convertisseur non-isolé : le buck



Interrupteur passant



Interrupteur bloqué



Le montage hacheur **buck** (ou hacheur série, ou montage abaisseur) est très répandu dans l'électronique basse puissance et low-cost.

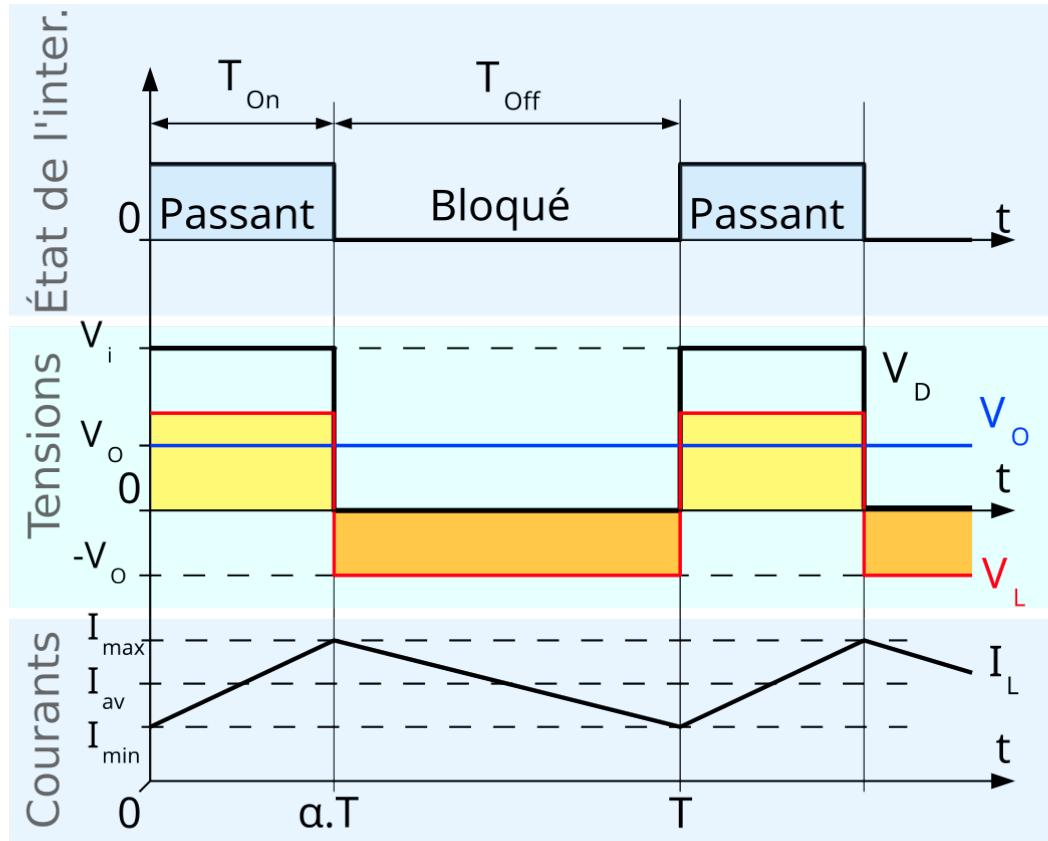
C'est un montage non-réversible, dont la tension de sortie peut être ajustée en fonction du ratio entre l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur, appelé rapport cyclique  $a$ .

Ici l'interrupteur est supposé idéal, mais en réalité la fonction est généralement remplie par un MOSFET donc la loi de commande permet l'asservissement de la tension de sortie.

Quand l'interrupteur est passant, la source de tension DC en entrée alimente la charge, ainsi que l'inductance et le condensateur qui stockent de l'énergie.

Quand l'interrupteur s'ouvre, la bobine impose un courant dans la charge et se décharge dans la charge. Le condensateur se vide également.

