

# Electronique de puissance

2022 / 2023

# Electronique de Puissance

## *Définition :*

l'**Electronique de Puissance** est la branche de l'électronique qui a pour objet l'étude de la conversion statique d'énergie électrique (notamment les structures, les composants, les commandes et les interactions avec l'environnement).

Elle traite l'énergie électrique par voie statique.

# Electronique de Puissance

L'Electronique de Puissance permet :

- une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique,
- une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique,
- une discrétion par une réduction des masses et des volumes ainsi que par un fonctionnement ultrasonore des dispositifs.

# Convertisseur statique

La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseurs statiques

*Définition :*

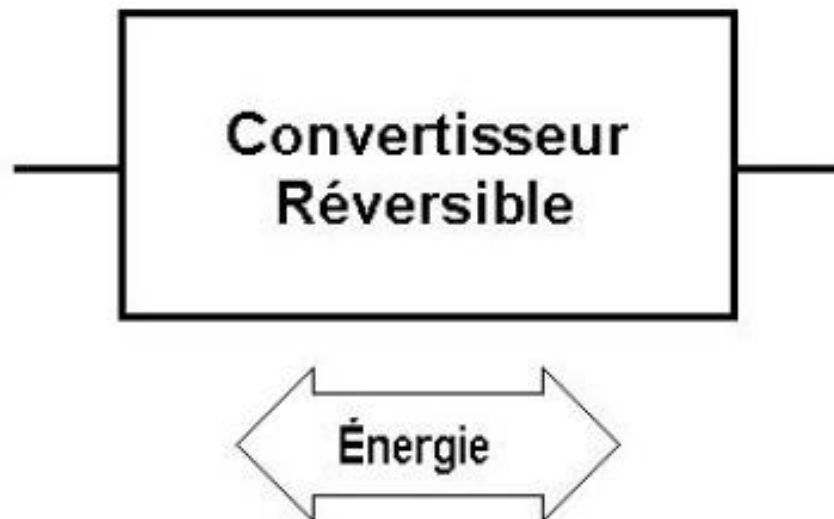
Un **convertisseur statique** est un dispositif qui transforme de l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge.

# Réversibilité des convertisseurs

## *Définitions :*

-Un **convertisseur statique** est dit **réversible** lorsque l'énergie peut transiter (en général, être contrôlée) de manière bidirectionnelle, c'est à dire aussi bien dans un sens que dans l'autre.

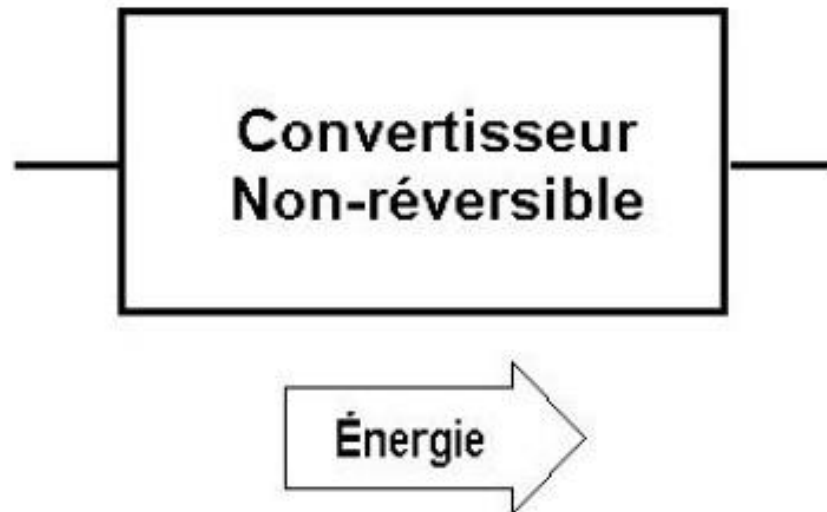
Les notions d'entrée et de sortie ne sont alors plus évidentes.



# Réversibilité des convertisseurs

*Définition :*

- Un **convertisseur non réversible** transfère (et convertit) l'énergie d'une source vers une charge utilisatrice. L'énergie ne peut pas transiter dans l'autre sens.



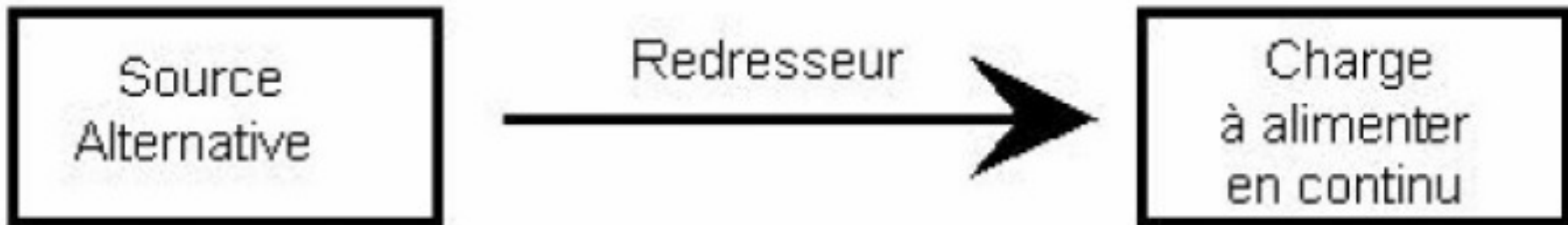
# Réversibilité des convertisseurs

Exemples :

- convertisseurs statiques naturellement réversibles
  - onduleurs
- naturellement non réversibles
  - redresseur à diodes
- réversibles ou non, suivant le schéma (la structure)
  - hacheur

# Conversion alternatif – continu

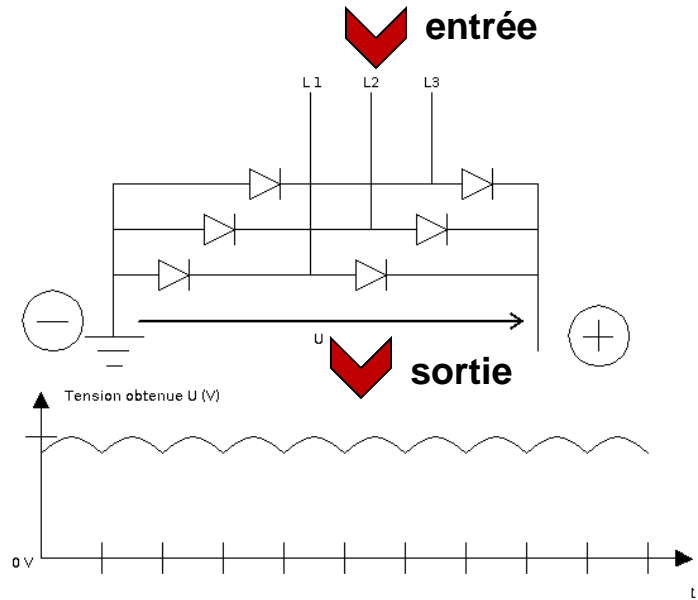
Le convertisseur qui transforme l'énergie électrique délivrée sous forme alternative pour alimenter une charge en continu est le 'redresseur' (rectifier).



# Types de redresseurs

En fonction des *nombres de phases* :

- monophasés,
- triphasés
- polyphasés.



En fonction des *semi-conducteurs utilisés* :

- non réversibles en énergie
  - diodes
  - diodes et thyristors (ils sont dits mixtes)
- réversibles
  - constitués uniquement de thyristors

# Conversion continu – alternatif

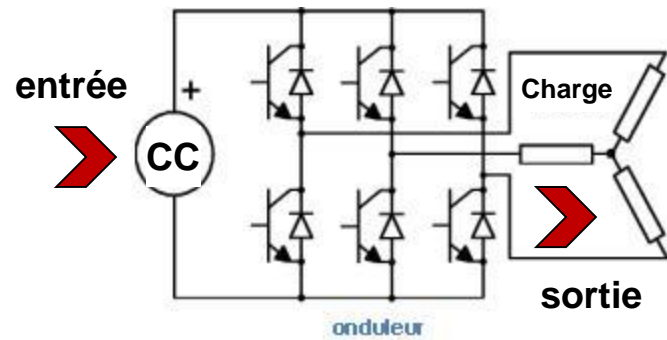
Le convertisseur qui transforme l'énergie électrique délivrée sous forme continue pour alimenter une charge en alternatif est **l'onduleur (inverter)**.

Source  
continue

Onduleur

Charge  
à alimenter  
en alternatif

# Types d'onduleurs



- **onduleur assisté** (ou non autonome - fonctionnement réversible) - si la charge peut délivrer de la puissance et présente des forces électromotrices (réseau de distribution électrique, machine synchrone, alternateur,...),
- **onduleur à résonance** - si la charge est constituée par un circuit oscillant,
- **onduleur autonome** - ne suppose aucune caractéristique particulière de la charge.

# Conversion continu – continu

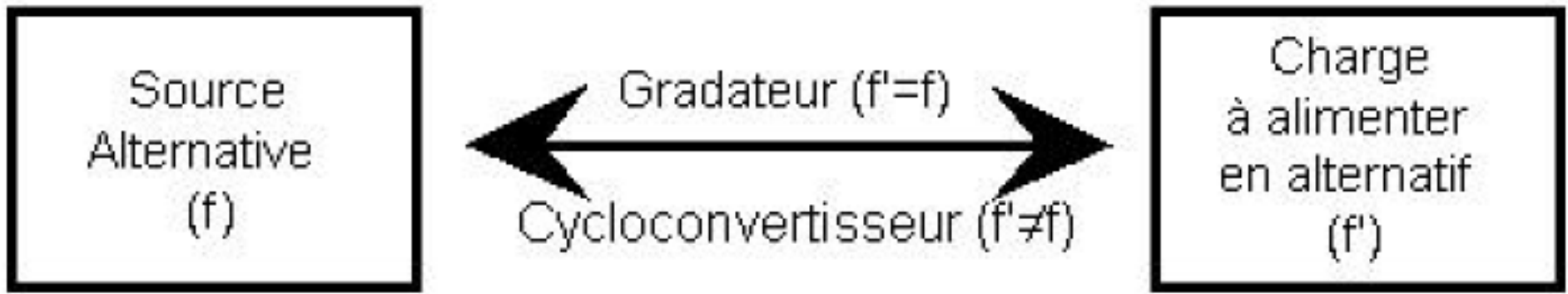
Le convertisseur qui transforme l'énergie électrique délivrée sous forme continue pour alimenter une charge en continu est le **hacheur (chopper)**.



Le hacheur règle la tension ou le courant appliqué à la charge. Il peut être réversible ou non.

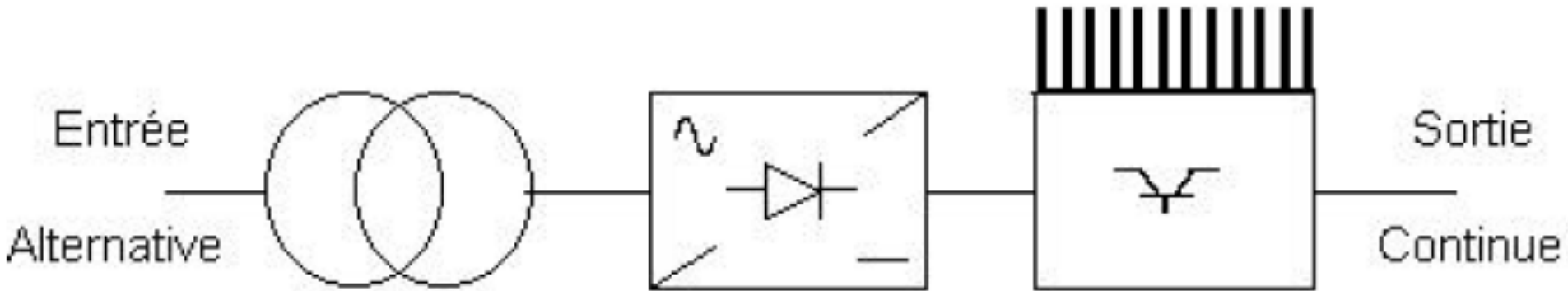
# Conversion alternatif – alternatif

La conversion de l'énergie électrique délivrée sous forme alternative pour alimenter une charge en alternatif peut se faire avec ou sans changement de fréquence. Dans le premier cas, on parle de **cycloconvertisseur**. Dans le second cas, on parle de **gradateur**.



