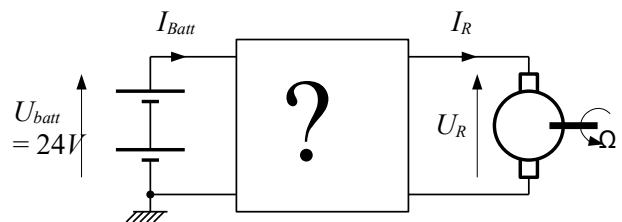


Technologies des convertisseurs et des actionneurs



TECHNOLOGIES DES CONVERTISSEURS ET DES ACTIONNEURS

5ème année IS - Année 2025-2026

Organisation du cours :

- CM : 2 séances de 1h15
- TD : 4 séances de 1h15
- TP : 3 séances de 2h30

Plan du cours :

- I. Principes et règles de fonctionnement des convertisseurs statiques*
- II. Les hacheurs*

TECHNOLOGIES DES CONVERTISSEURS ET DES ACTIONNEURS

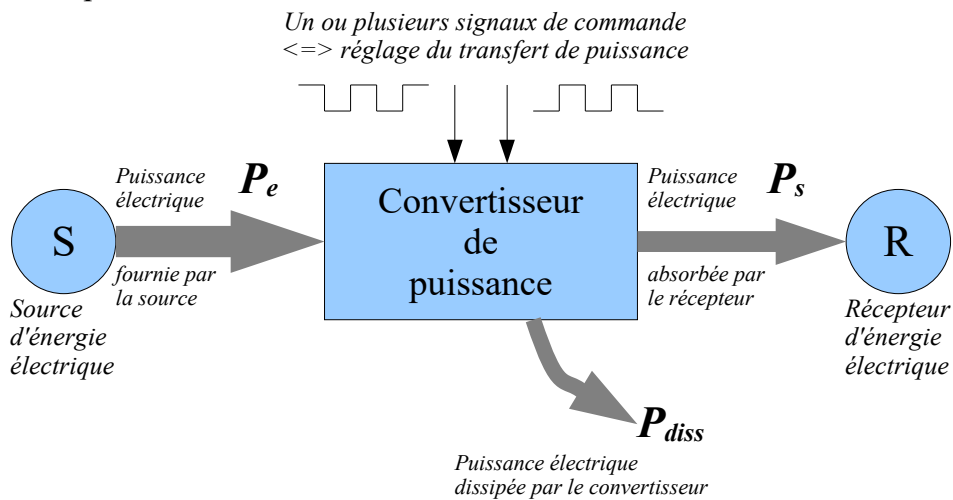
5ème année IS - Année 2024-2025

CHAPITRE 1

Principes et règles de fonctionnement des convertisseurs statiques

I.1) Qu'est-ce que l'électronique de puissance ?

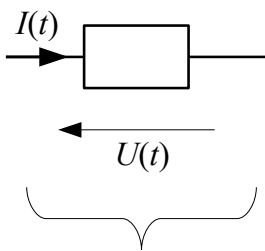
Discipline dans laquelle on cherche à concevoir et à faire fonctionner des convertisseurs *statiques* de puissance.



=> Les convertisseurs sont dits « statiques » car ils ne contiennent aucune pièce mécanique en mouvement.

I.1) Notion de puissance et d'énergie

Considérons un dipôle quelconque :



- Puissance instantanée absorbée par le dipôle :

$$p(t) = U(t) \cdot I(t)$$

Unité : le Watt $W \equiv V \cdot A$

*Fléchage en convention récepteur :
 $U(t)$ et $I(t)$ de sens contraires.*

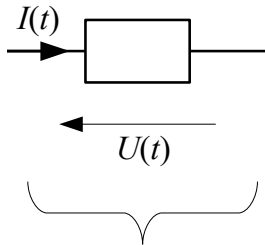
- Énergie absorbée par le dipôle durant une durée $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} U(t) \cdot I(t) \cdot dt$$

Unité : le Joule $J \equiv W \cdot s \equiv V \cdot A \cdot s$

I.1) Notion de puissance et d'énergie

Cas particulier (très fréquent) d'un régime périodique dans lequel $U(t)$ et $I(t)$ sont T-périodiques :



- Puissance moyenne absorbée par le dipôle :

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U(t) \cdot I(t) \cdot dt$$

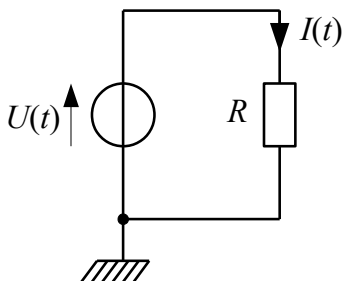
Unité : le Watt $W \equiv V \cdot A$

Fléchage en convention récepteur :
 $U(t)$ et $I(t)$ de sens contraires.

I.1) Notion de puissance et d'énergie

Valeur efficace d'une tension $U(t)$ T-périodique :

On applique une tension $U(t)$ T-périodique aux bornes d'une résistance.

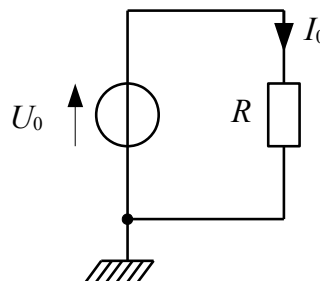


Puissance moyenne absorbée par la résistance :

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U(t) \cdot I(t) \cdot dt$$

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{U(t)^2}{R} \cdot dt$$

Régime continu équivalent : On applique une tension U_0 continue aux bornes de cette même résistance



Puissance moyenne absorbée par la résistance :

$$\langle P \rangle = U_0 \cdot I_0 = \frac{U_0^2}{R}$$

Dans les 2 cas : même puissance dissipée

$$\Rightarrow \langle P \rangle = \frac{U_0^2}{R} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{U(t)^2}{R} \cdot dt \Rightarrow$$

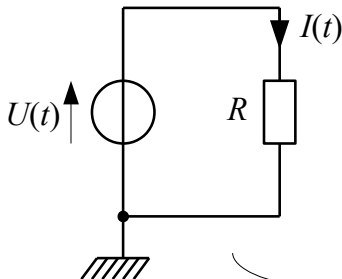
Valeur efficace de la tension $U(t)$:

$$U_0 = U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T U(t)^2 \cdot dt}$$

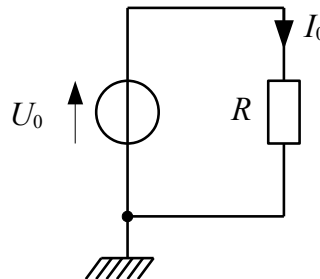
I.1) Notion de puissance et d'énergie

Valeur efficace d'une tension $U(t)$ T-périodique :

Régime T-périodique :



Régime continu équivalent :



Dans les 2 cas : même puissance dissipée

Ainsi, la valeur efficace d'une tension $U(t)$ (T-périodique) est égale à la tension continue (U_0) qu'il faut appliquer aux bornes de la résistance pour obtenir la même dissipation de puissance.

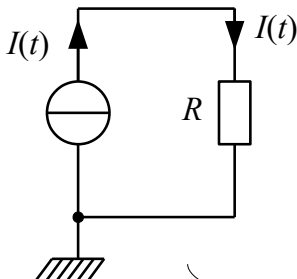
Valeur efficace de la tension $U(t)$:

$$U_0 = U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T U(t)^2 \cdot dt}$$

I.1) Notion de puissance et d'énergie

Valeur efficace d'une intensité $I(t)$ T-périodique :

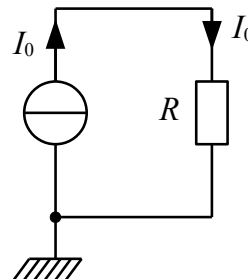
Régime T-périodique :



Puissance moyenne absorbée par la résistance :

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T R \cdot I(t)^2 \cdot dt$$

Régime continu équivalent :



Puissance moyenne absorbée par la résistance :

$$\langle P \rangle = U_0 \cdot I_0 = R \cdot I_0^2$$

Dans les 2 cas : même puissance dissipée

Ainsi, la valeur efficace d'une intensité $I(t)$ (T-périodique) est égale à l'intensité continue (I_0) qu'il faut injecter dans la résistance pour obtenir la même dissipation de puissance.

Valeur efficace de l'intensité $I(t)$:

$$I_0 = I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T I(t)^2 \cdot dt}$$

I.1) Notion de rendement énergétique

Puissance électrique moyenne
fournie par la source

$$\langle P_e \rangle = \langle U_e \cdot I_e \rangle$$

Puissance électrique moyenne
Absorbée par le récepteur

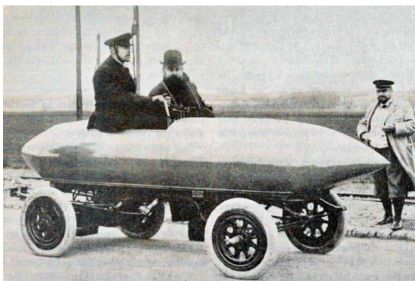
$$\langle P_s \rangle = \langle U_s \cdot I_s \rangle$$

Puissance électrique
Moyenne dissipée (perdue)
par le convertisseur $\langle P_{diss} \rangle$

- Bilan de puissance moyenne : $\langle P_e \rangle = \langle P_s \rangle + \langle P_{diss} \rangle$
- Rendement énergétique : $\eta = \frac{\langle P_s \rangle}{\langle P_e \rangle}$

I.2) Un problème historique :

Réglage du transfert de puissance d'une batterie vers une machine à courant continu



« La jamais contente » (Camille Jenatton)

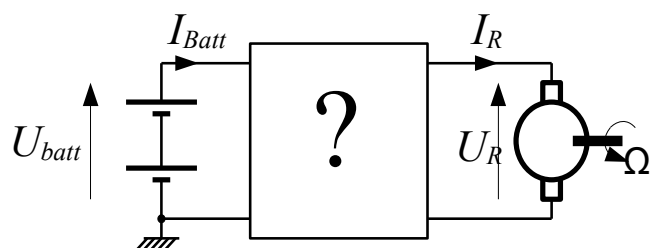
1er véhicule à dépasser les 100 km/h en 1899.