## Convertisseur non-isolé : le buck



En conduction continue :

$$V_o = \alpha \times V_i$$

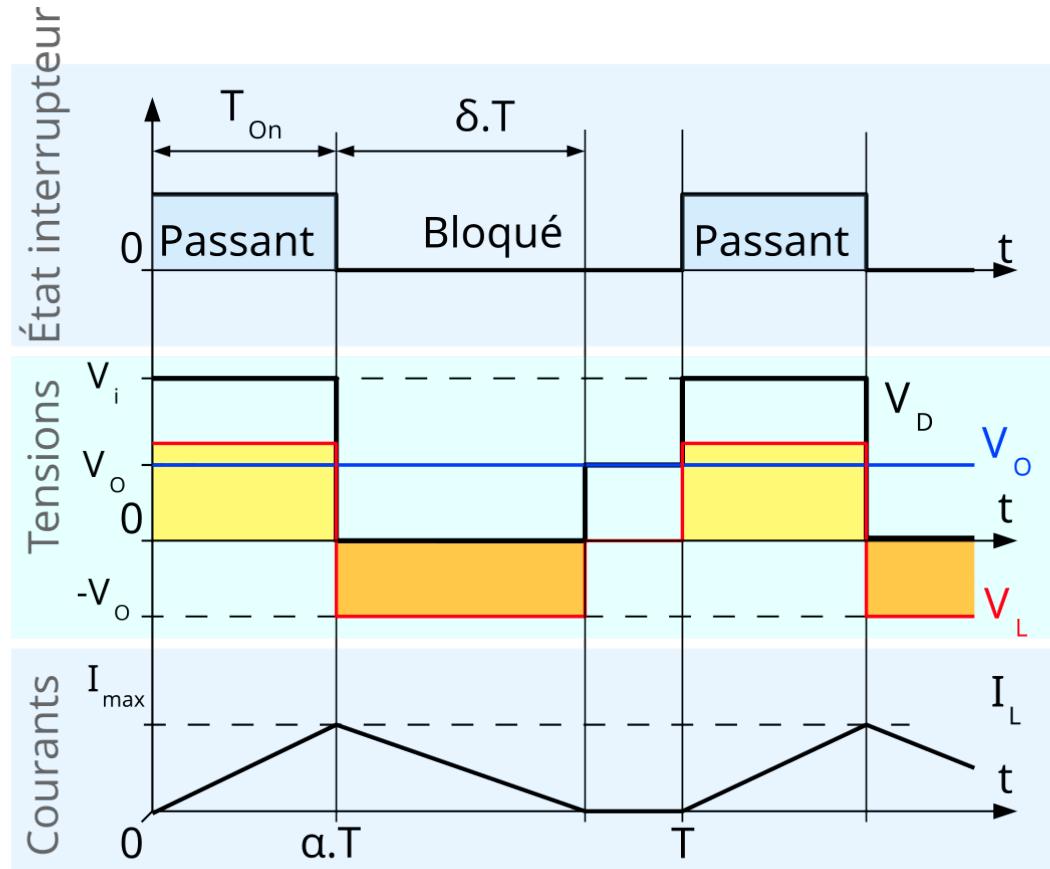
L'ondulation du courant de sortie :

$$\Delta I = \frac{V_o \cdot (1 - \alpha)}{f \cdot L}$$

On remarque que l'ondulation de courant de dépend pas de la charge, mais elle dépend de la fréquence et de l'inductance de lissage.

Hypothèse : composants idéaux, sans pertes.

## Convertisseur non-isolé : le buck



Si la fréquence ou l'inductance est trop faible, alors l'inductance finira par s'être totalement déchargée avant d'attaquer le cycle de charge. C'est la conduction discontinue :

$$V_o = \frac{V_I}{\frac{2 \cdot L \cdot I_o}{\alpha^2 \cdot V_I \cdot T} + 1}$$

Cette fois la tension de sortie dépend du courant de charge, de l'inductance et de la période de commutation (en plus du seul rapport cyclique).