# Alimentation continue réglable avec isolation galvanique

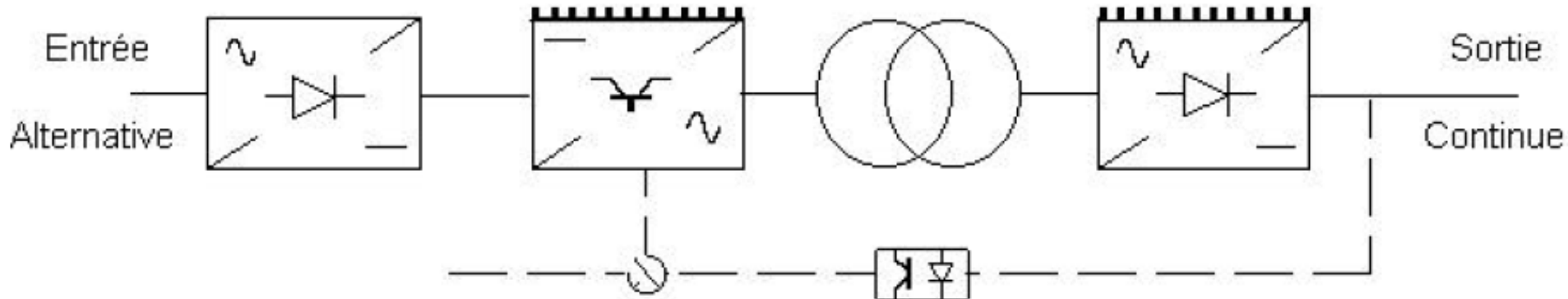
Solution ancienne – utilisation d'un transformateur 50Hz suivi d'un redresseur et un régulateur linéaire.



# Alimentation continue réglable avec isolation galvanique

Solution moderne : alimentation à découpage

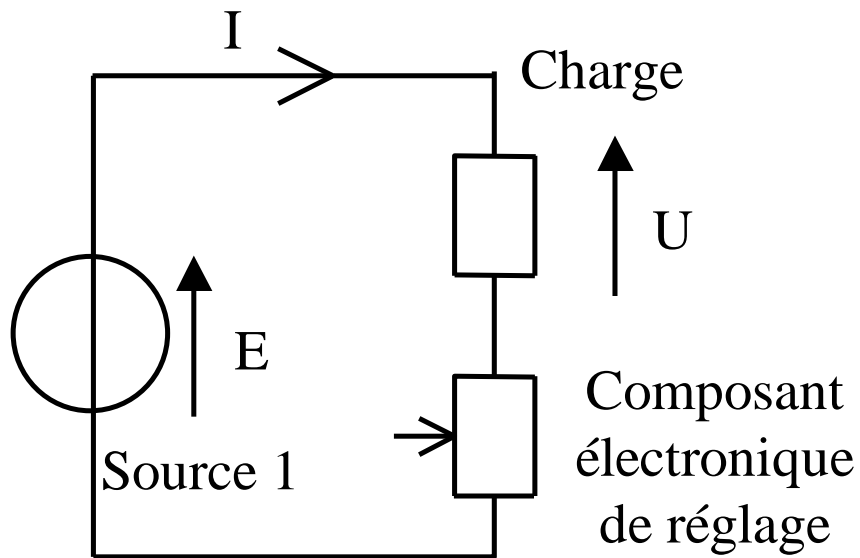
- utilisation de la cascade redresseur - onduleur - redresseur.
- haute fréquence - diminue la taille du transformateur.
- régulation de la sortie - contrôle de l'onduleur.
- possible de réaliser une absorption de courant sinusoïdal sur le réseau..



# Importance du rendement dans la conversion d'énergie

- on ne peut pas évacuer/dissiper les pertes (sources de chaleur) si elles sont trop importantes,
- le coût des dispositifs dissipateurs de chaleur (radiateurs, ventilateurs,...) est important,
- la fiabilité d'un composant ou d'un système diminue quand sa température de fonctionnement augmente,
- il faut assurer une autonomie suffisante des appareils fonctionnant sur piles ou batteries,
- il est nécessaire de conserver un bilan économique satisfaisant.

# Nécessité de travailler en commutation



## Montage série

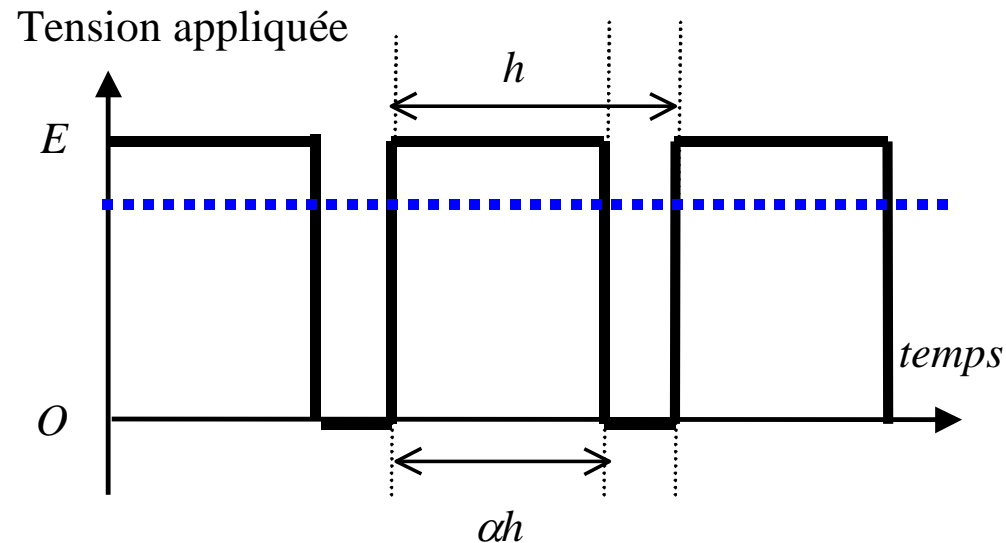
- Puissance fournie par la source :  $E.I$
- Puissance absorbée par la charge :  $U.I$
- Puissance à gérer par le composant :

$$(E - U).I$$

# Nécessité de travailler en commutation

- Deux possibilités pour minimiser la puissance dans le composant électronique
  - $I = 0$  -> Circuit ouvert
  - $(E-U) = 0$  -> Court-circuit
- Le composant électronique de puissance ne peut travailler que comme un interrupteur

# Comment dans ces conditions, obtenir une tension continue ?



- La tension appliquée comporte :
  - une composante utile : la valeur moyenne  $\alpha E$
  - une composante parasite à la fréquence  $f = 1/h$

# Filtrage de la composante parasite

- 1<sup>ère</sup> possibilité : rajouter un circuit passif (RC, RL, LC)
- 2<sup>ème</sup> possibilité : profiter des caractéristiques de la charge :
  - un moteur DC constitue un filtre RL du premier ordre (fréquence de coupure - quelques centaines de Hz à quelques kHz)

# Comment obtenir une tension alternative ?

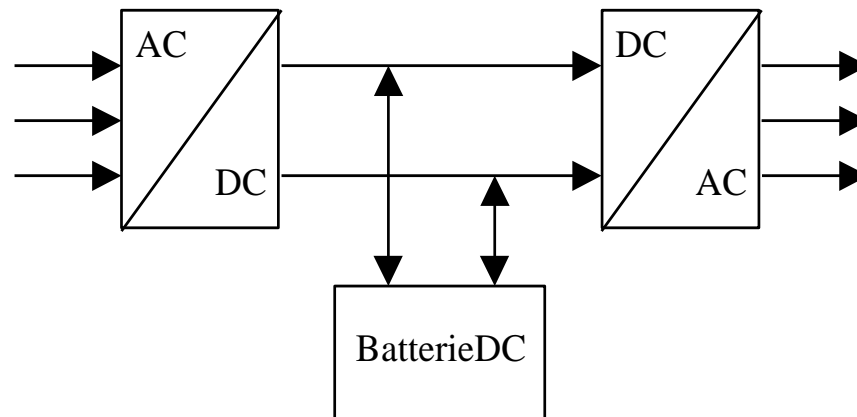
- En procédant de la même manière mais en faisant varier le rapport cyclique  $\alpha$  à la fréquence désirée :

$$\alpha = (1 + \beta \cdot \sin \omega t) / 2$$

- La tension appliquée comporte alors trois composantes :
  - une composante utile :  $\beta \cdot E / 2 \cdot \sin \omega t$
  - une composante parasite à la fréquence  $f = 1/h$
  - une composante DC parasite égale à  $E/2$

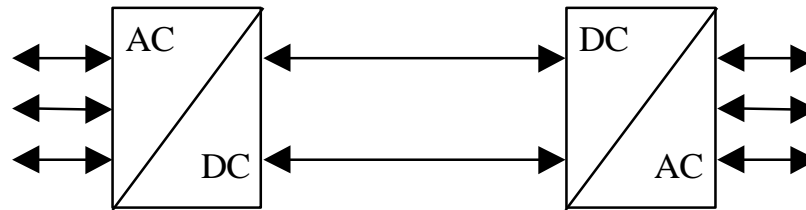
# Domaines d'application de l'électronique de puissance

- L'entraînement électrique
- Les alimentations à découpage (télécommunication, informatique,...)
- Les UPS (Uninterruptible Power Supplies)



# Domaines d'application de l'électronique de puissance

- Les liaisons HVDC



- Compensateurs d'énergie réactive et filtres actifs (*Flexible AC Transmission Systems*)

# **Aspects fondamentaux liés au fonctionnement en commutation**

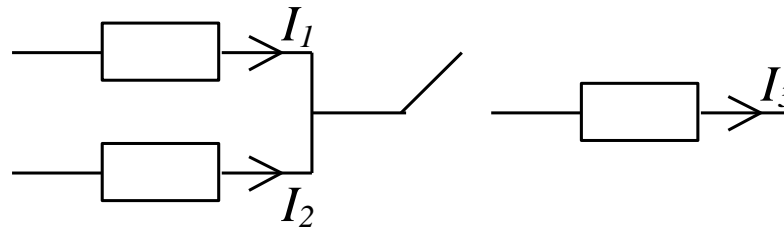
# Aspects fondamentaux liés au fonctionnement en commutation

## Rappel

- Nous avons établi précédemment qu'un convertisseur électronique de puissance ne pouvait fonctionner que par commutation.
- Questions : peut-on mettre un interrupteur n'importe où dans un circuit électrique ? Peut-on ouvrir ou fermer cet interrupteur n'importe quand ?

# Quelles sont les conséquences de l'ouverture d'un interrupteur ?

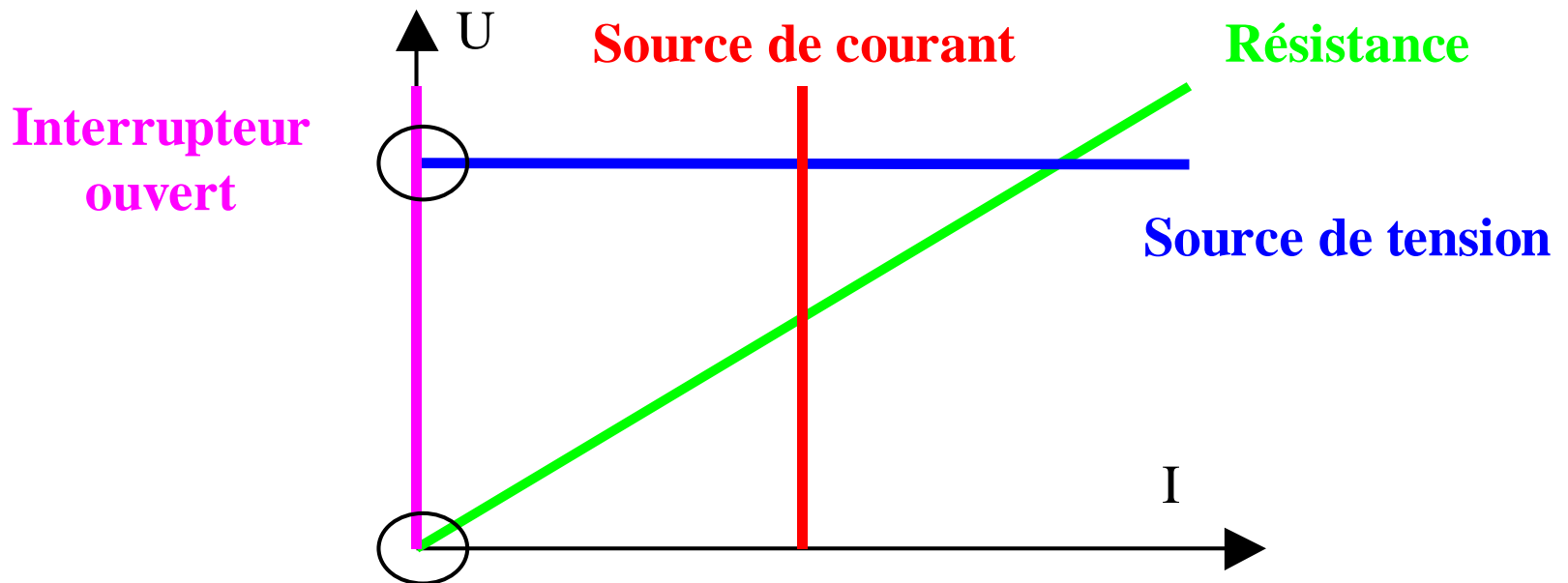
- Ouvrir un interrupteur signifie :
  - imposer que le courant qui le traverse soit égal à zéro.
  - imposer que les courants qui circulent dans les composants situés dans la même branche, soit égaux à zéro.