Équipée de 2 moteurs électriques d'une puissance totale de 50kW,
et d'une batterie d'accumulateurs de 100 éléments de 2V.

Longueur : 3,80m

Masse : 1450 kg (dont presque la moitié de batteries)

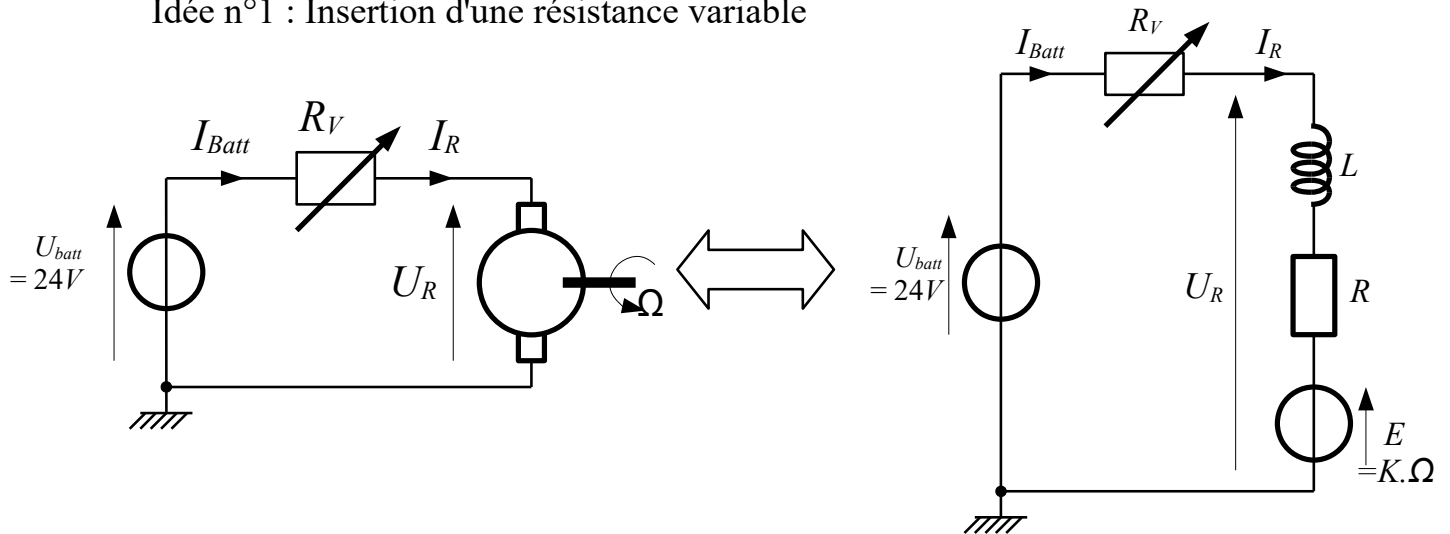
(source : wikipédia)



On désire moduler le transfert de puissance de la batterie vers le moteur afin de réaliser une variation de vitesse de celui-ci.
Objectif : avoir une accélération et une décélération douces, progressives et sans à-coups.

I.2) Une solution intuitive :

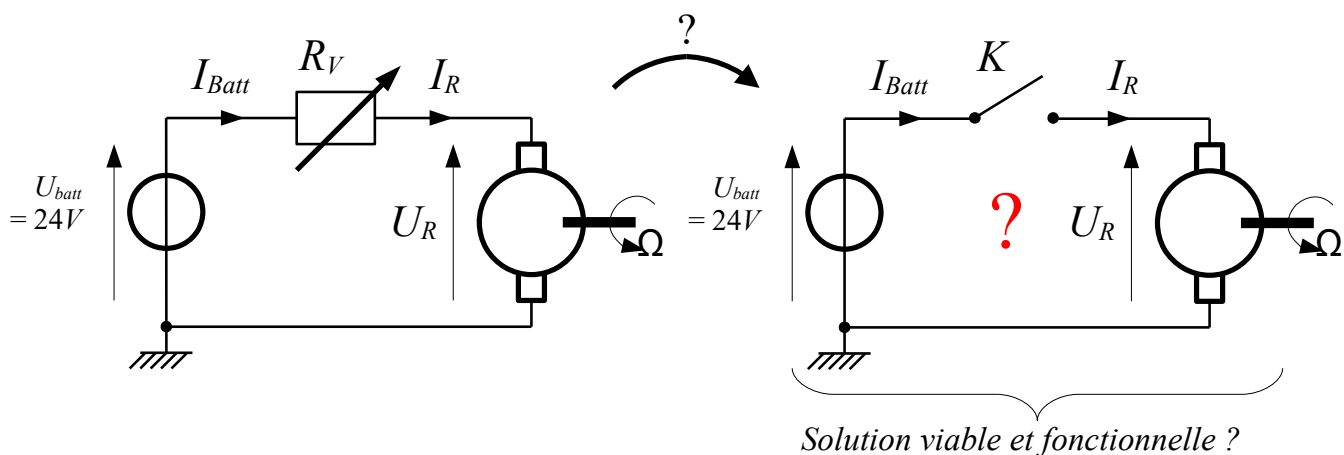
Idée n°1 : Insertion d'une résistance variable



- ➡ Inconvénient : déperdition de puissance au niveau de la résistance variable.
- ➡ Très mauvais rendement

I.2) Solution pour améliorer le rendement :

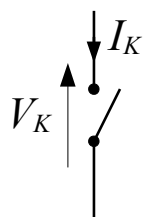
Idée n°2 : Remplacer la résistance variable par un jeu d'interrupteurs ON-OFF



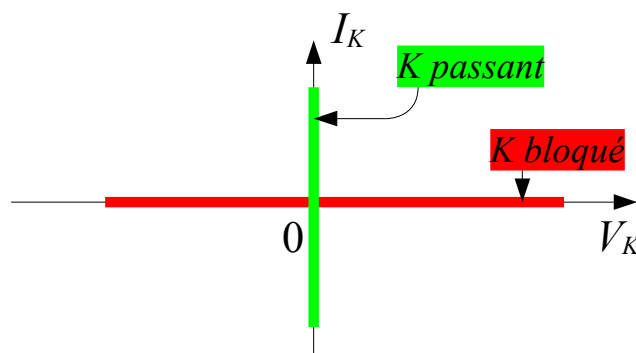
- ➡ Est-ce que la commutation de l'interrupteur sera compatible avec le fonctionnement de la machine à courant continu ?

I.2) Idée : convertisseur non dissipatif d'énergie

Convertisseur construit par assemblage d'interrupteurs ON-OFF.



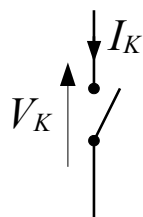
- K est passant (ON) $\Leftrightarrow V_K = 0$ et $I_K \neq 0$
- K est bloqué (OFF) $\Leftrightarrow I_K = 0$ et $V_K \neq 0$



Caractéristique courant/tension de l'interrupteur idéal

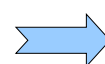
I.2) Idée : convertisseur non dissipatif d'énergie

Puissance dissipée par un interrupteur idéal



- Puissance instantanée dissipée : $p_k(t) = V_k(t) \cdot I_k(t)$
- Puissance moyenne dissipée : $\langle P_k \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T V_k(t) \cdot I_k(t) \cdot dt$

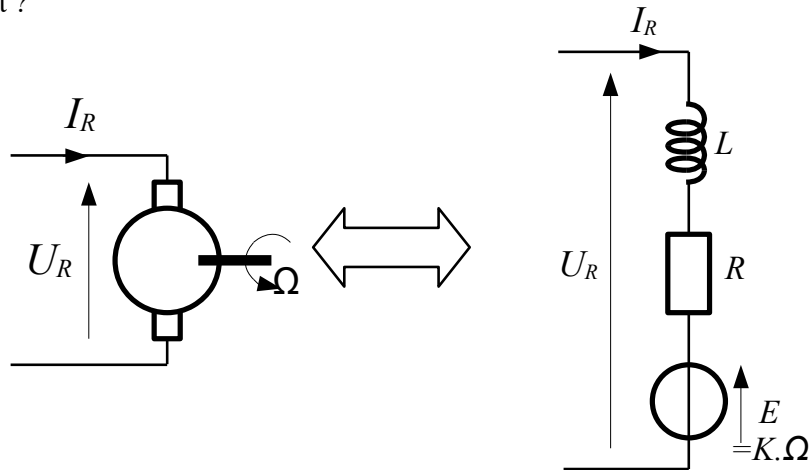
	$V_k(t)$	$I_k(t)$	$p_k(t)$
K passant	$V_k(t) = 0$	$I_k(t) \neq 0$	$p_k(t) = 0$
K bloqué	$V_k(t) \neq 0$	$I_k(t) = 0$	$p_k(t) = 0$



$$\langle P_k \rangle = 0$$

I.2) Retour au problème :

- Comment se comporte la machine à courant continu ?
- Son fonctionnement est-il compatible avec un système composé d'un ou de plusieurs interrupteurs qui commutent ?