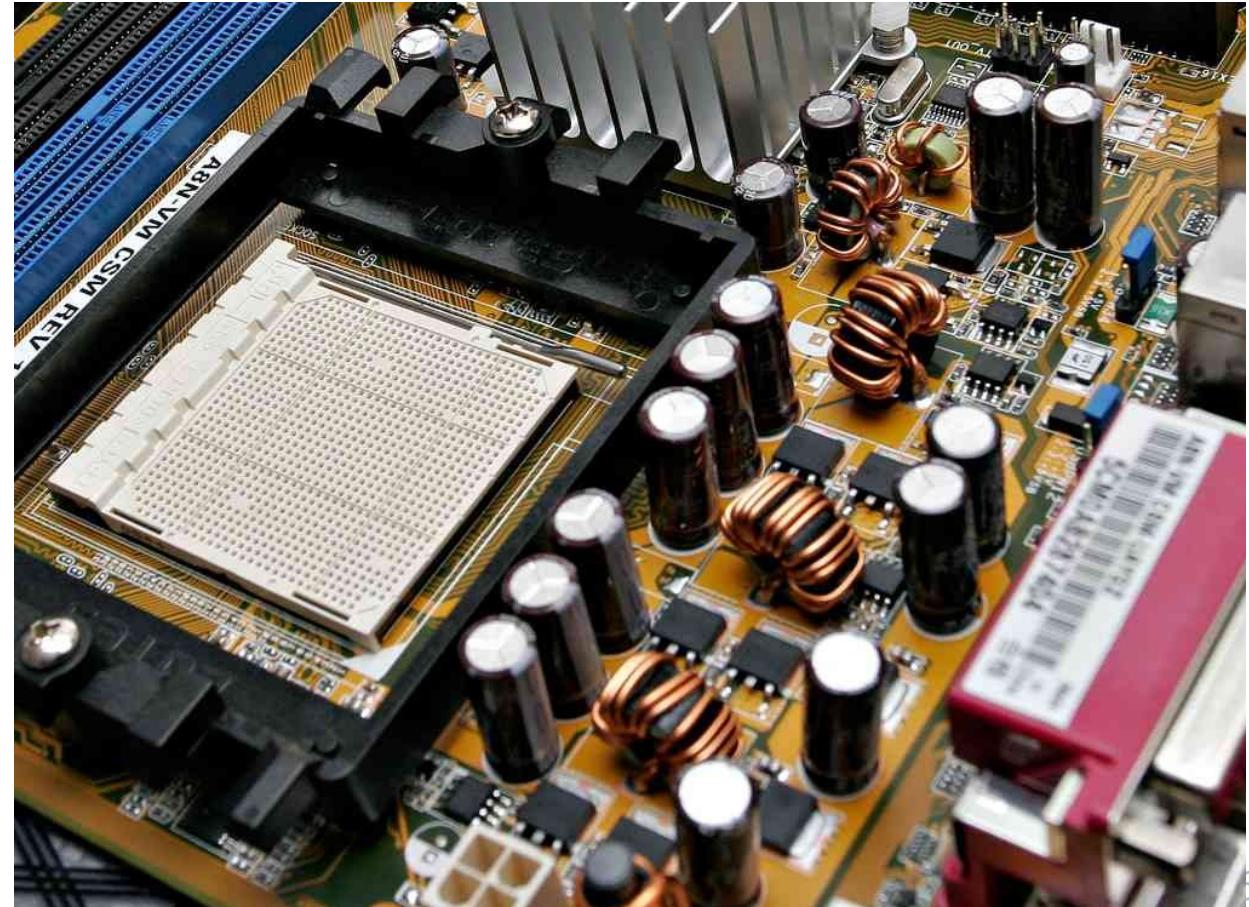
Hypothèse : composants idéaux, sans pertes.

## Convertisseur non-isolé : le buck

On retrouve le hacheur buck dans de nombreuses applications basse-puissance, notamment dans les systèmes ayant besoin de plusieurs sources de tensions continues.

Ce type de convertisseur DC/DC a l'avantage d'être peu volumineux avec un bon rendement (90-95%).