*Interrupteur ouvert  $\Rightarrow I_1 + I_2 = 0$  ;  $I_3 = 0$*

# Dans quels composants peut-on « couper » le courant ?

- Les résistances, les sources de tension
- **Pas** les sources de courant



# Qu'est-ce qu'une source de courant en électronique de puissance ?

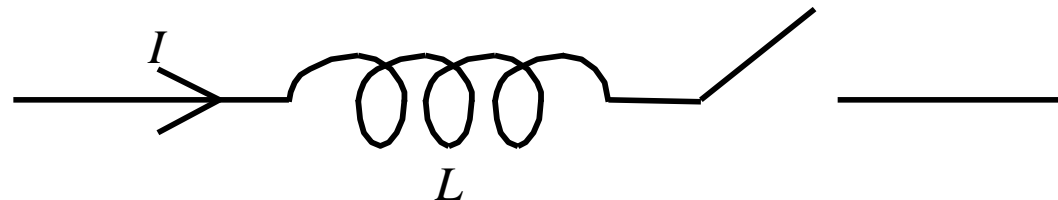
Tout dispositif qui, à l'échelle de temps des commutations des interrupteurs de l'électronique de puissance, présente un courant quasiment constant.

**Exemple** : une inductance de valeur suffisamment élevée

$$L \gg E \cdot t_{\text{off}} / I$$

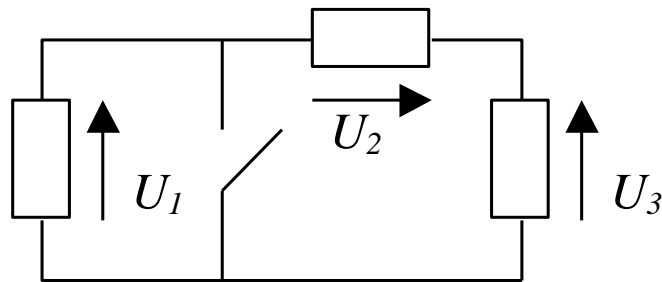
**E** tension maximale supportable par l'interrupteur

**t<sub>off</sub>** temps d'ouverture de l'interrupteur



# Quelles sont les conséquences de la fermeture d'un interrupteur ?

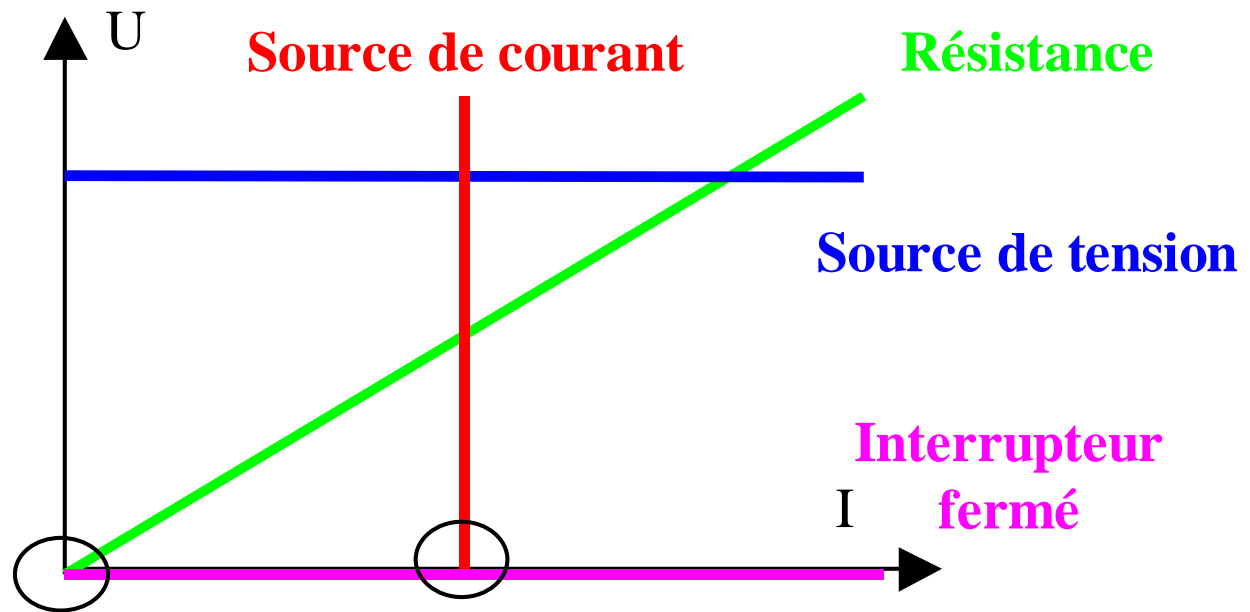
- Fermer un interrupteur signifie :
  - imposer que la tension à ses bornes soit nulle.
  - imposer que la tension sur les mailles qui incluent ce composant soit également nulle.



*Interrupteur fermé*  $\Rightarrow$   $U_1 = 0$  ;  $U_2 + U_3 = 0$

# Aux bornes de quels composants peut-on annuler la tension ?

- Les résistances, les sources de courant
- Pas les sources de tension



# Qu'est-ce qu'une source de tension en électronique de puissance ?

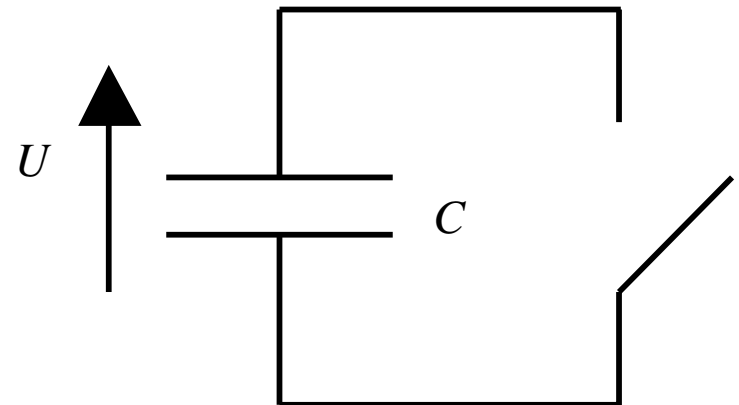
Tout dispositif qui, à l'échelle de temps des commutations des interrupteurs de l'électronique de puissance, présente, à ses bornes, une tension quasiment constante.

**Exemple** : une capacité de valeur suffisamment élevée

$$C \gg I \cdot t_{\text{on}} / U$$

$I$  courant maximal supportable par l'interrupteur

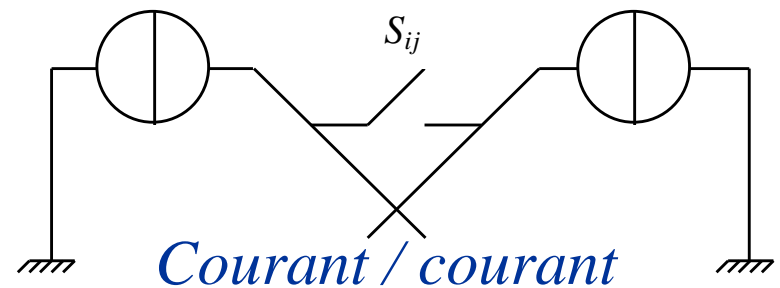
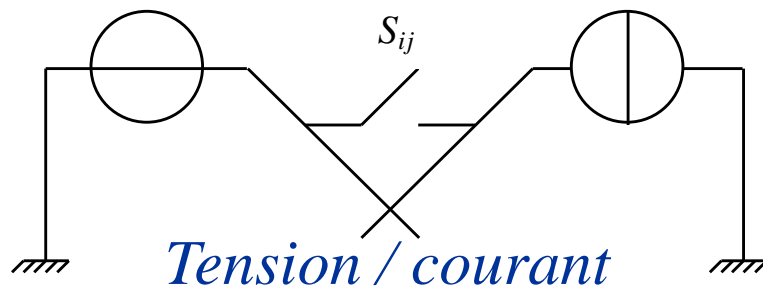
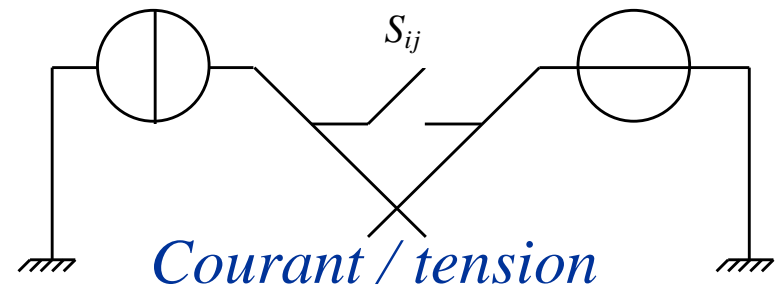
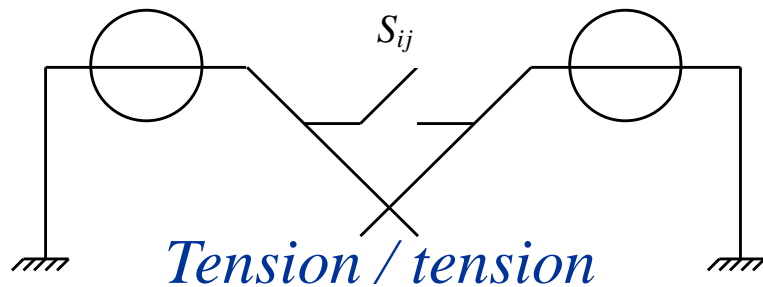
$t_{\text{on}}$  temps de fermeture de l'interrupteur



# Question :

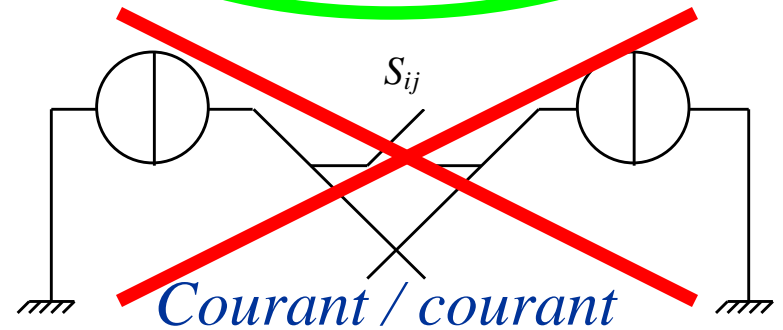
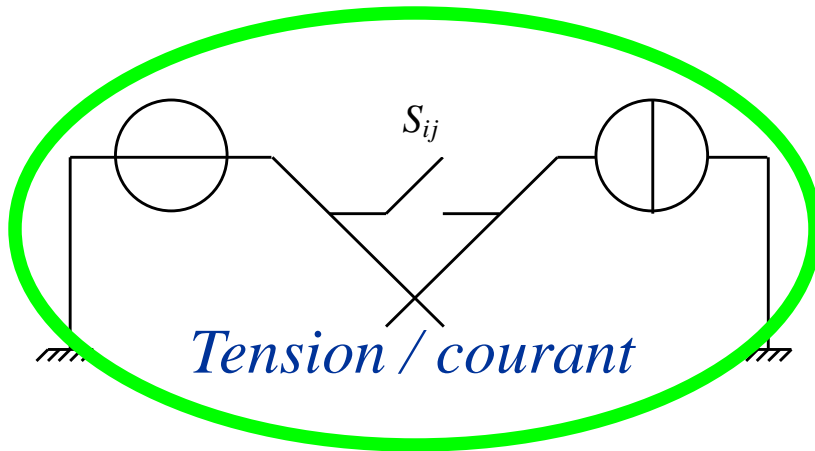
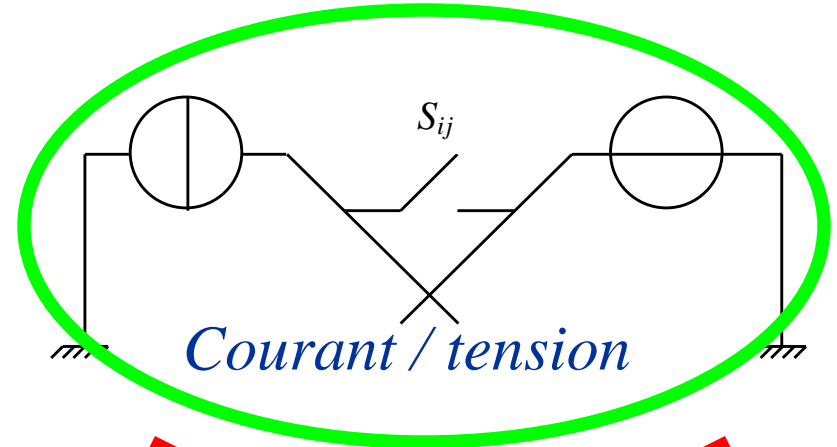
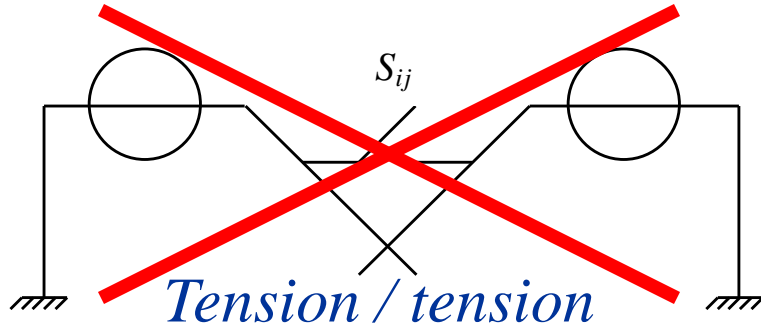
Quand peut-on connecter (ou déconnecter) un générateur et un récepteur ?