➡ Ici, il est nécessaire d'aborder la notion de **source de tension** et de **source de courant**

I.3) Notion de source : définition en régime statique

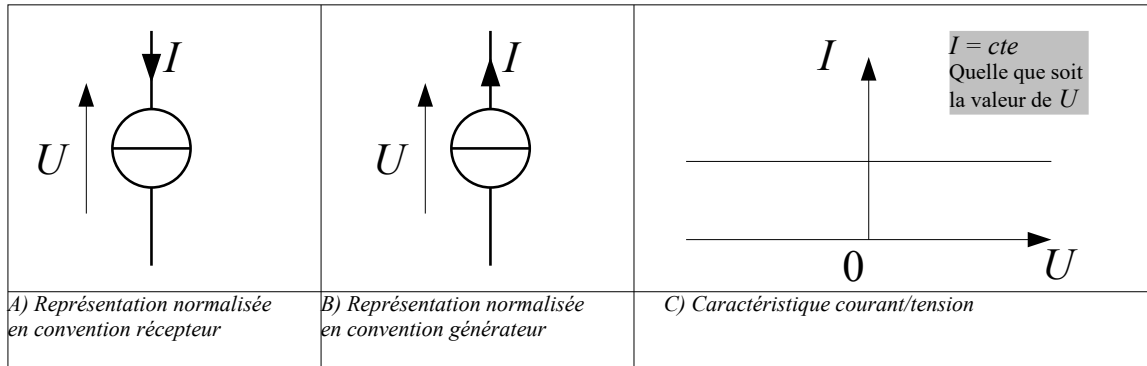
Source idéale de tension :

		$U = cte$ Quelle que soit la valeur de I
A) Représentation normalisée en convention récepteur	B) Représentation normalisée en convention générateur	C) Caractéristique courant/tension

Source idéale de tension = dipôle capable d'imposer la tension à ses bornes quel que soit le courant absorbé.

I.3) Notion de source : définition en régime statique

Source idéale de courant :

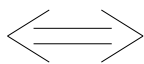


Source idéale de courant = dipôle capable d'imposer l'intensité du courant qui le traverse quelle que soit la tension à ses bornes.

I.3) Notion de source : définition en régime dynamique

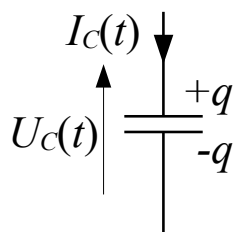
Source de tension =

Dipôle aux bornes duquel la différence de potentiel ne peut pas subir de discontinuité.



Une source de tension est capable d'imposer transitoirement la tension à ses bornes.

Source de tension la plus utilisée en électronique de puissance : le condensateur



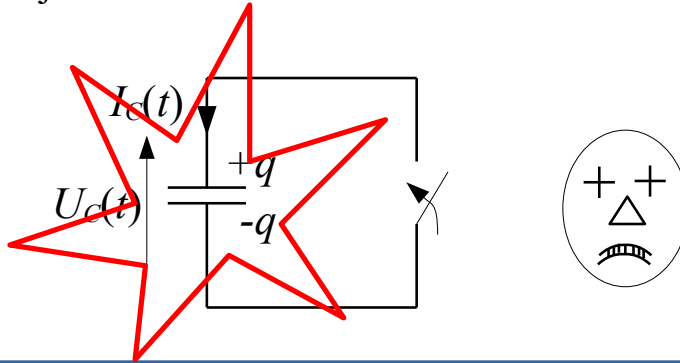
$$\left. \begin{array}{l} I_c(t) = \frac{dq}{dt} \\ q(t) = C \cdot U_c(t) \end{array} \right\} \Rightarrow I_c(t) = C \cdot \frac{dU_c}{dt}$$

I.3) Notion de source : le condensateur

Énergie stockée dans le condensateur : $\varepsilon_c(t) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_c^2(t)$

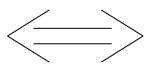
- Le condensateur est un élément de stockage d'énergie électrostatique .
- La tension observée aux bornes du condensateur ne peut pas subir de discontinuités.

➡ Ne jamais court-circuiter un condensateur lorsque celui-ci est chargé.



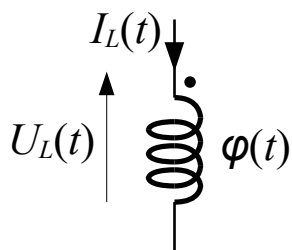
I.3) Notion de source : définition en régime dynamique

Source de courant = Dipôle dont l'intensité du courant qui le traverse ne peut pas subir de discontinuité.



Une source de courant est capable d'imposer transitoirement l'intensité du courant qui la traverse.

Source de courant la plus utilisée en électronique de puissance : la bobine



$$\left. \begin{aligned} \Phi_{Tot}(t) &= n \cdot \phi(t) = L \cdot I_L(t) \\ U_L &= \frac{d\Phi_{Tot}}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow U_L(t) = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

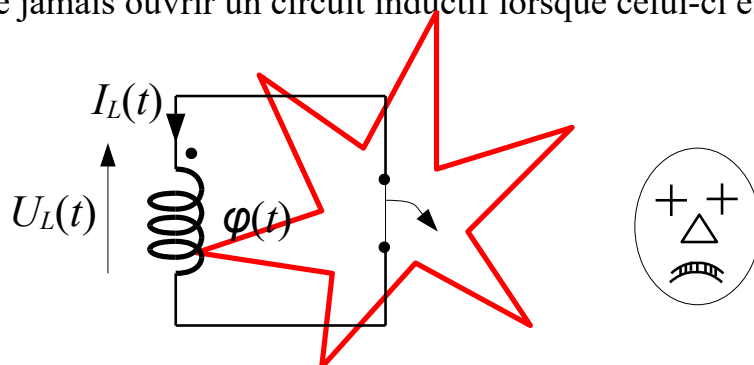
I.3) Notion de source : la bobine

Énergie stockée dans la bobine :

$$\varepsilon_L(t) = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_L^2(t)$$

- La bobine est un élément de stockage d'énergie magnétique.
- L'intensité du courant qui traverse une bobine ne peut pas subir de discontinuités.

➡ Ne jamais ouvrir un circuit inductif lorsque celui-ci est parcouru par un courant non nul.



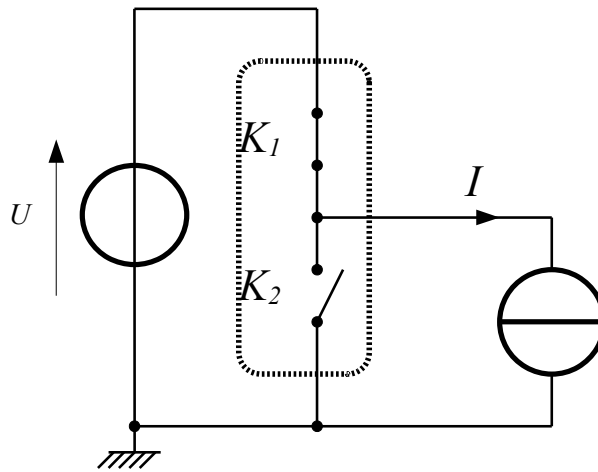
I.3) Tableau récapitulatif

Propriétés du
condensateur et
de la bobine

	Nature	Relation courant / tension	Causalité	Énergie stockée
CONDENSATEUR 	Source de tension	$I_C = C \cdot \frac{dU_C}{dt}$ $\Updownarrow$ $U_C(t) = \frac{1}{C} \cdot \int I_C(t) dt$	• Le condensateur est attaqué en courant. • Il réagit en imposant la tension à ses bornes. • $U_C(t)$ ne peut pas subir de discontinuité.	$\varepsilon_C(t) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_C^2(t)$
BOBINE 	Source de courant	$U_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$ $\Updownarrow$ $I_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int U_L(t) dt$	• La bobine est attaquée en tension. • Elle réagit en imposant le courant qui la traverse. • $I_L(t)$ ne peut pas subir de discontinuité.	$\varepsilon_L(t) = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_L^2(t)$

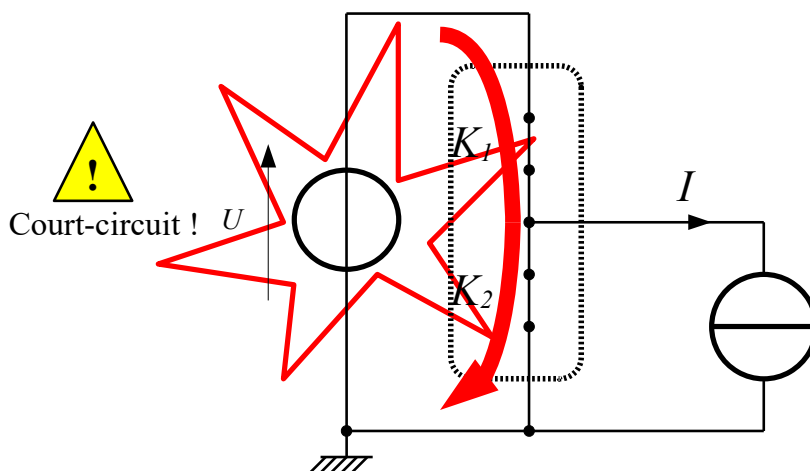
I.4) Notion de cellule de commutation

On considère un ensemble élémentaire constitué d'une source de tension, d'une source de courant et de deux interrupteurs (*Référence bibliographique [1], p.13*).



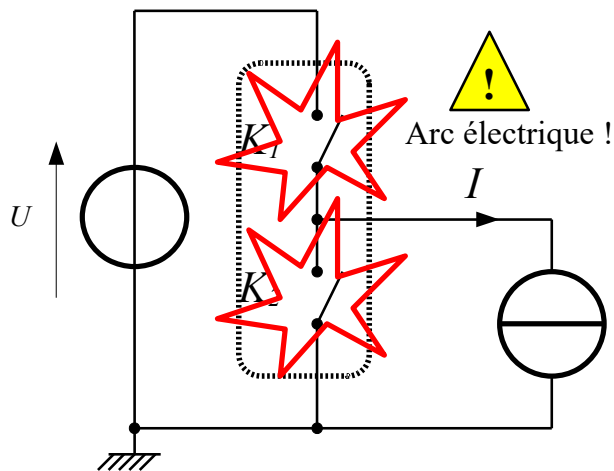
I.4) Notion de cellule de commutation

K_1 et K_2 ne peuvent pas être simultanément passants, car sinon la source de tension serait brutalement court-circuitée.