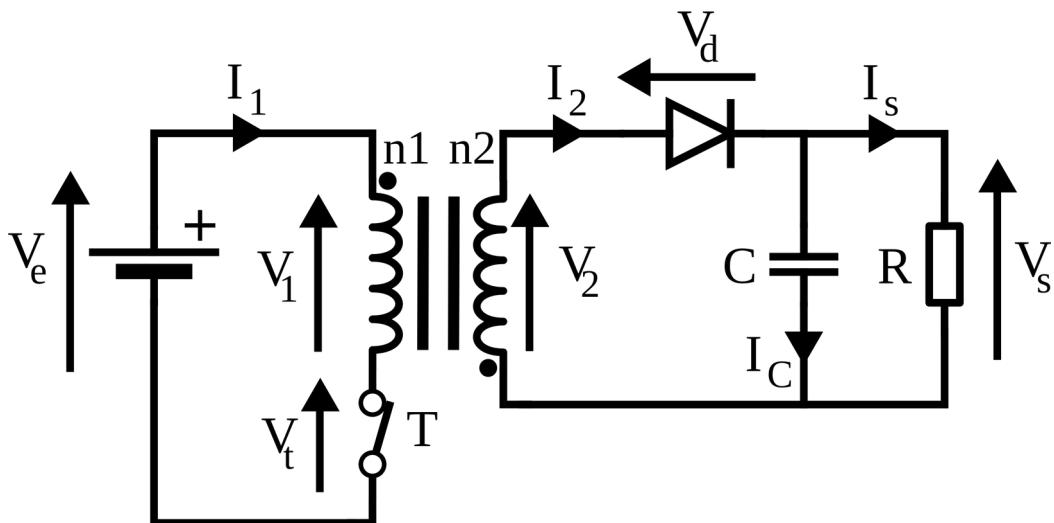
Vue rapprochée d'une alimentation pour processeur AMD sur Socket 939. Cette alimentation possède 3 convertisseurs Buck entrelacés. On peut distinguer au premier plan les 3 bobines toroïdales noires. La bobine plus petite sur le côté appartient à un filtre d'entrée.



## Convertisseur isolé : le flyback

Le montage **flyback** est non-réversible, et peut être abaisseur et élévateur de tension.

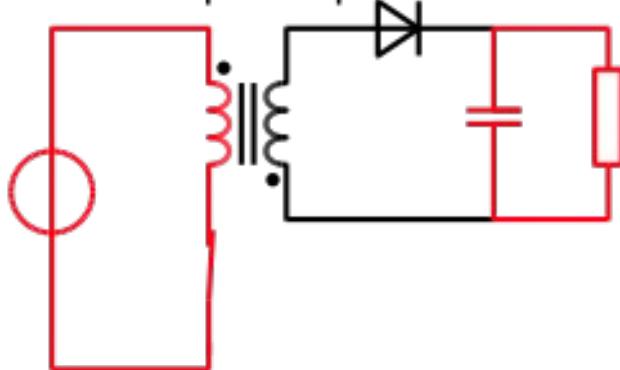
Deux inductances couplées permettent à la fois l'isolation galvanique et un stockage temporaire de l'énergie. Contrairement au transformateur (qui transfère instantanément l'énergie), les deux inductances couplées ne conduisent jamais simultanément.



Exemples d'inductances couplées pour Flyback.

## Convertisseur isolé : le flyback

Interrupteur passant

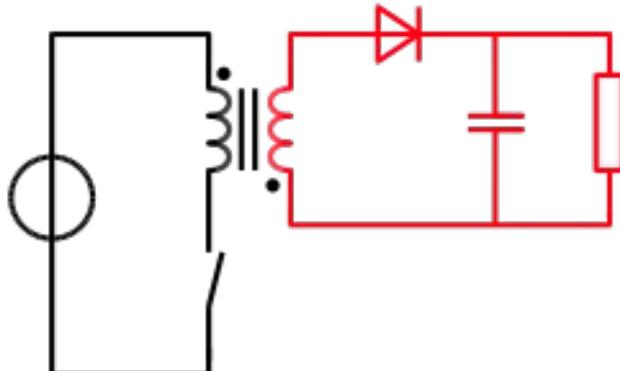


Quand l'interrupteur est passant, la bobine « primaire » charge le circuit magnétique.

La bobine « secondaire » étant branchée à l'envers, le passage du courant se trouve bloqué par la diode.

La charge elle est alimentée grâce au condensateur.