## Quatre cas possibles en théorie



+ les cas où le récepteur est une résistance pure

## Deux cas possibles en pratique



# La règle

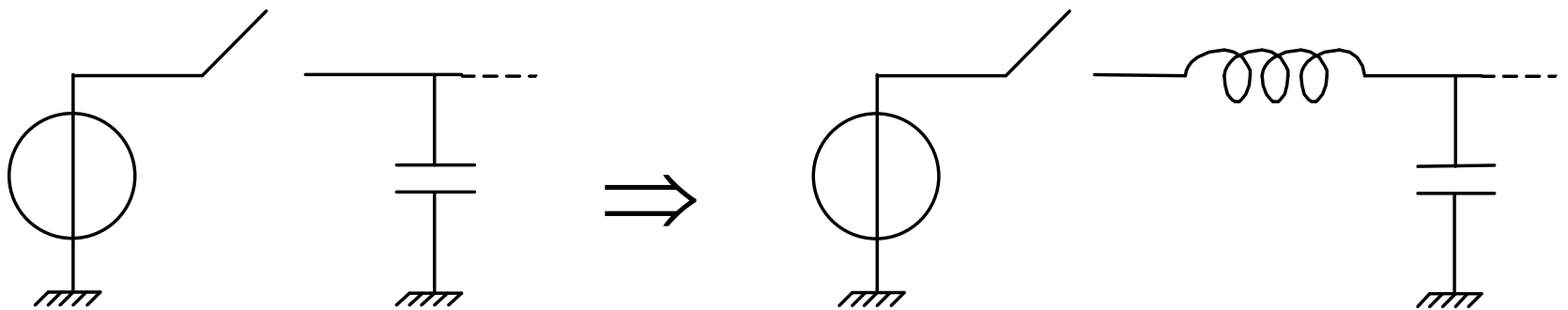
- On ne peut connecter ensemble que des sources de nature différentes
  - une source de tension ne peut donc être connectée qu'à une source de courant
  - une source de courant ne peut donc être connectée qu'à une source de tension

▪ Règle de l'alternance des sources

# Que faire quand le générateur et le récepteur sont de même nature?

**Exemple** : comment connecter une source de tension à une autre source de tension ?

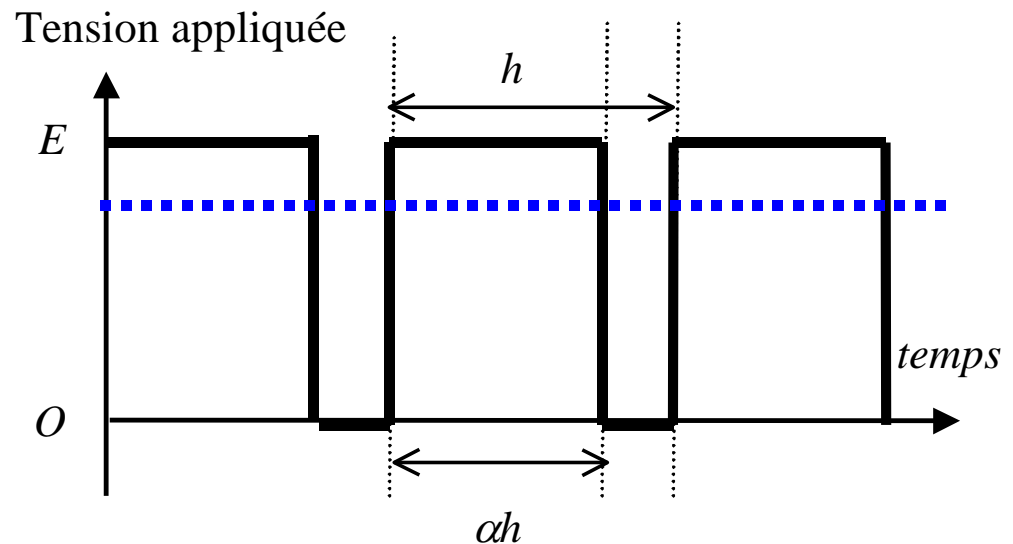
**Solution** : ajouter un élément passif, en l'occurrence une inductance pour transformer le récepteur par exemple en source de courant.



# Principe de la commande des interrupteurs

- Commander un système électronique de puissance c'est déterminer l'instant où chaque interrupteur doit commuter.

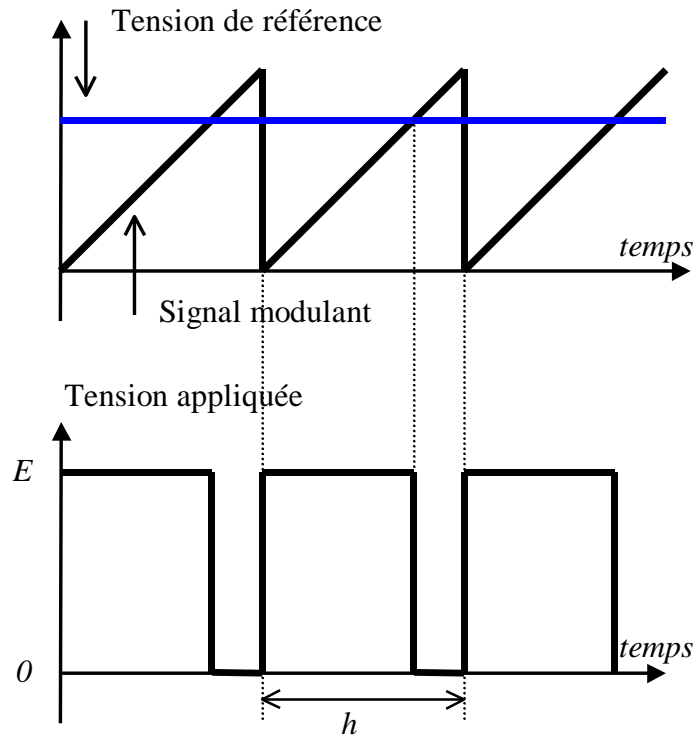
- Exemple :



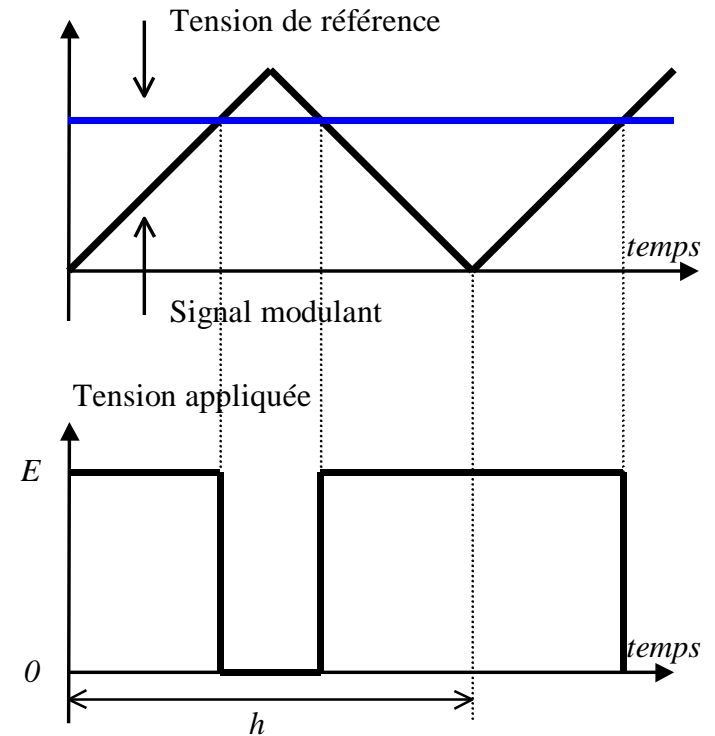
# Technique MLI

- Modulation de largeur d'impulsion (MLI)  
*Pulse Width Modulation (PWM)*
- Principe : on compare un signal d'amplitude proportionnelle à la tension que l'on désire appliquer à une onde de référence périodique, de période  $h$ , et forme donnée.

# Technique MLI



*Porteuse en dents de scie*



*Porteuse triangulaire*

# Technique MLI

- Avantages et inconvénients

- ☹ Complexité de la réalisation (calcul de la tension de référence, génération d'une porteuse, comparaison).

- 😊 Possibilité d'utiliser des algorithmes hautes performances pour le calcul de la tension de référence.

- 😊 Maîtrise de la période de commutation  $h$ .

Autre possibilité : la technique à **hystérésis**

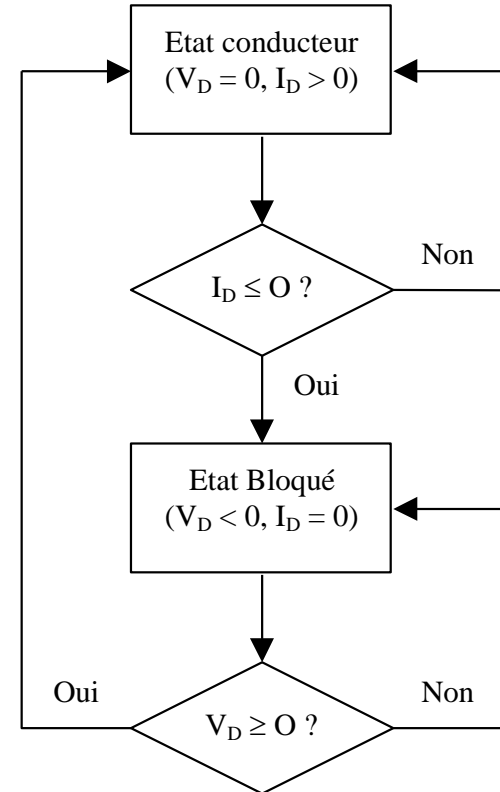
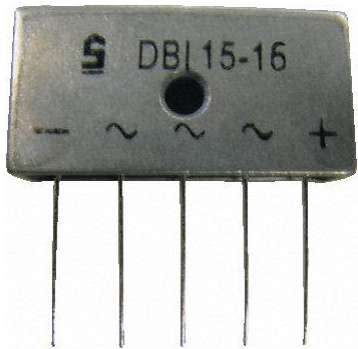
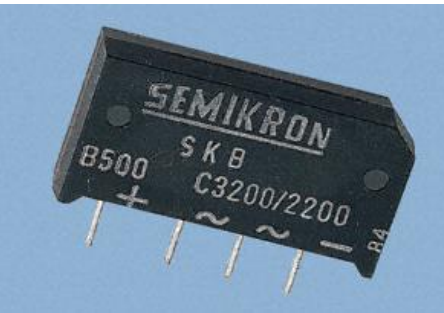
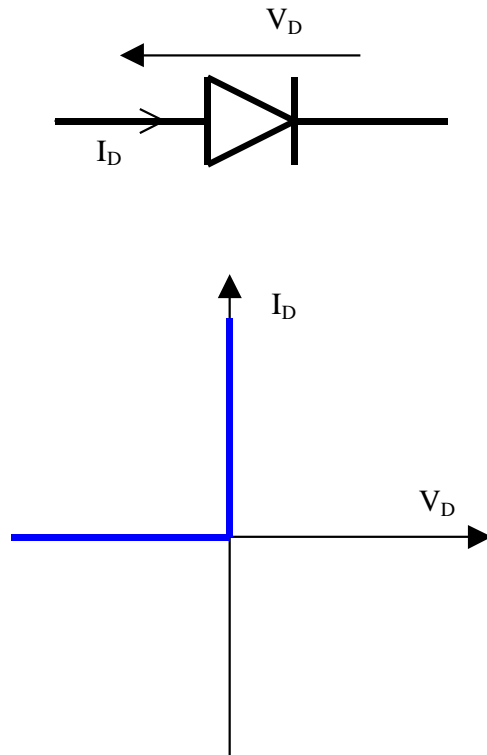
# **Les interrupteurs de l'électronique de puissance**