I.4) Notion de cellule de commutation

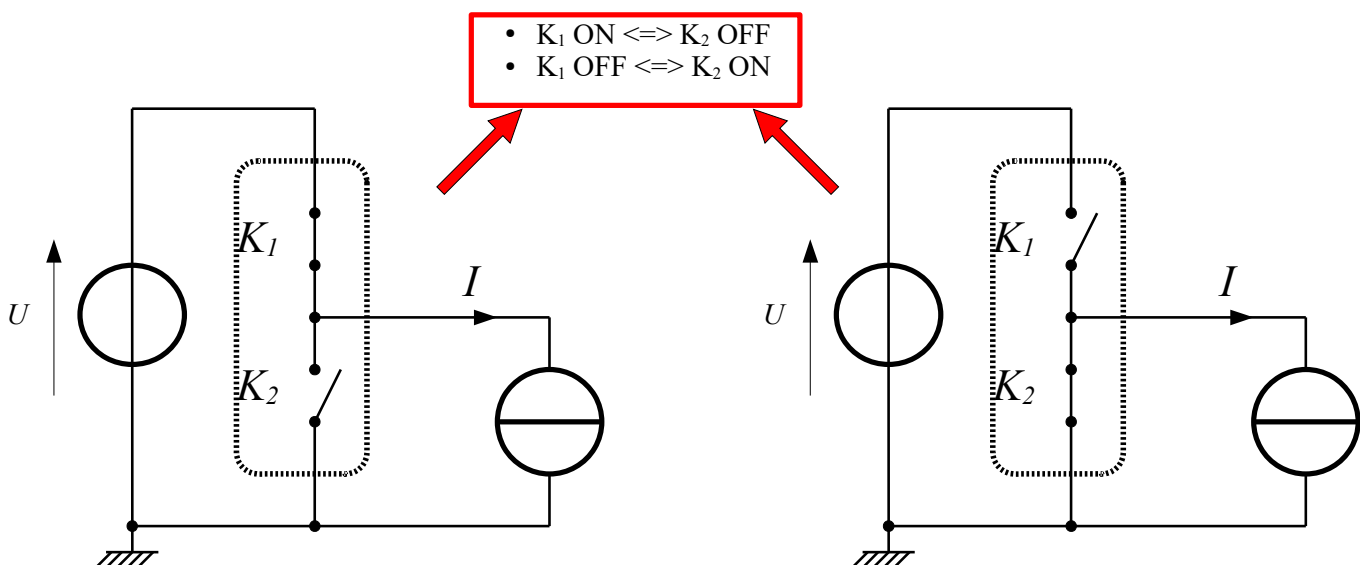
K_1 et K_2 ne peuvent pas être simultanément bloqués, car sinon la source de courant serait brutalement ouverte.



I.4) Notion de cellule de commutation

Les états de K_1 et K_2 sont obligatoirement complémentaires.

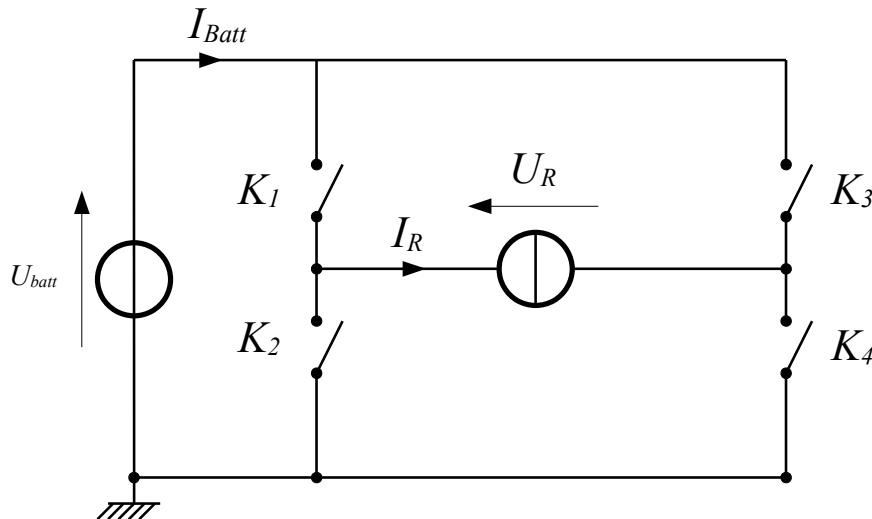
=> L'ensemble $\{K_1; K_2\}$ constitue une **cellule de commutation**.



I.4) Notion de cellule de commutation

Conseil : chaque fois que vous devrez analyser le fonctionnement d'un convertisseur statique, identifiez les cellules de commutation qui le composent.

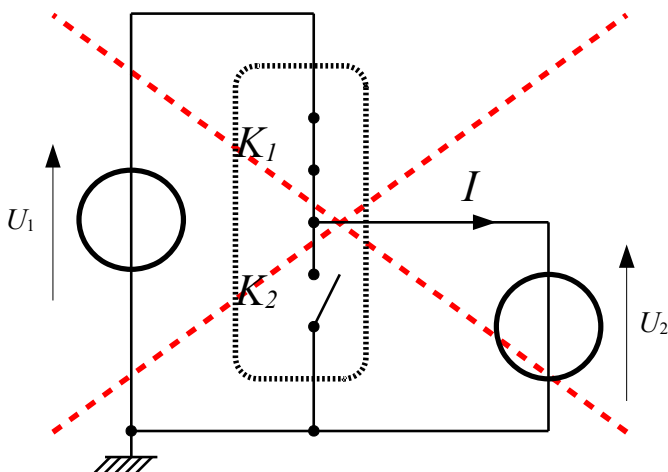
Application : cas du hacheur 4 quadrants. Identifier les cellules de commutation.



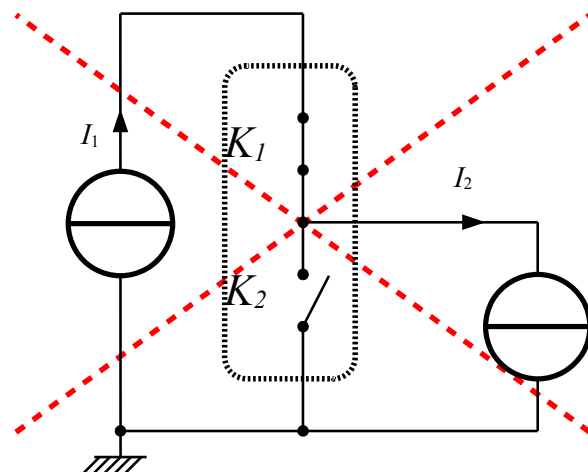
I.5) Règle d'alternance des sources

Les sources disposées de part et d'autre d'une cellule de commutation doivent être de natures duales.

Exemples de conflits entre sources dus à un non respect de la règle d'alternance.



A) Chaque source de tension essaie d'imposer à l'autre la tension à ses bornes.



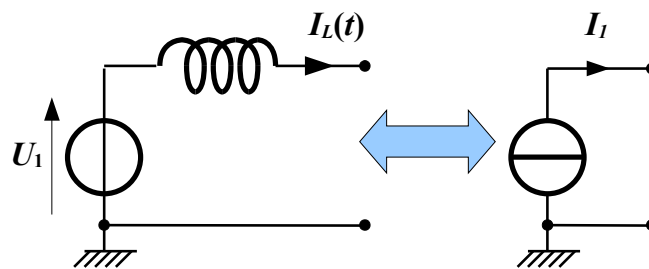
B) Chaque source de courant essaie d'imposer à l'autre l'intensité qui la traverse.

I.5) Règle d'alternance des sources

Les sources disposées de part et d'autre d'une cellule de commutation doivent être de natures duales.

Solutions pour éviter les conflits entre sources :

- 1) Modifier une source de tension en source de courant en rajoutant une inductance en série :

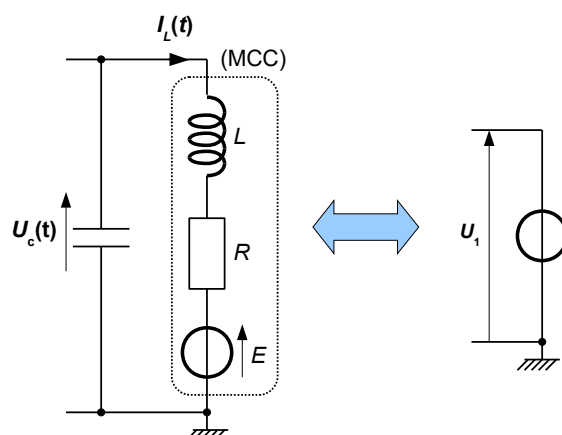


I.5) Règle d'alternance des sources

Les sources disposées de part et d'autre d'une cellule de commutation doivent être de natures duales.

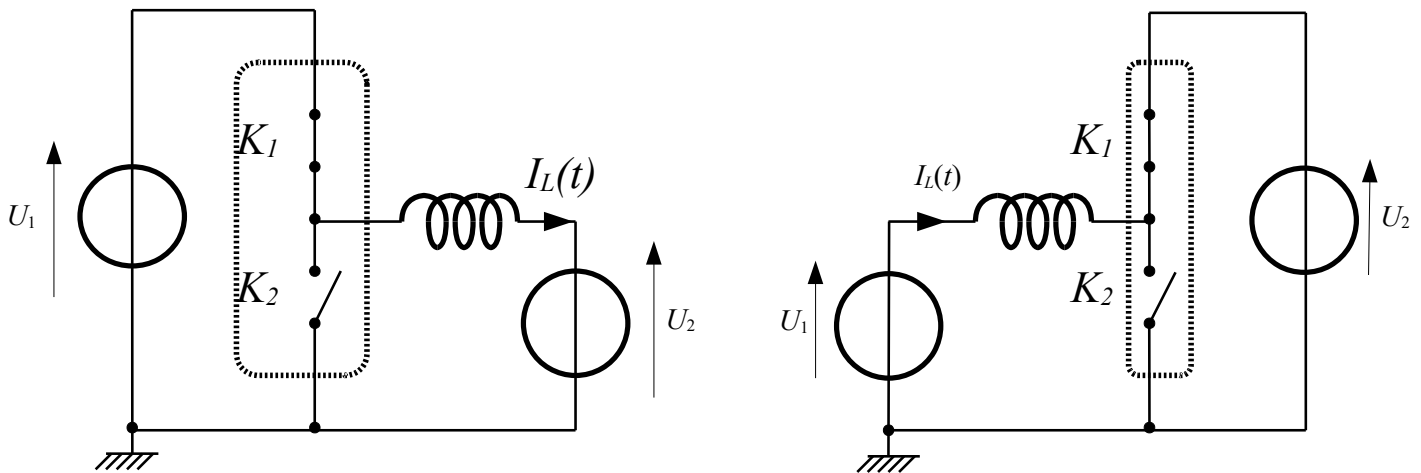
Solution pour éviter les conflits entre sources :

- 2) Modifier une source de courant en source de tension en rajoutant un condensateur en parallèle :



I.5) Règle d'alternance des sources

Les sources disposées de part et d'autre d'une cellule de commutation doivent être de natures duales.