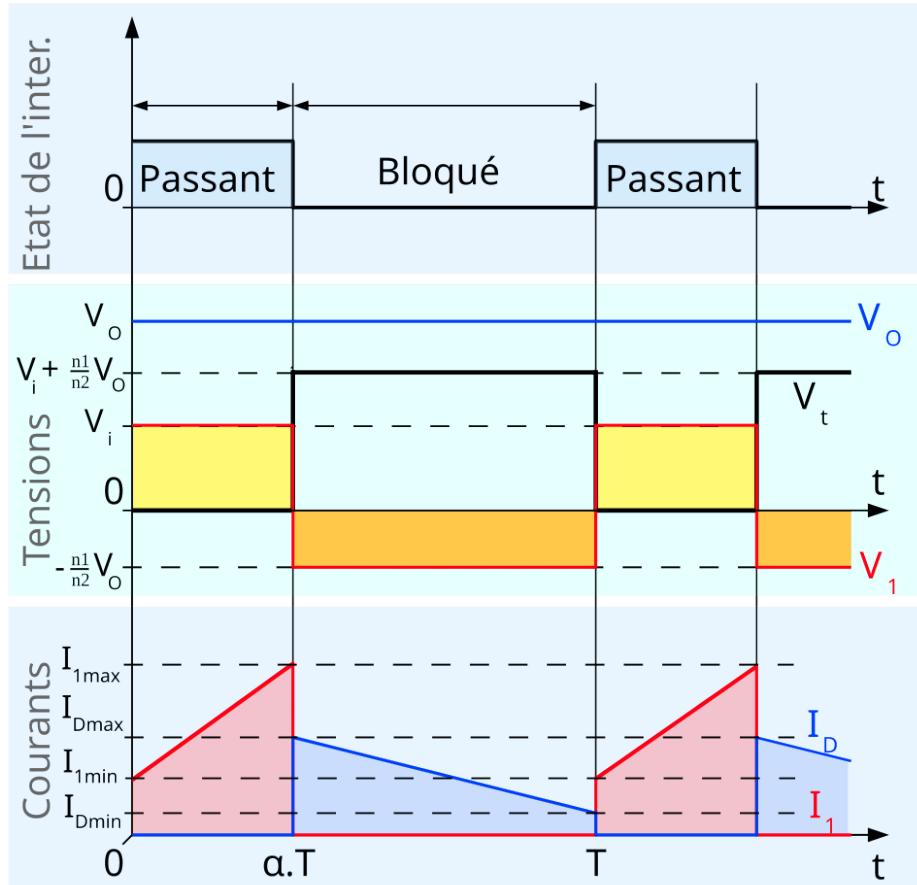
Interrupteur bloqué



Quand l'interrupteur s'ouvre, la conservation d'énergie stockée dans le noyau magnétique provoque l'apparition d'un courant dans la bobine « secondaire ».

Le courant alimente la charge et recharge le condensateur.

## Convertisseur isolé : le flyback



On note les relations suivantes :

$$V_2 = -\frac{n_2}{n_1} \cdot V_1 \quad \text{à tout instant}$$

$$I_{2,max} = \frac{n_1}{n_2} \cdot I_{1,max} \quad \text{pour assurer la conservation d'énergie}$$

$$I_{2,min} = \frac{n_1}{n_2} \cdot I_{1,min}$$

La relation entre l'entrée et la sortie s'exprime :

$$V_O = \frac{n_2}{n_1} \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot V_I$$

Cette relation est la même que le Buck-Boost au rapport de transformation  $n_2/n_1$  près.

Elle ne dépend ni de la fréquence de commutation, ni de  $L_1$  ou  $L_2$ , ni de la charge.

## Convertisseur isolé : le flyback

Les flybacks sont utilisées dans des applications basse-puissance et haute tension (grâce aux bobines couplées).

En comparaison au Buck il est plus encombrant et possède un moins bon rendement (70-90%), mais il peut générer plusieurs tensions de sortie, réglables en abaissement ou élévation de tension.

Il équipe ainsi une très grande majorité des applications domestiques telles que les alimentations d'ordinateurs, chargeurs de téléphones, et tout ce qui reste basse puissance (< 300 W).