# La fonction diode

- Un interrupteur à **ouverture et à fermeture spontanée**
  - il s'ouvre (cesse de conduire) quand le courant qui le traverse s'annule (devient légèrement négatif).
  - il se ferme (conduit) quand la tension à ses bornes devient positive (dépasse une certaine valeur appelée tension de seuil).
- L'interrupteur est non commandable

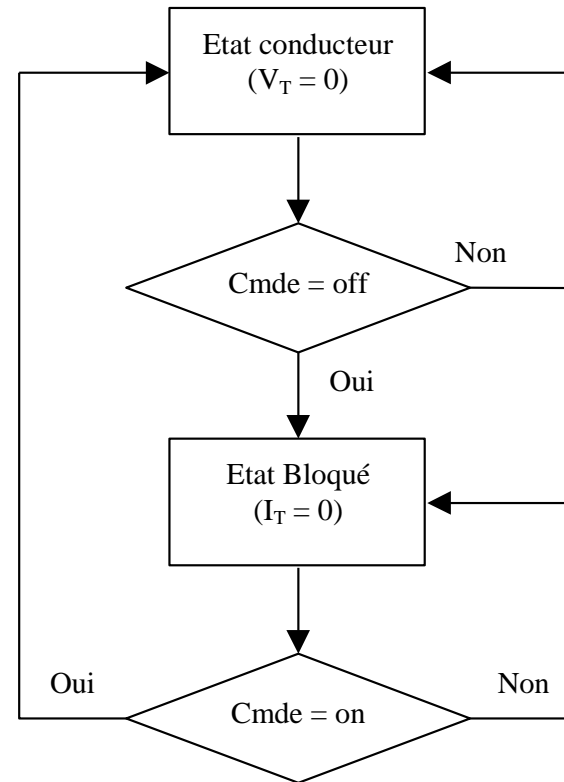
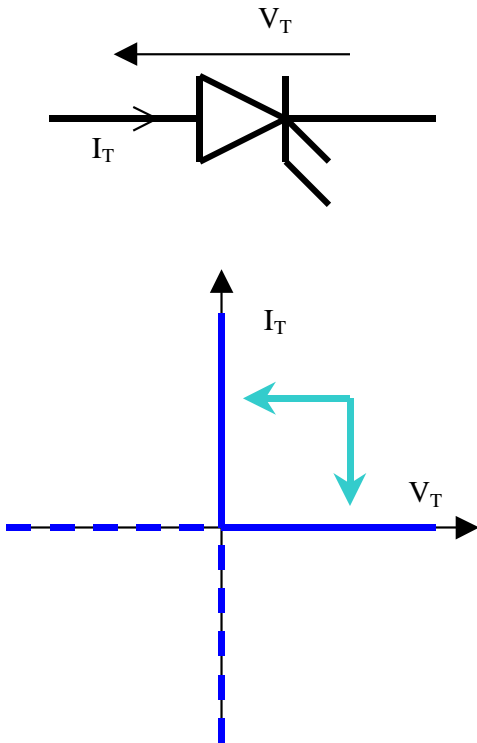
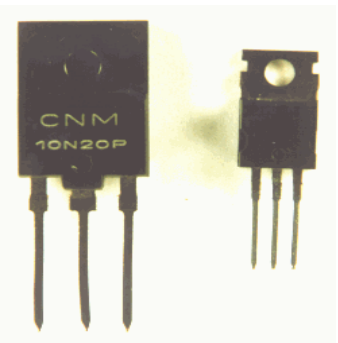


# La fonction diode

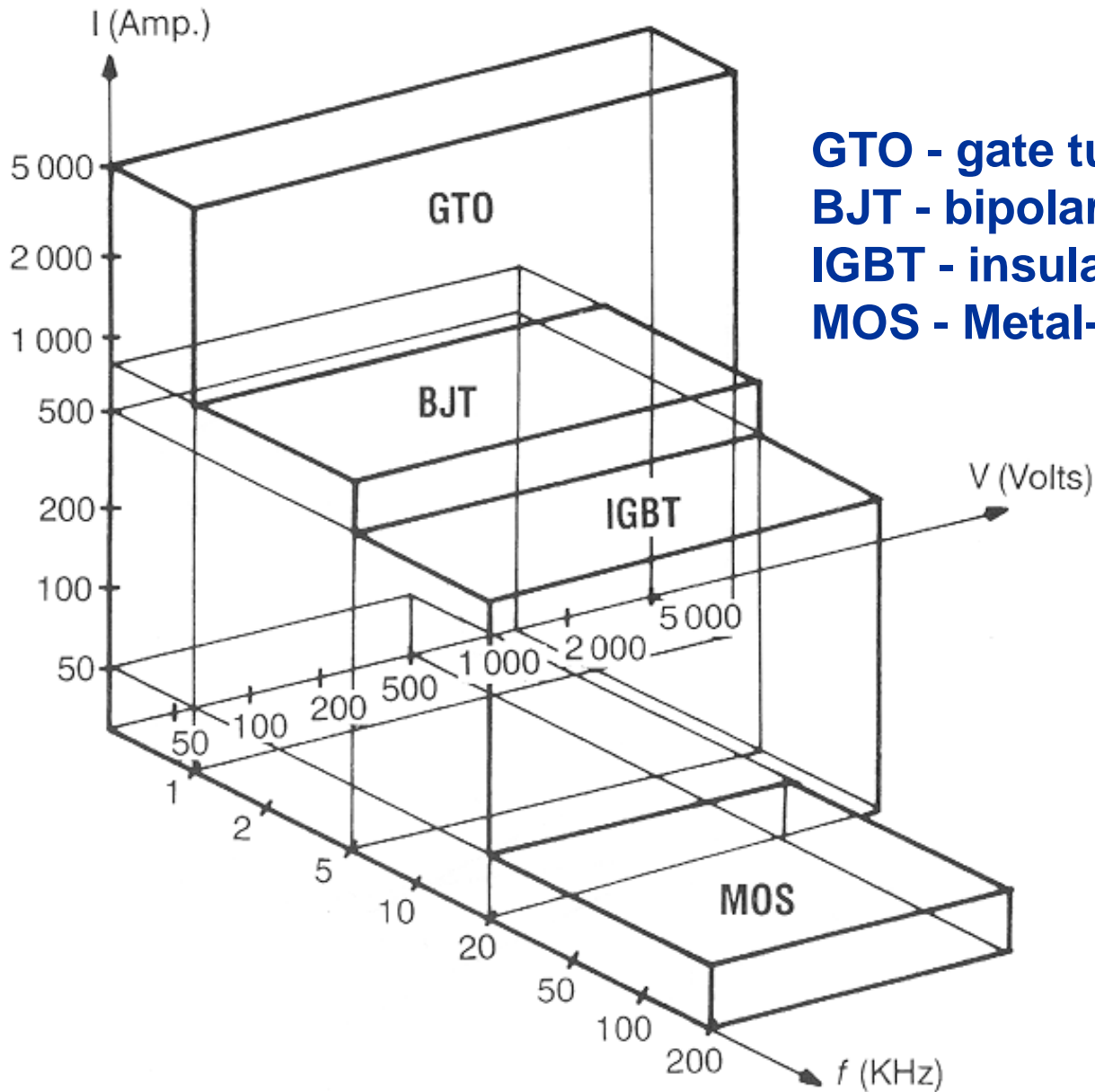


# La fonction transistor

- Un interrupteur à **ouverture et à fermeture commandée**



# Performances des interrupteurs

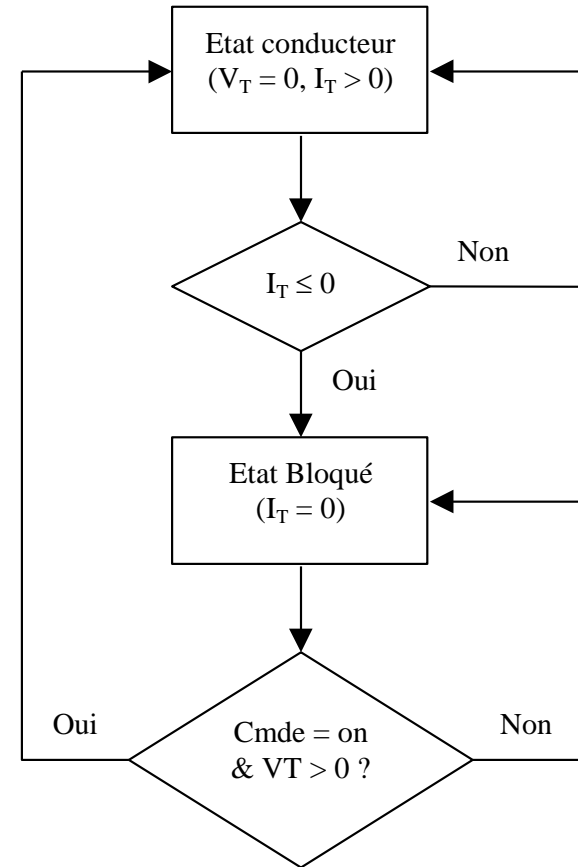
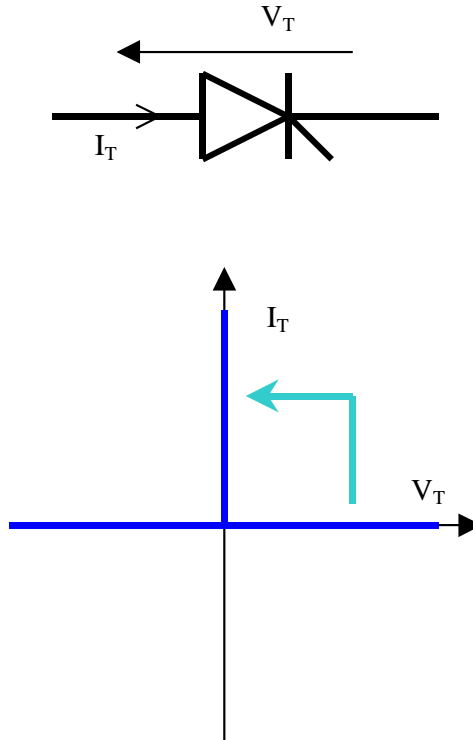


**GTO** - gate turn-off thyristor  
**BJT** - bipolar junction transistor  
**IGBT** - insulated gate bipolar transistor  
**MOS** - Metal-Oxide-Semiconductor

# La fonction thyristor

- Un interrupteur à **ouverture spontanée et à fermeture commandée**
  - il s'ouvre (cesse de conduire) quand le courant qui le traverse s'annule (devient légèrement négatif)  $\Rightarrow$  **comme une diode**
  - il se ferme (conduit) quand un signal de commande est envoyé sur la gâchette et que la tension à ses bornes est positive.

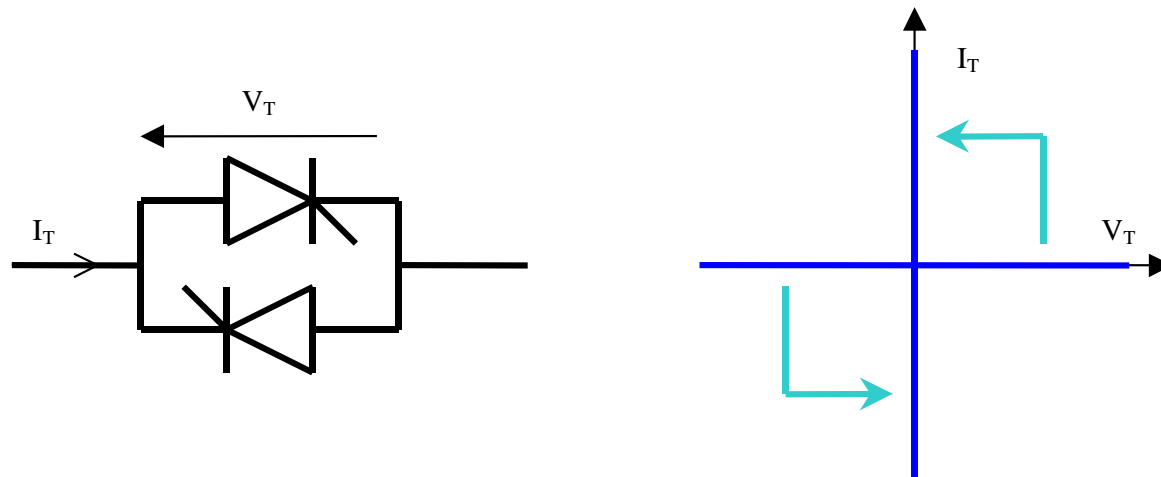
# La fonction thyristor



# Autres interrupteurs

On peut créer d'autres interrupteurs électroniques de puissance en combinant les interrupteurs précédents (et leur commande).