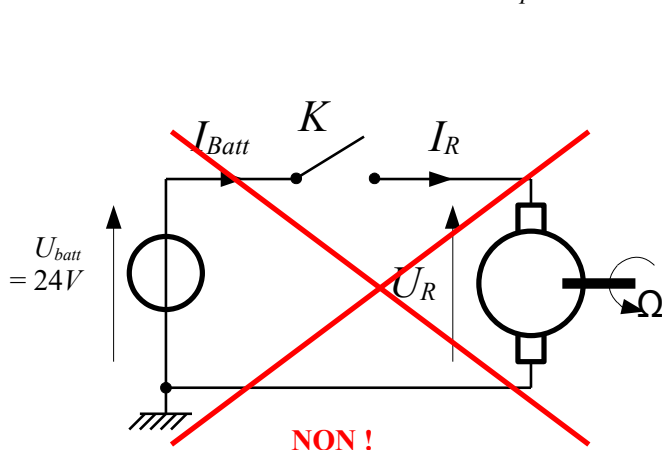


Exemples de convertisseurs qui respectent la règle d'alternance des sources
=> Fonctionnement harmonieux du dispositif.

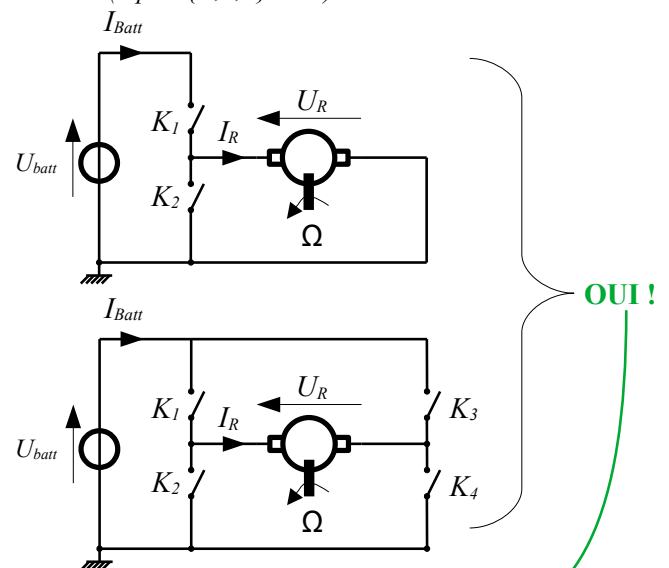
I.5) Règle d'alternance des sources :

Retour au problème :

- La machine à courant continu se comporte comme une source de courant (dipôle $\{R, L, E\}$ série)



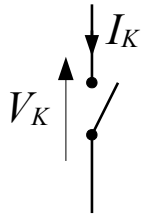
Solution non viable : la continuité du courant n'est pas assurée lors de l'ouverture de K.



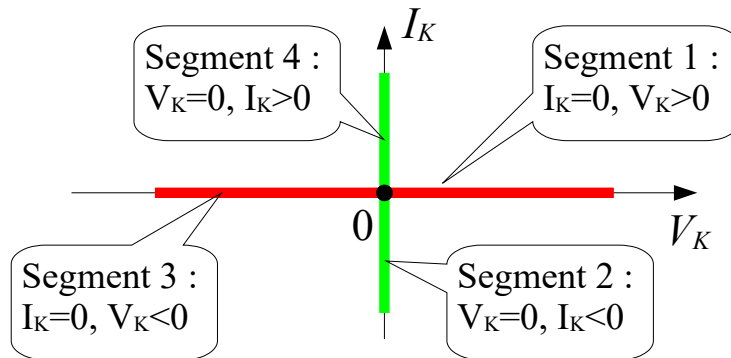
La batterie et la MCC sont deux sources de natures duales.
Elles sont connectées de part et d'autre d'une cellule de commutation.
La règle d'alternance des sources est bien respectée.

I.6) Réflexions sur les interrupteurs

I.6.1) L'interrupteur idéal 4 segments



- K est passant (ON) $\Leftrightarrow V_K = 0$ et $I_K \neq 0$
- K est bloqué (OFF) $\Leftrightarrow I_K = 0$ et $V_K \neq 0$

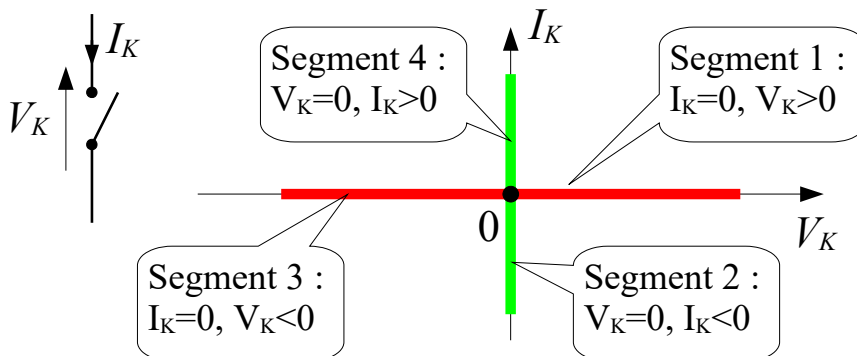


=> Caractéristique composée de 4 segments qui sont confondus avec les axes des abscisses et les axes des ordonnées.

Caractéristique courant/tension de l'interrupteur idéal

I.6) Réflexions sur les interrupteurs

I.6.1) L'interrupteur idéal 4 segments



Caractéristique courant/tension de l'interrupteur idéal

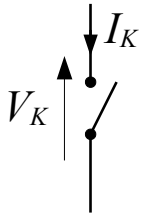
=> L'interrupteur idéal 4 segments est une vue de l'esprit :

- *En pratique, les segments ne pourront jamais être exactement confondus avec les axes des abscisses et des ordonnées.*
- *D'autre part, on n'aura presque jamais besoin d'utiliser les 4 segments.*

I.6) Réflexions sur les interrupteurs

I.6.2) Choix du type d'interrupteur

Le choix du type d'interrupteur dépend du signe de $V_K(t)$ et de $I_K(t)$ au cours d'un cycle de fonctionnement :

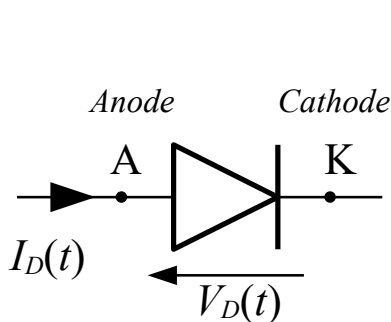


Si $V_K(t)$ et $I_K(t)$ changent tous les deux de signe.	Interrupteur 4 segments
Si $V_K(t)$ change de signe, mais pas $I_K(t)$.	Interrupteur 3 segments
Si $I_K(t)$ change de signe, mais pas $V_K(t)$.	Interrupteur 3 segments
Si ni $I_K(t)$ ni $V_K(t)$ ne change de signe.	Interrupteur 2 segments

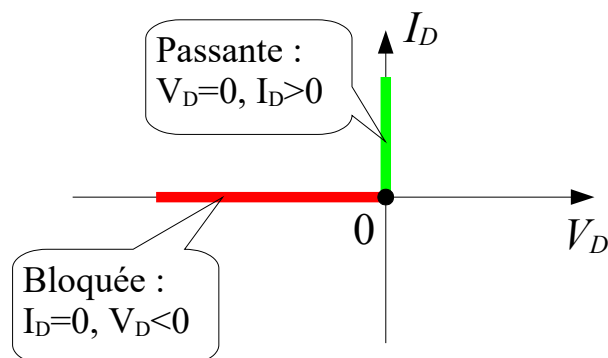
I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.1) La diode de puissance

La diode de puissance est un interrupteur 2 segments :



Symbole normalisé



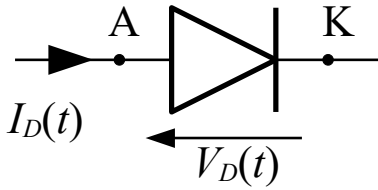
Caractéristique courant/tension idéalisée de la diode

=> Théoriquement, le courant peut circuler uniquement de l'anode vers la cathode.

I.7) Présentation de quelques interrupteurs

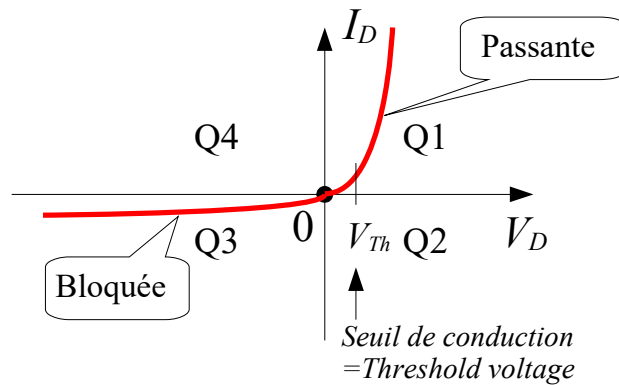
I.7.1) La diode de puissance

Caractéristique réelle de la diode de puissance :



$$\begin{cases} I_D = I_S \cdot [\exp(\frac{V_D}{u_T}) - 1] \\ \text{avec } u_T = \frac{kT}{q} \approx 26 \text{ mV} \end{cases}$$

I_S = courant de conduction inverse de la diode (qqes nA).