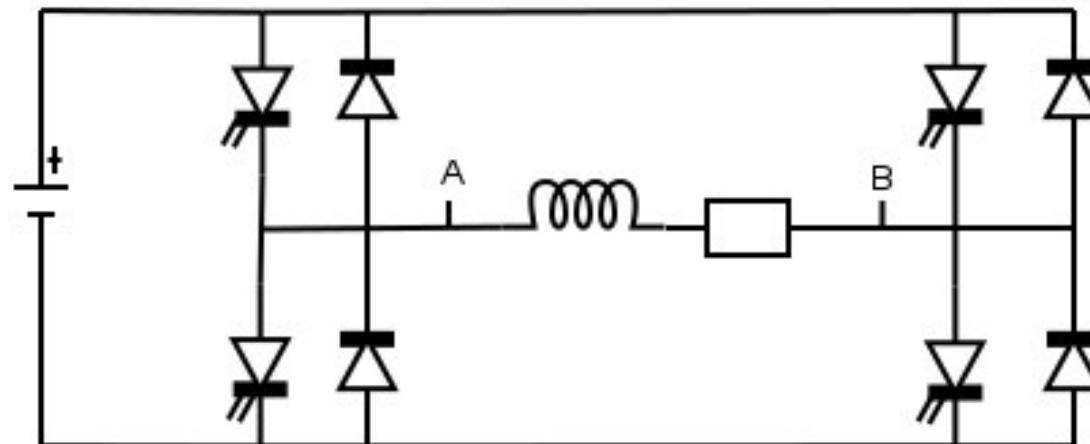
# CONVERTISSEURS DC/AC

Onduleur  
Modular Multilevel Converter



Pour convertir une tension continue en tension alternative, on utilise un **onduleur**.

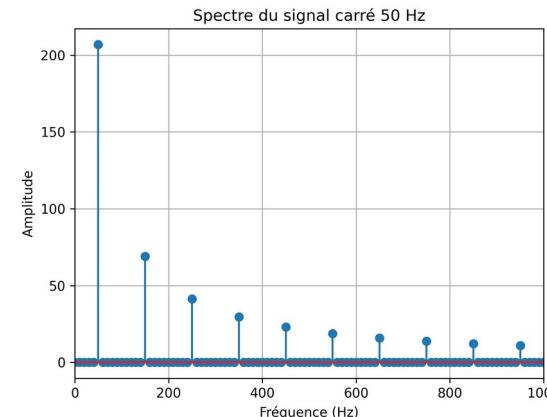
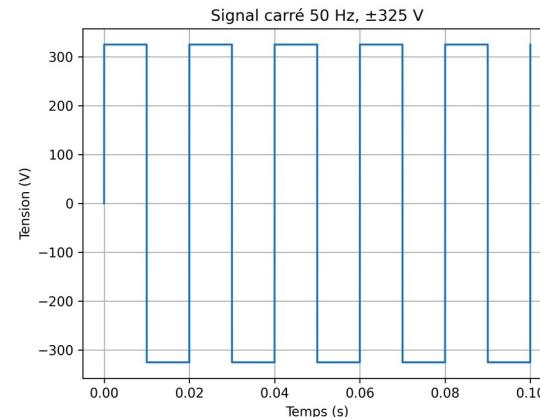
Celui est ni plus ni moins qu'un hacheur 4 quadrants (à base de MOSFET ou IGBT), avec toutefois une loi de commande particulière.



Supposons une loi de commande extrêmement simpliste :

- Pour obtenir l'alternance positive, on commande les interrupteurs de sorte à avoir  $+V_{DC}$  aux bornes de la charge pour une demi-période ;
- Pour obtenir l'alternance négative, on commande les interrupteurs de sorte à avoir  $-V_{DC}$  aux bornes de la charge pendant l'autre demi-période

On obtient alors un signal carré, en réalité exploitable mais dont les harmoniques sont préjudiciables au transport de l'électricité (puissance déformante importante).