- Exemple : le **triac** = deux thyristors tête-bêche avec la même commande



# **Les convertisseurs complètement commandés**

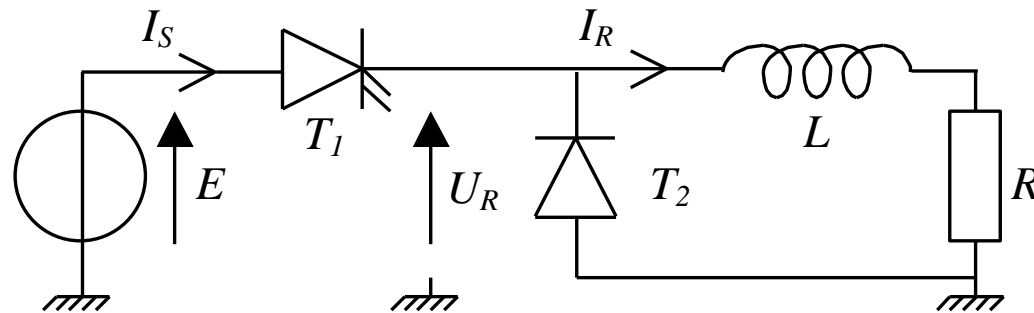
*Les convertisseurs continu-continu (DC-DC)*

# Les convertisseurs complètement commandés

- Les convertisseurs continu-continu (DC-DC)  
*(Hacheurs, alimentations à découpage)*
- Les convertisseurs continu-alternatif (DC-AC)  
*(Onduleurs monophasés et triphasés)*
- Autres convertisseurs  
*(Redresseurs MLI, filtres actifs)*

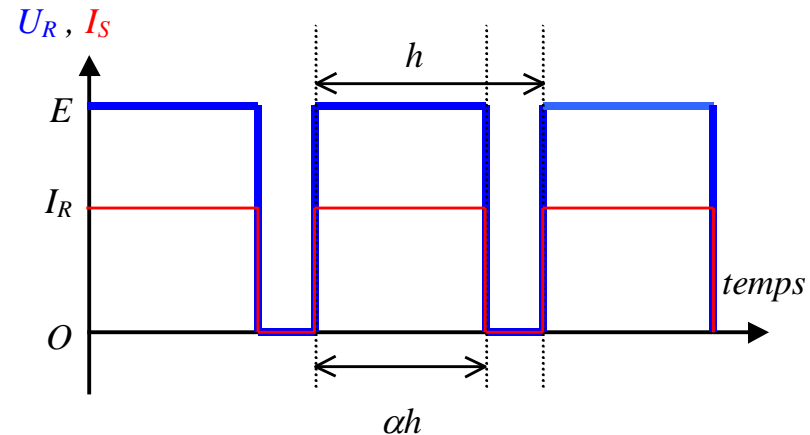
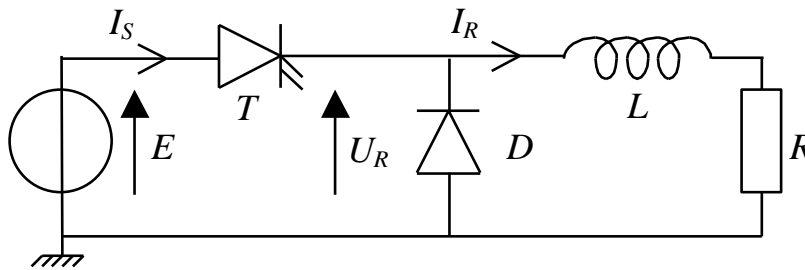
# Le hacheur série

- Conditions d'ouverture et de fermeture des interrupteurs:
  - quand  $T_1$  se ferme, la source  $E$  est **a priori** court-circuitée et le courant dans la diode  $T_2$  tente de s'inverser  $\Rightarrow$  elle s'ouvre automatiquement
  - quand  $T_1$  s'ouvre le courant  $I_R$  **a priori** chute, la tension  $U_R = RI_R + Ldi_R/dt$  devient négative, donc celle aux bornes de la diode positive  $\Rightarrow$  elle se ferme automatiquement



# Le hacheur série

- Si  $T$  est passant pendant une durée  $\alpha.h$  au cours d'une période  $h$  :
  - La tension moyenne aux bornes du récepteur vaut
$$\langle U_R \rangle = \alpha.E$$
  - Le courant moyen fourni par le générateur vaut
$$\langle I_S \rangle = \alpha.I_R$$



## Le hacheur série

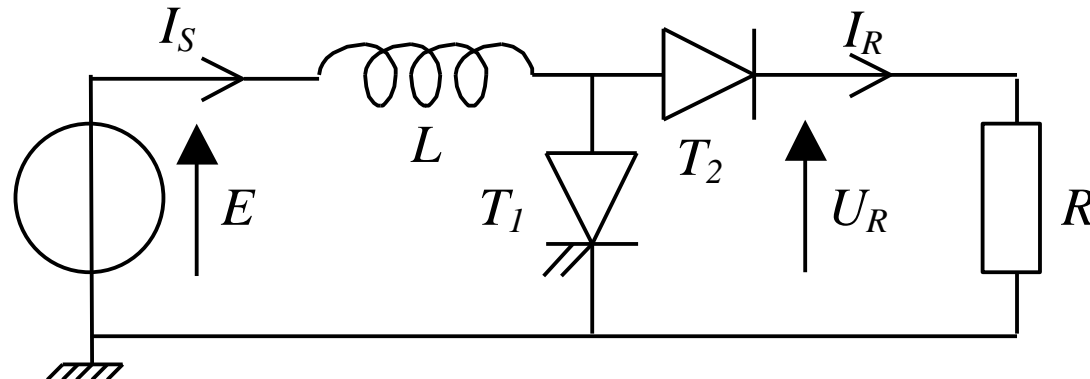
- Le hacheur série est un convertisseur qui conserve l'énergie :

$$P_S = E \cdot \langle I_S \rangle = E \cdot \alpha \cdot I_R \quad P_R = \langle U_R \rangle \cdot I_R = \alpha \cdot E \cdot I_R$$

- Le hacheur série est un *hacheur dévolteur*  
La tension moyenne aux bornes du récepteur est *inférieure* à celle de la source  
⇒ Le courant moyen dans le récepteur est *supérieur* à celui de la source

# Le hacheur parallèle

- Conditions de commutation :
  - Quand  $T_1$  s'ouvre, la tension aux bornes de la diode devient  $V_D = E - L \frac{dI_S}{dt} > 0 \Rightarrow$  elle conduit  $\Rightarrow V_D = 0$
  - Quand  $T_1$  se ferme, le courant  $I_S$  passe entièrement dans  $T_1$  (chemin de moindre résistance) et  $I_R$  dans la diode  $T_2$  s'annule



# Le hacheur parallèle

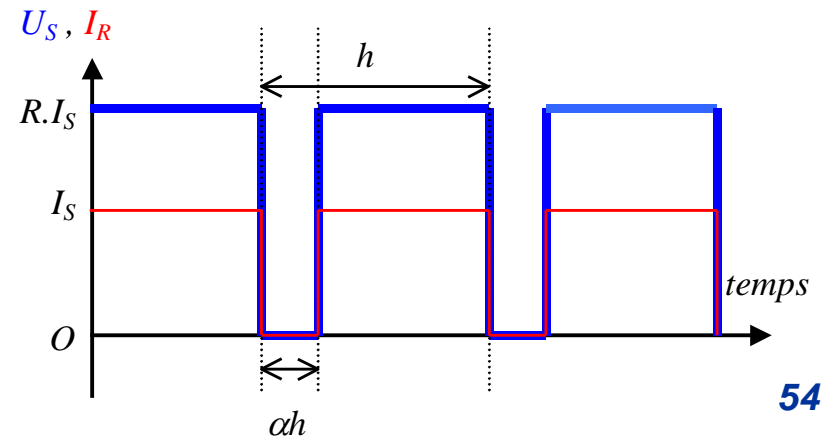
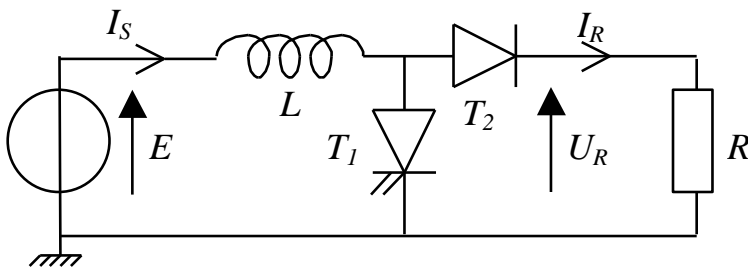
- Si  $T$  est passant pendant une durée  $\alpha.h$  au cours d'une période  $h$  :

- Le courant moyen dans le récepteur vaut :

$$\langle I_R \rangle = (1-\alpha).I_S$$

- La tension moyenne aux bornes de la source vaut :

$$\langle U_S \rangle = (1-\alpha).U_R$$



# Le hacheur parallèle

- Le hacheur parallèle est un convertisseur qui conserve l'énergie :

$$P_S = \langle U_S \rangle \cdot I_S = (1-\alpha) \cdot U_R \cdot I_S$$

$$P_R = U_R \cdot I_R = U_R \cdot (1-\alpha) \cdot I_S$$

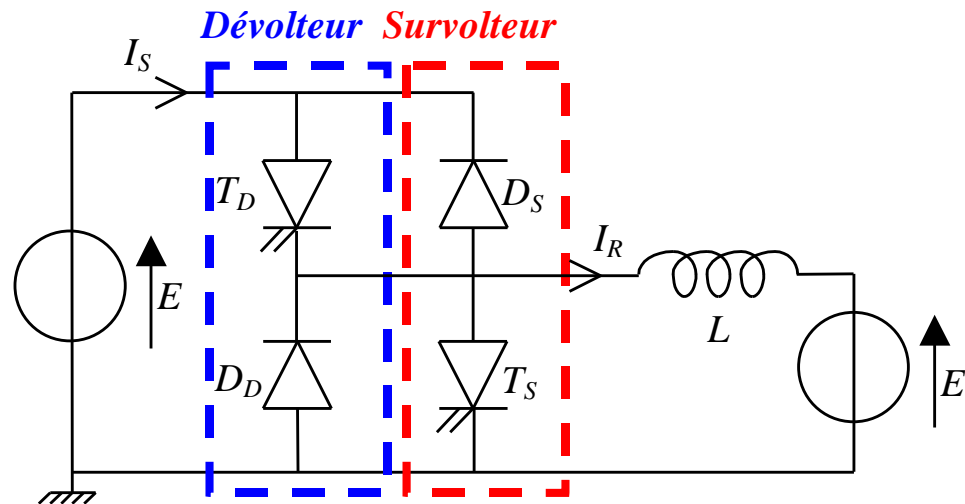
- Le hacheur parallèle est un *hacheur survolteur*

Le courant moyen dans le récepteur est *inférieur* à celui de la source

⇒ La tension moyenne aux bornes du récepteur est *supérieure* à celle de la source

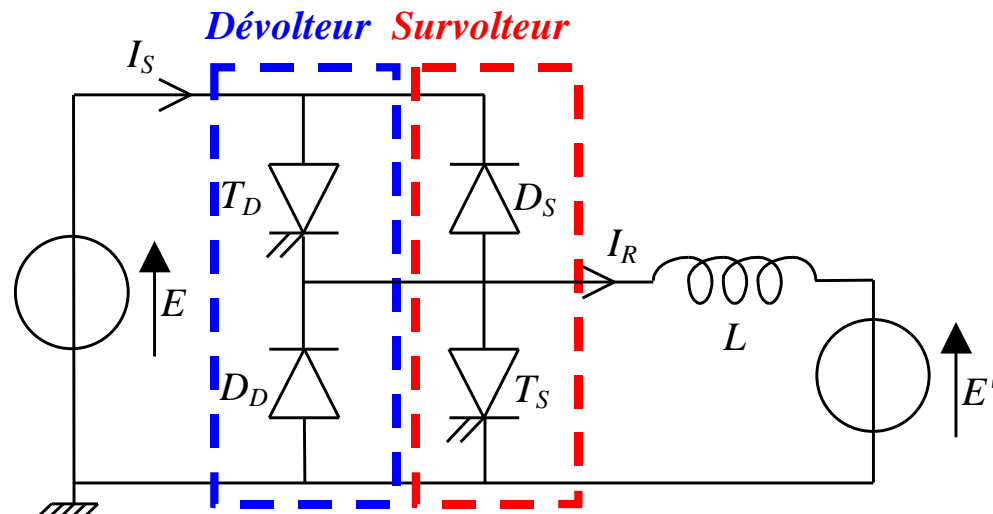
# Réversibilité en puissance

- Les hacheurs série et parallèle sont irréversibles en puissance
- Idée : associer un hacheur série et un hacheur parallèle pour obtenir un hacheur réversible en puissance.