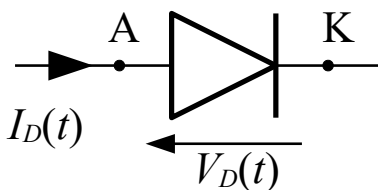
Caractéristique courant/tension réelle de la diode

=> En pratique, la caractéristique courant/tension de la diode est de forme exponentielle.

I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.1) La diode de puissance

Conditions d'amorçage et de blocage de la diode de puissance :



Amorçage = passage de l'état bloqué à l'état passant
Blocage = passage de l'état passant à l'état bloqué

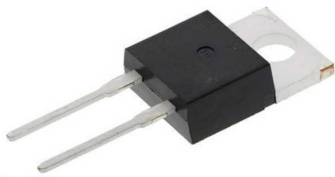
La diode est un composant à commutation spontanée <=> Non commandée

- Elle s'amorce spontanément lorsque la tension à ses bornes tend à devenir supérieure à la tension de seuil (V_{th}).
- Elle se bloque spontanément lorsque le courant qui la traverse s'annule.

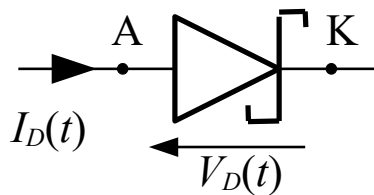
I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.1) La diode de puissance

En électronique de puissance, on utilise des diodes Schottky.



Diode Schottky : C4D02120A
($V_{RRM}=1220V$, $I_F=5A$)



Symbole d'une diode Schottky

	Tension de seuil (V_{Th})
Diode classique	0,6 V
Diode Schottky	0,3 V à 0,6 V

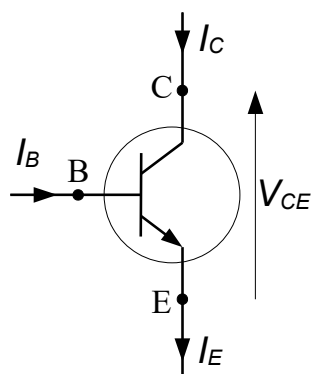
Double avantage des diodes Schottky par rapport à une diode classique :

- Tension de seuil plus faible => Réduction des pertes par conduction,
- Temps de commutation très court.

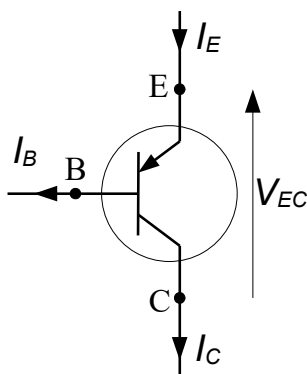
I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.2) Le transistor bipolaire

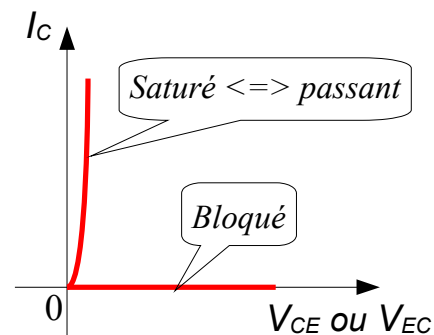
Le transistor bipolaire peut être utilisé comme un interrupteur 2 segments



Transistor bipolaire de type NPN



Transistor bipolaire de type PNP



B = Base
C = Collecteur
E = Émetteur

L'état du transistor est déterminé par l'intensité du courant de base (I_B).
=> Le transistor bipolaire est commandé en courant.

I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.2) Le transistor bipolaire

Applications du transistor bipolaire :

- En électronique « petit signal » (utilisé pour de l'amplification linéaire depuis son invention en 1947), (Réf: [3], p.62).
- En électronique de puissance : il a été utilisé à partir des années 1970 dans les alimentations à découpage et pour des applications en traction ferroviaire (Réf: [1], p.156).

Avantages du transistor bipolaire :

- Performances dynamiques élevées,
- Faible chute de tension à l'état passant.

Inconvénients du transistor bipolaire :

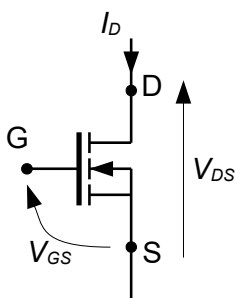
- Nécessite une électronique de commande complexe,
- Une part non négligeable de l'énergie est dissipée dans la commande du bipolaire

=> Le transistor bipolaire a été progressivement abandonné pour les applications de puissance, au profit des transistors de type MOSFET et IGBT.

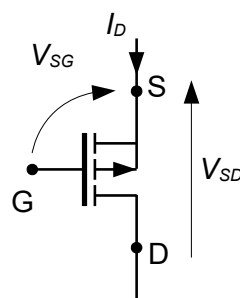
I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.3) Les transistors MOSFET

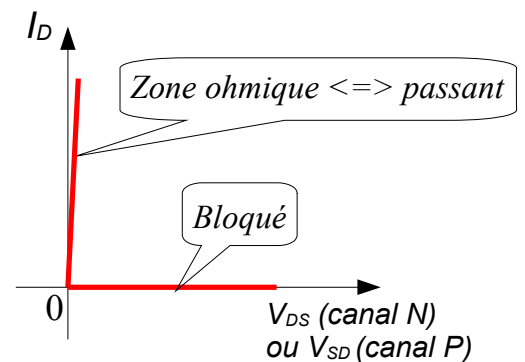
MOSFET = Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor. Ce sont des transistors à effet de champ.



Transistor MOSFET
à canal N



Transistor MOSFET
à canal P



D = Drain
G = Grid (Grille)
S = Source

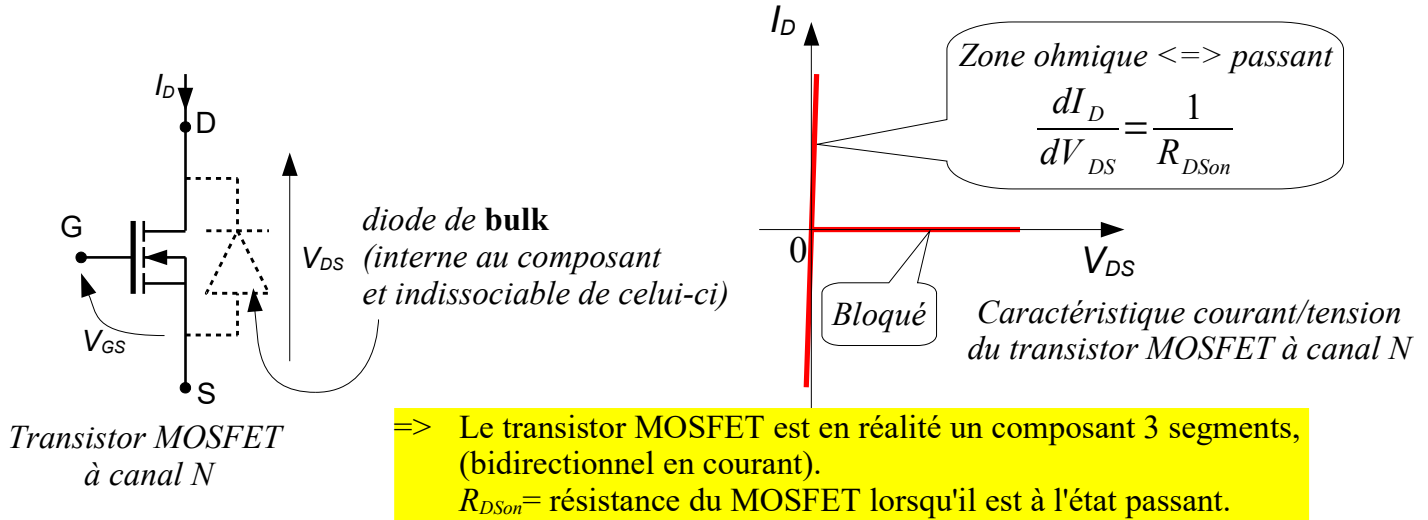
La tension V_{GS} appliquée entre la grille et la source permet de moduler le passage du courant I_D .

=> En électronique de puissance, on utilise de préférence des MOSFET à canal N.

I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.3) Les transistors MOSFET

- Lorsque $V_{GS} = 0V$, le transistor MOSFET est bloqué,
- Lorsque $V_{GS} \geq V_{Th}$ (tension de seuil), il se crée un canal de conduction des électrons entre le drain et la source (Réf : [3], p.102) . Une fois le canal créé, le courant peut circuler dans les deux sens.
- Le MOSFET possède en outre une diode interne parasite, appelée « diode de bulk ».



I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.3) Les transistors MOSFET

Avantages des transistor MOSFET :

- Faciles à commander. Contrairement aux transistors bipolaires, ils ne nécessitent pas d'importants courants continus dans leur grille pour rester à l'état passant.
- Faibles pertes par commutation (R_{DSon} très faible, de l'ordre de quelques dizaines de $m\Omega$ pour les petits modèles de MOSFET).

Inconvénient des transistor MOSFET :

- Dilemme commun à tous les transistors MOSFET : Il n'est pas possible d'avoir à la fois une bonne tenue en tension et un R_{DSon} faible.
- $\Rightarrow$ Les MOSFET ne sont pas conçus pour commuter des tensions élevées (maximum 600 V environ).
- $\Rightarrow$ L'usage des MOSFET est limité à de faibles puissances (quelques kW au maximum).