## Hacheur 4 quadrants et MLI = Onduleur

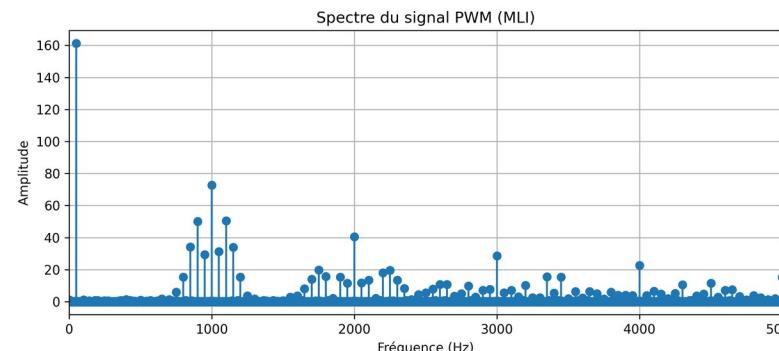
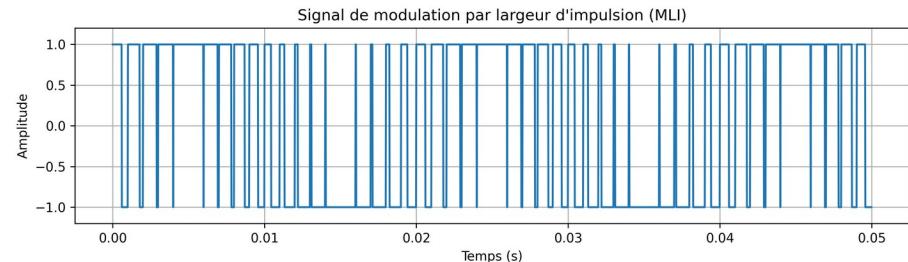
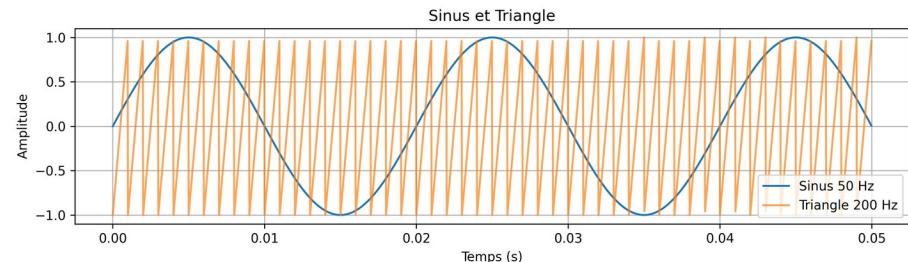
La loi de commande est généralement réalisée par modulation intersective :

Une porteuse à haute fréquence (généralement triangulaire, 40-100 kHz) est comparée à un signal modulant (une sinusoïde à 50 Hz).

Le résultat obtenu est un signal carré de fréquence fixe (celle de la porteuse) mais dont le rapport cyclique est variable. Ce signal modulé est utilisé comme commande des interrupteurs statiques du hacheur 4 quadrants.

Il s'agit de la **MLI (Modulation en Largeur d'Impulsion)** ou PWM (*Pulse Width Modulation*).

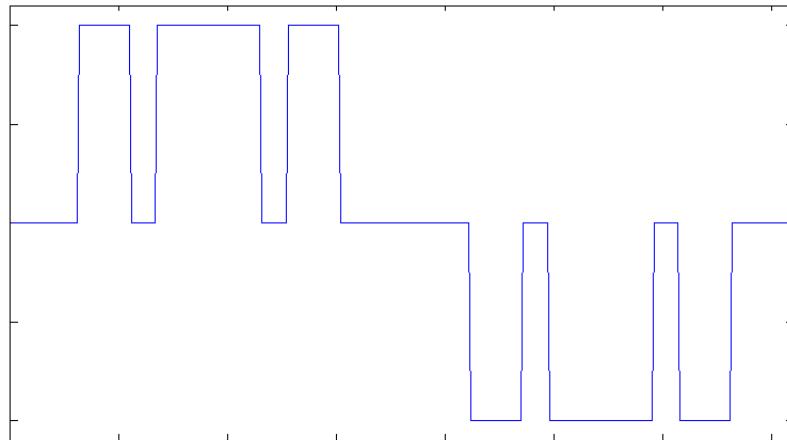
L'intérêt de cette modulation se trouve en domaine fréquentiel : les harmoniques se trouvent très éloignées de la fondamentale à 50 Hz et peuvent donc être aisément filtrées pour reconstruire un signal proche d'un sinus pur.