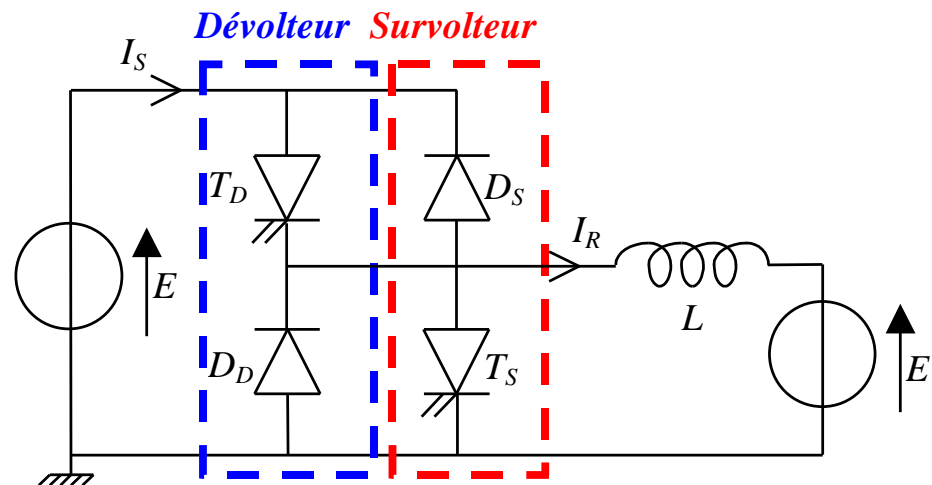
# Réversibilité en puissance

- Fonctionnement :
  - La tension du récepteur ( $E'$ ) est inférieure à celle de la source ( $E$ )
  - Quand  $I_R > 0$ , la puissance va de la source vers le récepteur  $\Rightarrow$  seul le hacheur dévolteur fonctionne
  - Quand  $I_R < 0$ , la puissance va du « récepteur » vers la « source »  $\Rightarrow$  seul le hacheur survolteur fonctionne



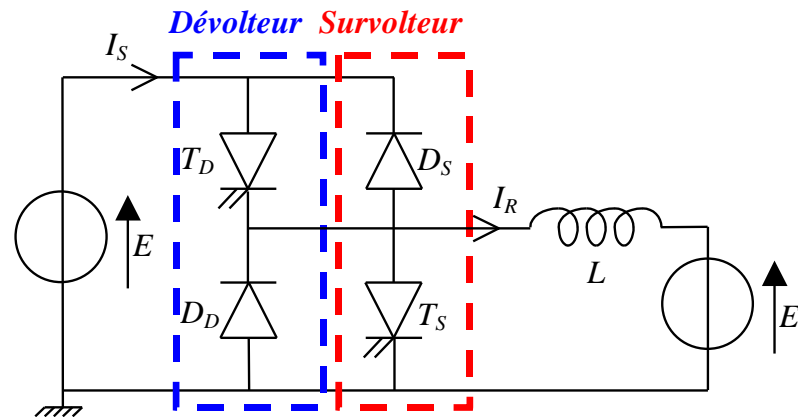
# Réversibilité en puissance

- Fonctionnement :
    - Les tensions aux bornes de la source ( $E$ ) et récepteur ( $E'$ ) sont toujours positives
    - Seul les courants dans le récepteur ( $I_R$ ) et dans la source ( $I_S$ ) peuvent changer de sens
- ⇒ On parle donc d'un hacheur réversible en courant



# Hacheur réversible en courant

- Si  $I_R > 0$ , on a :  $E' = \langle U_R \rangle = \alpha_{Dév} \cdot U_S = \alpha_{Dév} \cdot E$
- Si  $I_R < 0$ , on a :  $E' = \langle U_S \rangle = (1 - \alpha_{Sur}) \cdot U_R = (1 - \alpha_{Sur}) \cdot E$
- Pour garder la même relation entre  $E$  et  $E'$ ,  $\forall I_R$  il faut et il suffit d'avoir :  $\alpha_{Dév} = 1 - \alpha_{Sur}$

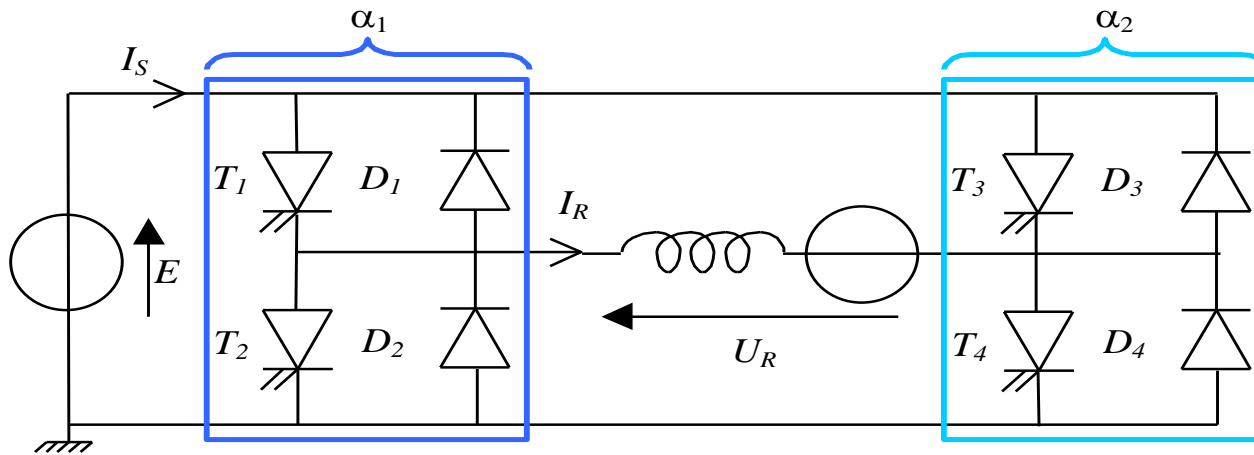


# Hacheur réversible en courant et en tension

- Idée : deux hacheurs réversibles en courant
- Valeur de la tension aux bornes de la charge

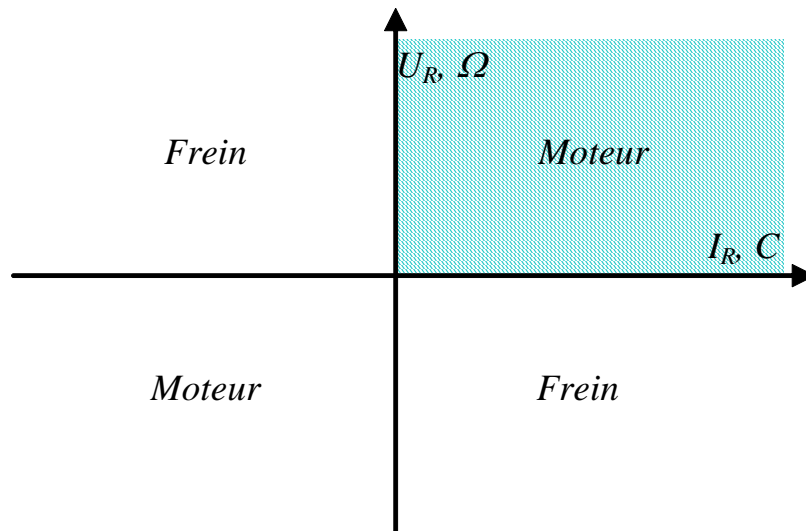
$$\langle U_R \rangle = \alpha_1 \cdot E - \alpha_2 \cdot E$$

- Si  $\alpha_1 = (1 - \alpha_2) = \alpha$  :  $\langle U_R \rangle = (2 \cdot \alpha - 1) \cdot E$



# Application à l'alimentation de moteurs DC

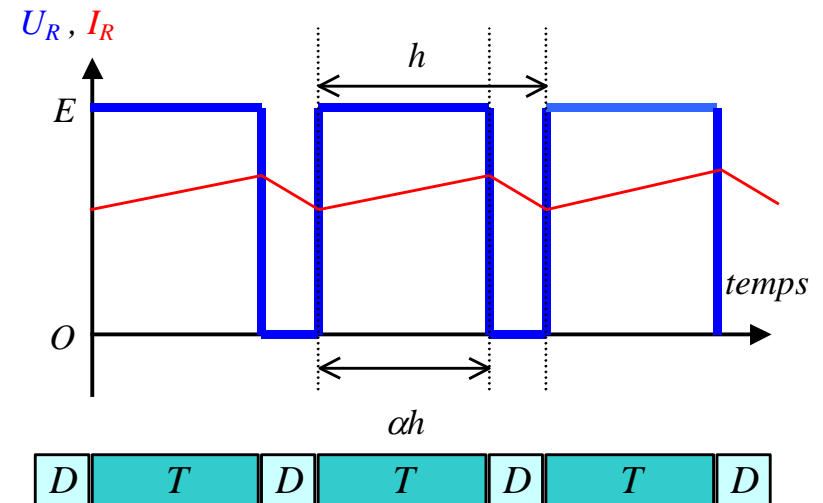
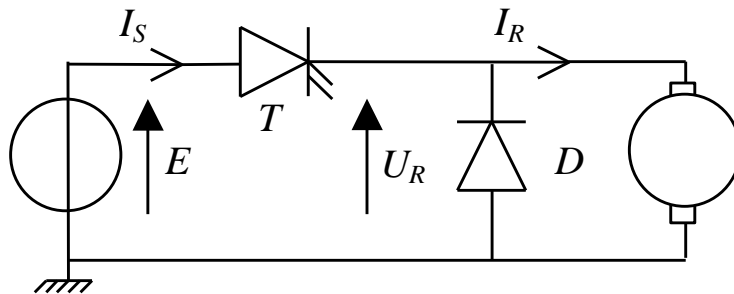
- Alimentation par un convertisseur non réversible  
⇒ fonctionnement 1 quadrant



- Fonctionnement dans un seul sens (pas de marche arrière possible).
- Pas de freinage possible (arrêt en roue libre ou par frein extérieur)

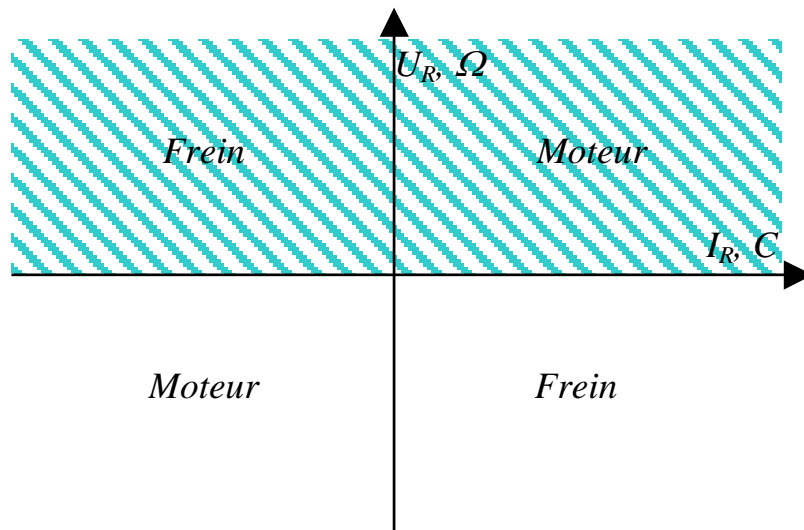
# Application à l'alimentation de moteurs DC

- Valeur de la tension aux bornes du moteur
  - Si le courant dans le moteur ne s'annule jamais (cas de la conduction continue) :  $\langle U_R \rangle = \alpha \cdot E$