$\Rightarrow$ Pour des applications de faibles puissances (jusqu'à quelques kW et 600V maximum), les transistors MOSFET ont supplanté les transistors bipolaires

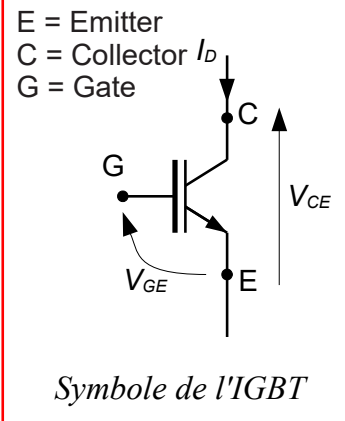
I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.4) Les IGBT

IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor

Les IGBTs ont été imaginés dans le but d'allier les qualités respectives des transistors bipolaires avec celles des MOSFET [1]:

- Permettre d'avoir une très bonne tenue en tension à l'état bloqué ($\geq 1000V$),
- Avoir une chute de tension faible à l'état passant,
- Permettre de commuter des intensités de courants élevées (plusieurs centaines d'ampères),
- Présenter un bon comportement dynamique (amorçage et blocage rapides),
- Posséder une grille isolée (pour faciliter leur commande).

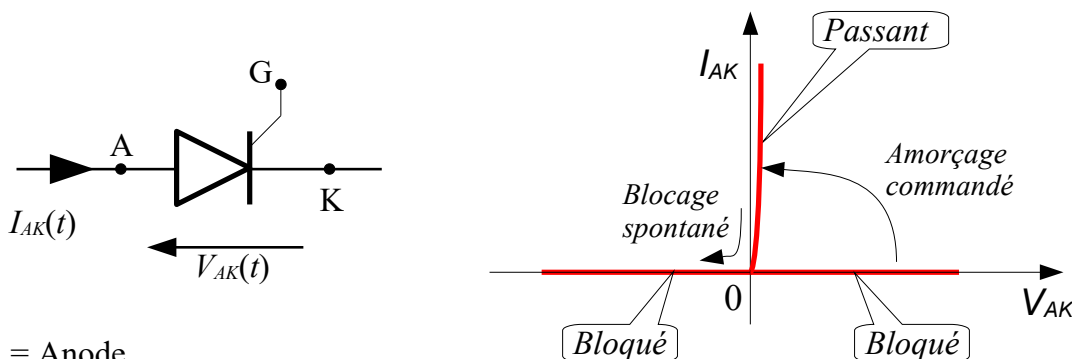


=> Les IGBT sont apparus au milieu des années 1980, et ils ont supplanté les transistors bipolaires pour toutes les applications de moyenne puissance et fortes puissances (de quelques kW à quelques MW).
Exemple d'application des IGBT : la traction ferroviaire.

I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.5) Les Thyristors

Les Thyristors sont des interrupteurs 3 segments, bidirectionnels en tension.

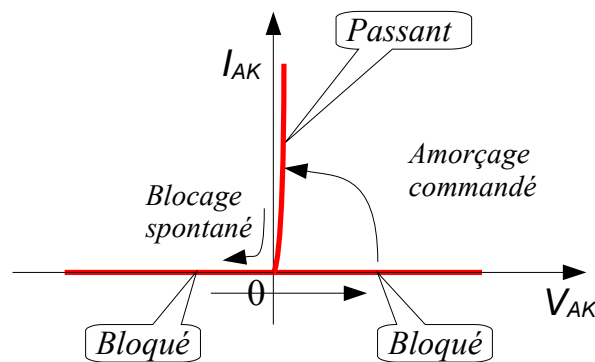
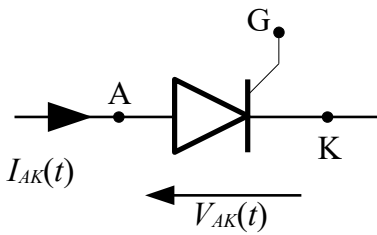


A = Anode
K = Cathode
G = Gâchette (Gate)

=> Les Thyristors sont commandés à l'amorçage, mais pas au blocage (blocage spontané).

I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.5) Les Thyristors



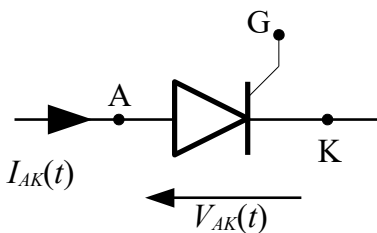
Cycle de fonctionnement du thyristor (Réf : [2], p.8) :

- Lorsque $V_{AK} < 0$, le thyristor est bloqué, il reste bloqué lorsque V_{AK} augmente et devient positif,
- Lorsque $V_{AK} > 0$ et que l'on applique une impulsion de courant sur sa gâchette, le thyristor devient passant,
- Une fois le thyristor passant, il se bloque spontanément lorsque I_{AK} s'annule.

=> Lorsqu'il est passant, le thyristor se comporte comme une diode.

I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.5) Les Thyristors



Les thyristors ont longtemps été des composants incontournables en électronique de puissance, notamment dans le domaine des fortes puissances ($P > 2kW$ et bien au delà).

Applications des Thyristors :

- Redressement commandé monophasé ou triphasé (montage en pont de Graëtz),
- Gradateurs (Réf : [2], chap. 5),
- Cependant, ce sont des composants assez lents (durée du blocage importante), ce qui limite leur fréquence de découpage à quelques centaines de Hz environ.

=> Pour des applications de fortes puissances qui nécessitent des fréquences de découpage plus élevées (quelques milliers de kHz et au delà, les thyristors ont été supplantés par les IGBT dans les années 2000 (Source Wikipédia).

I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.6) Autres composants

- Les GTO (Gate Turn-Off Thyristor),
- Les IGCT (integrated gate-commutated thyristor),
- ...

=> Cette liste est loin d'être exhaustive. Les recherches se poursuivent, tant dans les laboratoires industriels qu'universitaires, dans le but de trouver des composants de plus en plus performants et simples à utiliser, quelle que soit la gamme de puissance.

I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.7) Nouvelles générations de semi-conducteurs

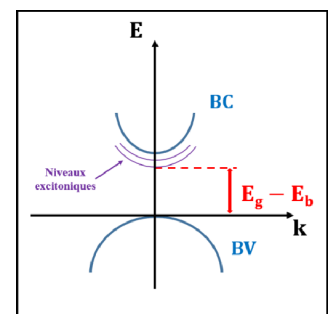
Les semi-conducteurs à large bande (WBG=Wide Band Gap) :

Références bibliographiques : [4], [5]

Matériau semi-conducteur dont la bande interdite est supérieure à celle du silicium ($=1,12\text{eV}$).

« La largeur de bande interdite correspond à l'énergie qu'un électron doit acquérir pour passer de la bande de valence, où il reste localisé autour d'un noyau atomique, à la bande de conduction, où il devient libre de circuler dans le cristal pour devenir un porteur de charge assurant la conductivité électrique. »

(Définition Wikipedia)



I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.7) Nouvelles générations de semiconducteurs

Les semi-conducteurs à large bande (WBG=Wide Band Gap) :

Références bibliographiques : [4], [5]

Deux catégories principales :

- Les transistors SiC (Carbure de Silicium),
- Les transistors GaN (Gallium Nitride=Nitrure de Gallium).

Avantages :

- Largeur de bande plus élevée que celle du silicium => Meilleure tenue en tension.
- Mobilité électronique plus élevée que le Si => Pertes en commutation plus faibles
=> fonctionnement à des fréquences de découpage plus élevées.

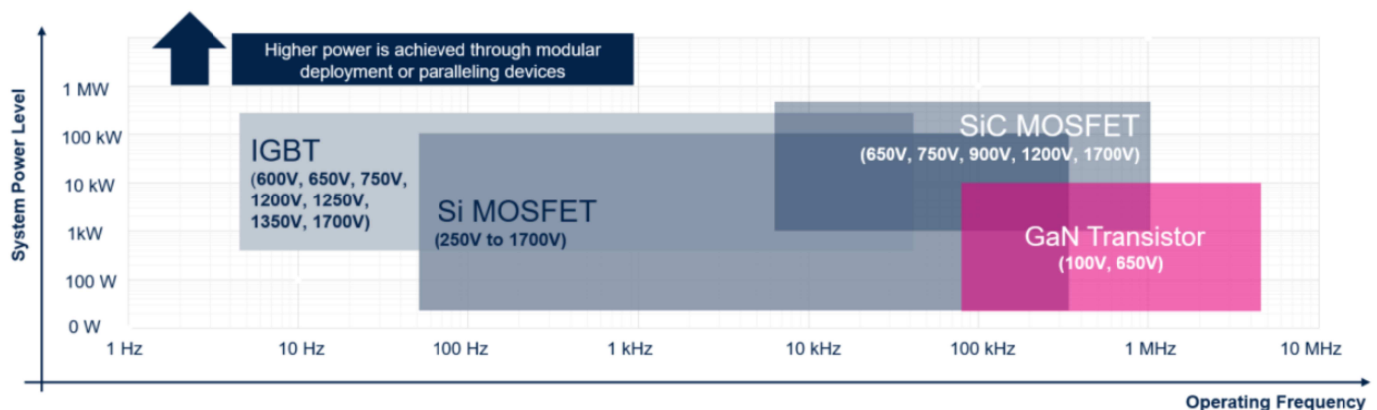
Inconvénients :

- Le prix des transistors GaN, bien plus élevé que celui de composants au silicium de calibre équivalent.

I.7) Présentation de quelques interrupteurs

I.7.7) Nouvelles générations de semi-conducteurs

Les semi-conducteurs à large bande (WBG=Wide Band Gap) :



Domaine d'utilisation des transistors à large bande (WBG) : SiC et GaN

Références bibliographiques : [4], [5]

=> Utilisés pour les applications nécessitant des performances élevées à hautes fréquences ou à haute puissance.