## Onduleurs

L'onduleur existe dans différentes variantes :

- Monophasé ou triphasé
- Double-niveau (comme l'exemple précédent)
- Multi-niveau, avec plusieurs interrupteurs montés en série et permettant de générer un signal de sortie
  - ⚡ Un convertisseur AC/DC de 320 000V ? Visite de la ligne HVDC France – Italie avec RTE !
- Explication du convertisseur DC/AC (*Modular Multilevel Converter*) à base d'IGBT : de 21:35 à 22:33.



Le MMC (*Modular Multilevel Converter*) permet d'utiliser plusieurs niveaux intermédiaires, facilitant la reconstitution d'un signal proche de la sinusoïde.

← Ici une modulation 3 niveaux, réalisable avec un simple hacheur 4 quadrants (il suffit d'activer les deux interrupteurs inférieurs pour imposer une tension de 0 V à la charge).

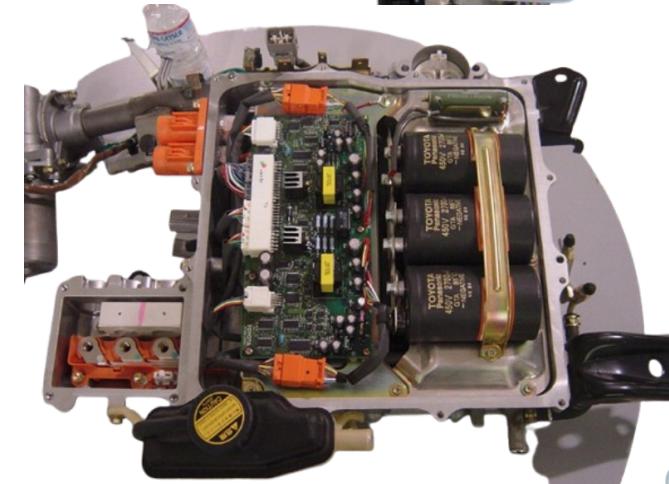
## Onduleurs

Les onduleurs se retrouvent notamment dans :

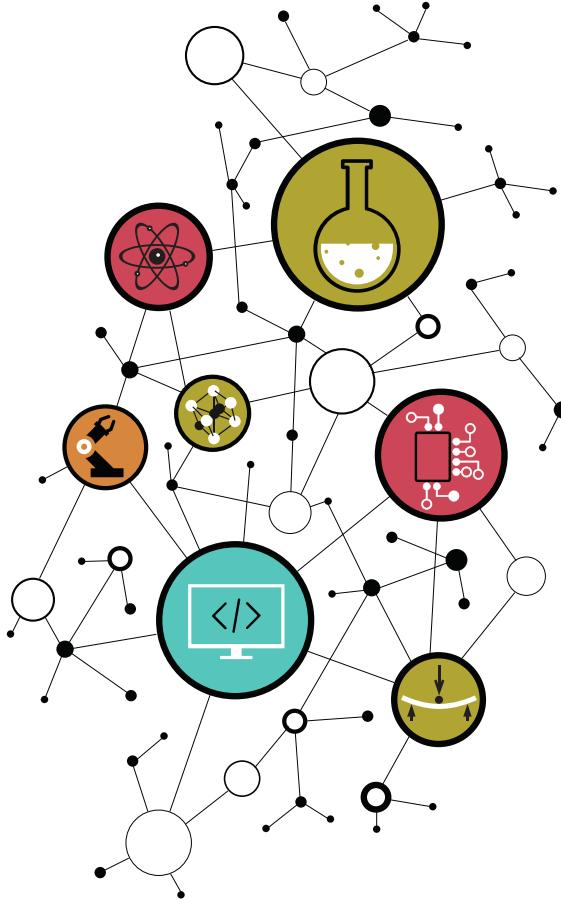
- des applications basse puissance (alimentation de secours, alimentation sans interruption, ...),
- le raccord de panneaux PV au réseau électrique,
- les variateurs de vitesse et plus généralement le pilotage de machines électriques,
- les convertisseurs HVDC en très très forte puissance (dans sa variante MMC).

En haut un onduleur de panneau PV Sunny Boy 3000

En bas un onduleur de Toyota Prius NHW11.



## CONTACT



Dimitri Boudier – PRAG ENSICAEN  
[dimitri.boudier@ensicaen.fr](mailto:dimitri.boudier@ensicaen.fr)