# Alimentation par un hacheur réversible en courant

- Fonctionnement 2 quadrants

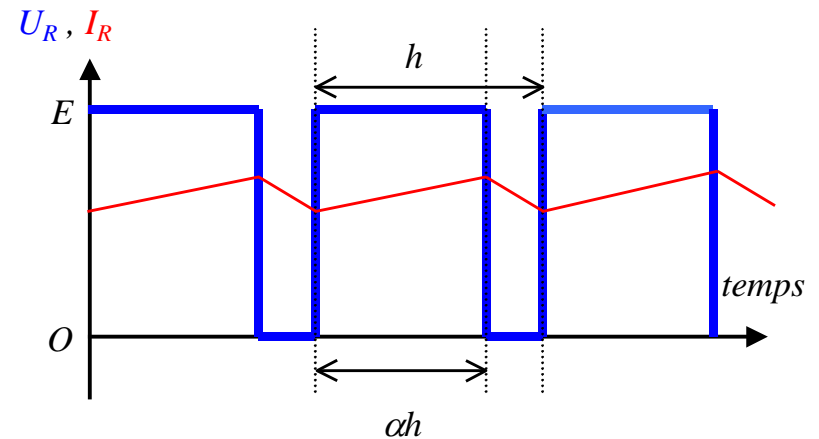
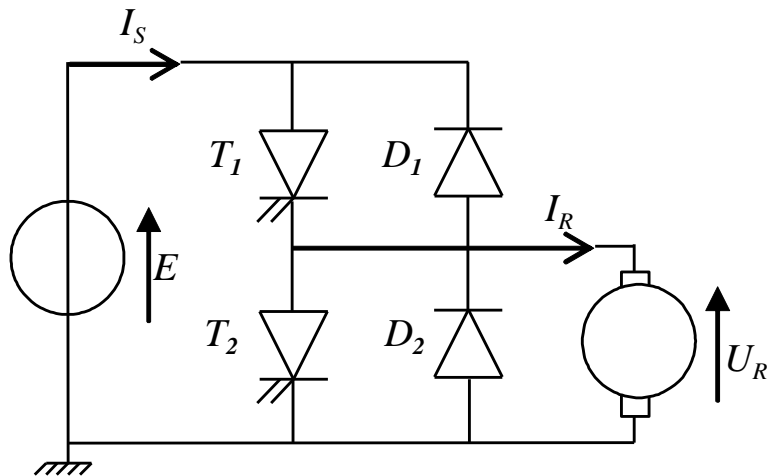


- Fonctionnement dans un seul sens (pas de marche arrière possible).
- Freinage possible (si le générateur est réversible en courant!)
- Pas de problème lié à une conduction discontinue

# Alimentation par un hacheur réversible en courant

- Si commande complémentaire:

$$\langle U_R \rangle = \alpha \cdot E, \quad \nabla I_R$$

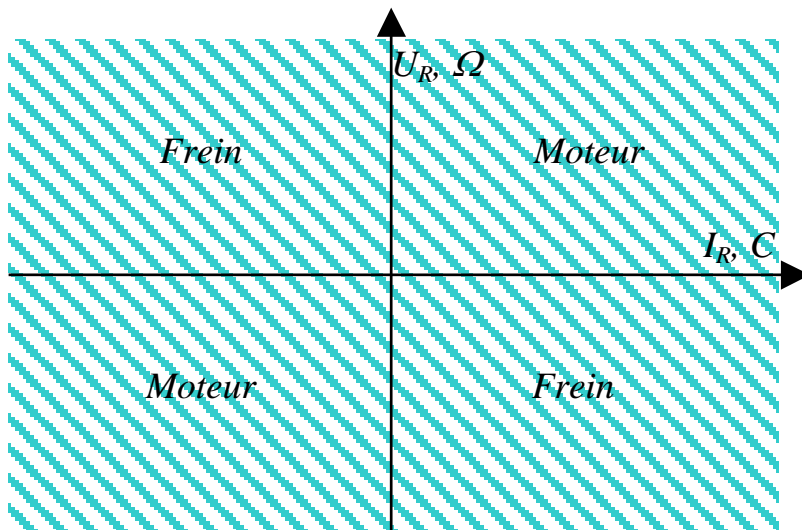


$D_2$	$T_1$	$D_2$	$T_1$	$D_2$	$T_1$	$D_2$
$T_2$	$D_1$	$T_2$	$D_1$	$T_2$	$D_1$	$T_2$

ou

# Alimentation par un hacheur réversible en courant et en tension

- Fonctionnement 4 quadrants

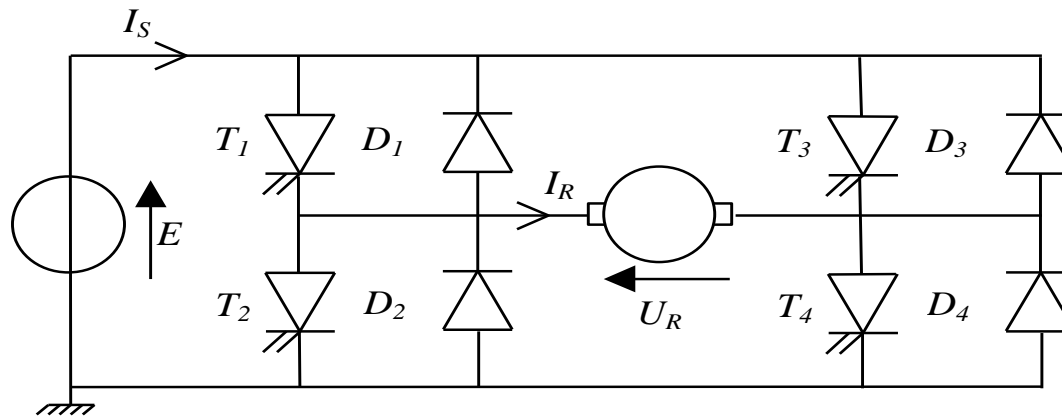


- Fonctionnement dans les deux sens (marche avant / marche arrière).
- Freinage possible (si le générateur est réversible en courant!)
- Pas de problème lié à une conduction discontinue

# Alimentation par un hacheur réversible en courant et en tension

- Valeur de la tension aux bornes du moteur

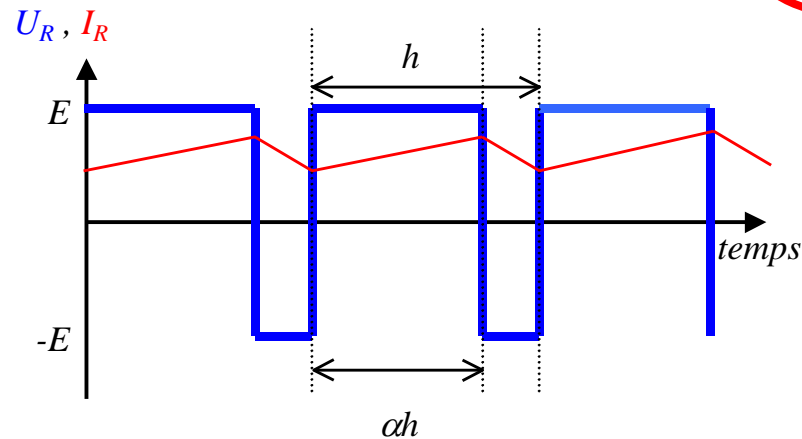
$$\langle U_R \rangle = (2.\alpha - 1).E$$



# Alimentation par un hacheur réversible en courant et en tension

- Valeur de la tension aux bornes du moteur

$$\langle U_R \rangle = (2.\alpha - 1).E, \quad \forall I_R$$



$D_2$	$T_1$	$D_2$	$T_1$	$D_2$	$T_1$	$D_2$
$D_3$	$T_4$	$D_3$	$T_4$	$D_3$	$T_4$	$D_3$
$T_2$	$D_1$	$T_2$	$D_2$	$T_2$	$D_1$	$T_2$
$T_3$	$D_4$	$T_3$	$D_4$	$T_3$	$D_4$	$T_3$

ou

# Limitation de la fluctuation du courant dans le moteur

- Ondulation de courant

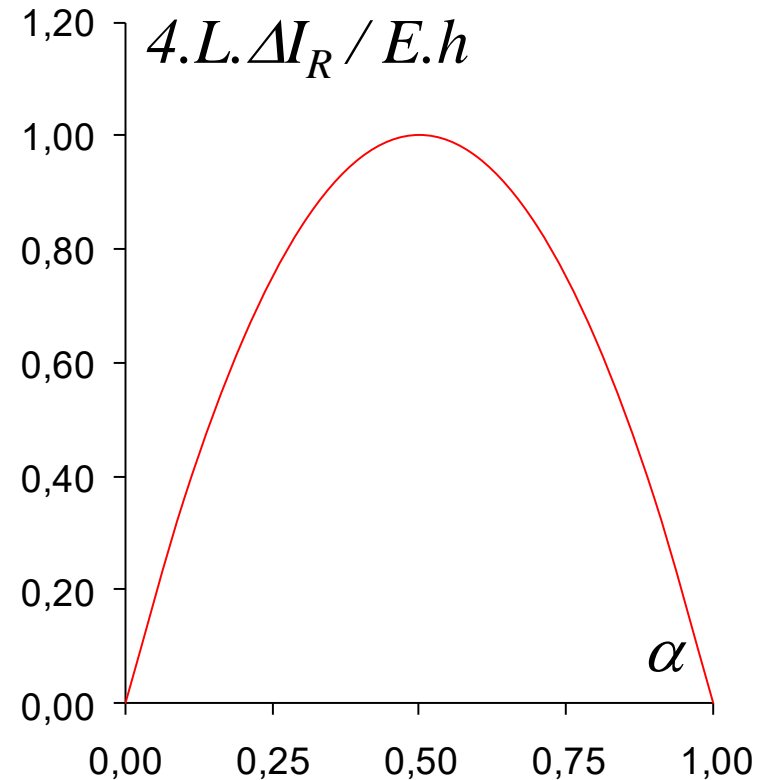
$$\Delta I_R = \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot E \cdot h / L$$

- Valeur maximale pour

$$\alpha = 0,5 \Rightarrow \Delta I_{R,max} = E \cdot h / 4L$$

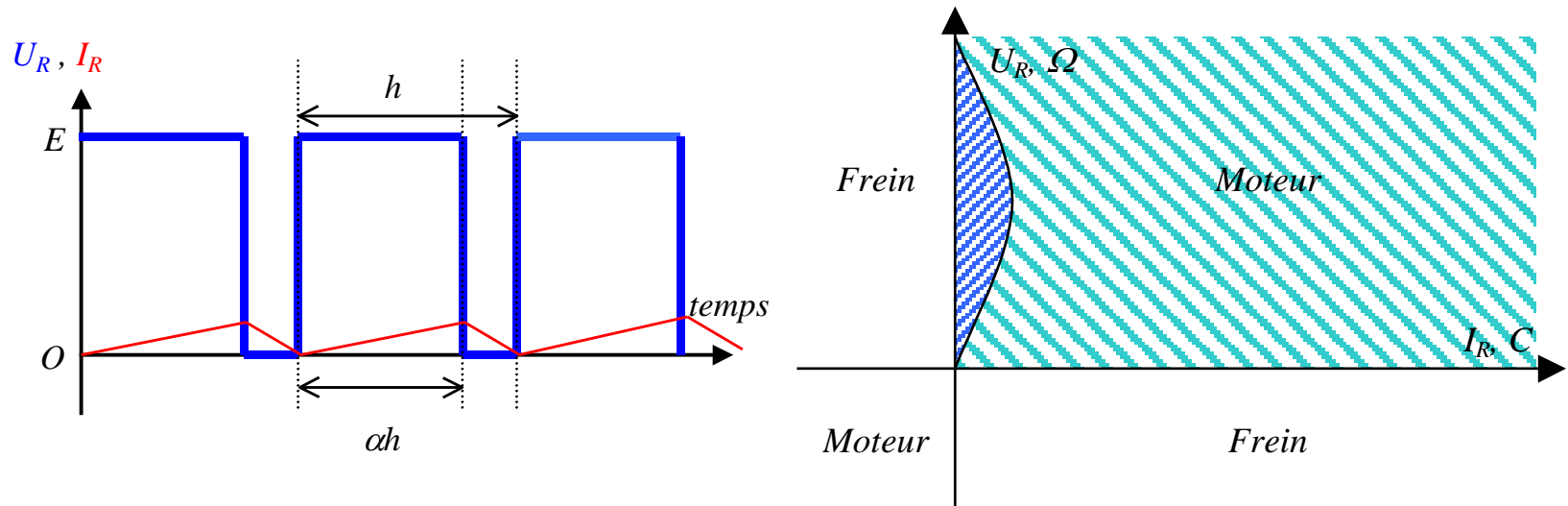
- Pour diminuer  $\Delta I_R$ , il faut :

- réduire  $h$  (et augmenter les pertes par commutation)
- augmenter  $L$  (introduire une inductance de lissage)



# Limite conduction continue / conduction discontinue

- A la limite entre la conduction continue et discontinue, on a  $I_{R,min} = 0$ 
  - $\Rightarrow I_{R,max} = \Delta I_R = \alpha.(1-\alpha).E.h / L$
  - $\Rightarrow \langle I_R \rangle = (I_{min} + I_{max})/2 = \alpha.(1-\alpha).E.h / 2.L$



# **Electronique de puissance**

**François BERNOT : Composants de l'électronique de puissance**

**Références : Techniques de l'ingénieur**

**Dossier : E3960**

**Bases documentaires : Electronique**

**François BERNOT : Électronique de puissance – Introduction**

**Références : Techniques de l'ingénieur**

**Dossier : E3958**

**Bases documentaires : Electronique**

**François BERNOT : Modulations MLI et MPI**

**Références : Techniques de l'ingénieur**

**Dossier : E3967**

**Bases documentaires : Electronique**

**François BERNOT : Hacheurs : fonctionnement**

**Références : Techniques de l'ingénieur**

**Dossier : E3964**

**Bases documentaires : Electronique**