I.8) Exercice du chapitre 1

=> *Effectuer l'exercice TD1 : réflexions sur les structures des convertisseurs statiques*

I.9) Bibliographie

[1] JP. Ferrieux, F. Forest « *Alimentations à découpage, convertisseurs à résonance* » 3ème édition, Ed : Dunod, ISBN 2-10-050539-4

[2] G. Séguier, « *L'électronique de puissance - Les fonctions de base et leur principales applications* », Ed : Dunod, ISBN 2-10-003107-4

[3] JY. Fourniols, C. Escriba « *Systèmes électroniques analogiques – Amplification, filtrage et optronique* », Presses Universitaires du Mirail, ISBN 978-2-8107-0058-5

[4] C. Crouard : *Rapport de PFE. Entreprise : ST Microelectronics*

[5] H. Kerreneur : *Rapport de PFE. Entreprise : ST Microelectronics*

Technologies des convertisseurs et des actionneurs

5ème année IS Année 2025-2026

Organisation du cours :

- 6 séances de 1h15
- 8 séances de travaux pratiques de 2h45

Plan :

- I. Principes et règles de fonctionnement des convertisseurs statiques*
- II. Les hacheurs*

Technologies des convertisseurs et des actionneurs

5ème année IS Année 2024-2025

CHAPITRE 2

Les hacheurs

II.1) Généralités

II.1.1) Qu'est-ce qu'un convertisseur statique ?

- Un convertisseur statique est un dispositif composé d'interrupteurs électroniques qui commutent (diodes, transistors MOSFET, IGBT, etc ...) .
- Il est dit « statique » car il ne comprend aucune pièce mécanique en mouvement.
- Dans un convertisseur statique, les interrupteurs sont organisés en cellules de commutation (voir chapitre 1).

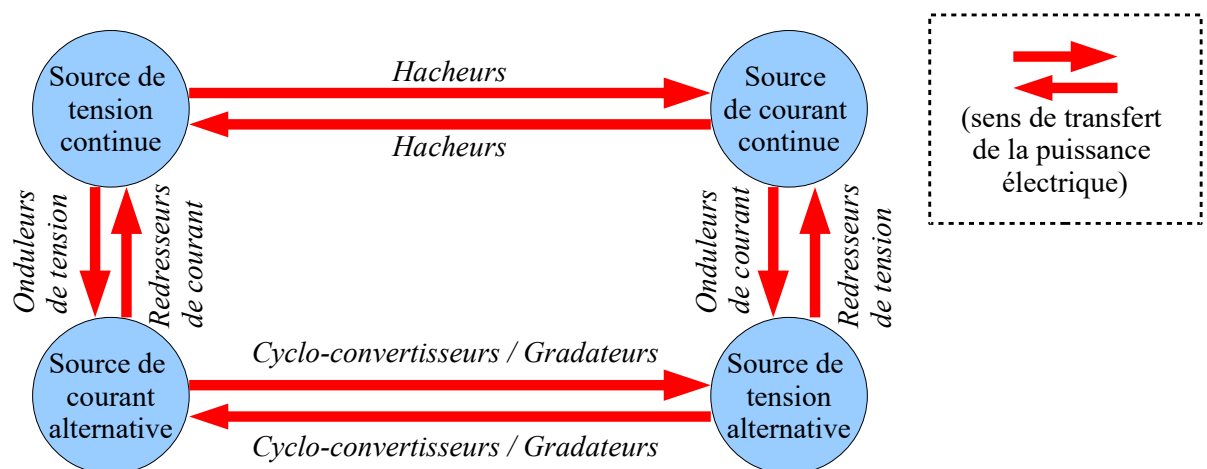
II.1.2) A quoi sert un convertisseur statique ?

- Un convertisseur statique s'insère entre une source d'énergie et un récepteur d'énergie de natures duales (source de tension / source de courant), selon la règle d'alternance des sources (voir chapitre 1).
- Son rôle est de transférer de la puissance électrique de la source vers le récepteur tout en permettant le contrôle de cette puissance transférée.
- Le contrôle de la puissance transférée s'effectue en adaptant la forme de l'onde électrique de sortie, ainsi que ses caractéristiques (valeur moyenne, amplitude, fréquence, etc ...) .

II.1) Généralités

II.1.3) Classification des convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont classés en fonction du type de conversion réalisée :



=> Les hacheurs sont des convertisseurs statiques dédiés à la conversion continu/continu.

II.1) Généralités

Dans ce chapitre, nous allons nous étudier les hacheurs. Cependant, nous ne pouvons pas présenter ici l'ensemble des hacheurs de manière exhaustive. C'est pourquoi nous allons nous focaliser sur les trois types de hacheurs les plus couramment rencontrés :

- Le hacheur dévolteur (buck),
- Le hacheur survolteur (boost),
- Le hacheur 4 quadrants.

II.2) Étude du hacheur dévolteur

II.2.1) Structure de base

- Le hacheur dévolteur sert à abaisser le niveau de tension.
- Il connecte une source de tension (qui fournit la puissance électrique) à une source de courant qui la reçoit.
- Le hacheur dévolteur utilise une seule cellule de commutation ($\Leftrightarrow$ 2 interrupteurs associés dont les états sont complémentaires, voir chapitre 1).

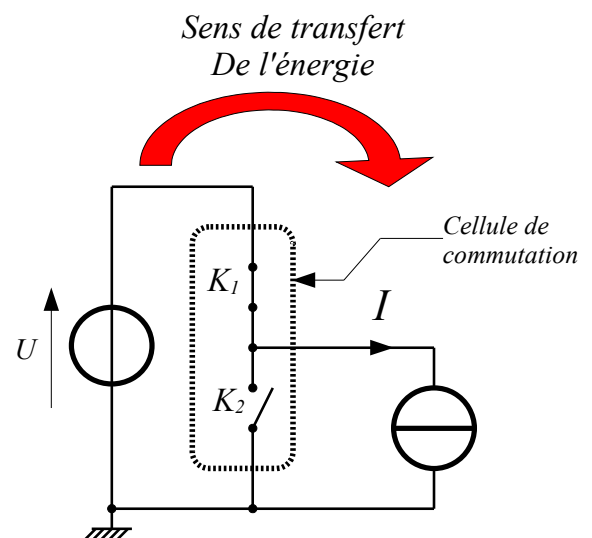


Schéma de principe du hacheur dévolteur.
Les états de K_1 et K_2 sont obligatoirement complémentaires

II.2) Étude du hacheur dévolteur

II.2.2) Choix des sources

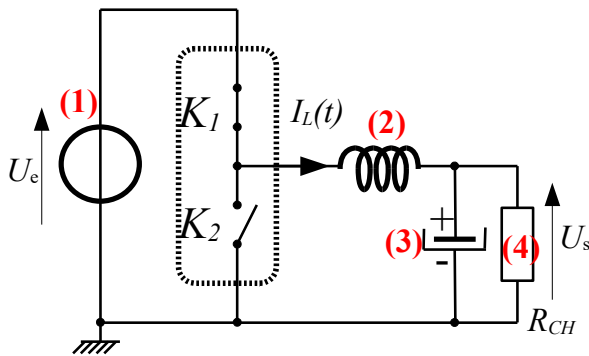


Schéma plus réaliste du hacheur dévolteur.

(1) La source de tension est soit une batterie (applications embarquées), soit la tension réseau 230V abaissée par un transformateur, puis redressée et filtrée.

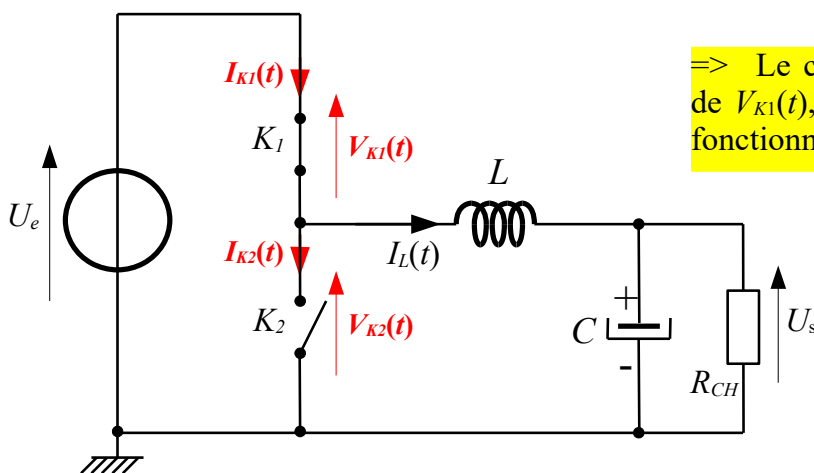
(2) La source de courant est obtenue en insérant une inductance en série avec la charge (voir chapitre 1).

(3) Il est possible de rajouter un condensateur électrochimique de filtrage afin que la tension de sortie aux bornes de la charge soit la plus lissée possible.

(4) Le circuit alimenté par le hacheur est ici modélisé par une résistance de charge.

II.2) Étude du hacheur dévolteur

II.2.3) Choix des interrupteurs



Conventions de fléchage pour les tensions et courants dans les interrupteurs.

=> Le choix des interrupteurs est dicté par le signe de $V_{K1}(t)$, $I_{K1}(t)$, $V_{K2}(t)$ et $I_{K2}(t)$ au cours d'un cycle de fonctionnement.

Équations générales :

Loi des mailles : $V_{K1}(t) + V_{K2}(t) = U_e$

Loi des nœuds : $I_{K1}(t) = I_{K2}(t) + I_L(t)$

Hypothèses de l'étude :

$U_e > 0$ et $I_L(t) > 0$ à tout instant t .

II.2) Étude du hacheur dévolteur

II.2.3) Choix des interrupteurs

NB : Comme K_1 et K_2 font partie de la même cellule de commutation, leurs états sont obligatoirement complémentaires.

Équations générales :

Loi des mailles: $V_{K1}(t) + V_{K2}(t) = U_e$

Loi des nœuds : $I_{K1}(t) = I_{K2}(t) + I_L(t)$

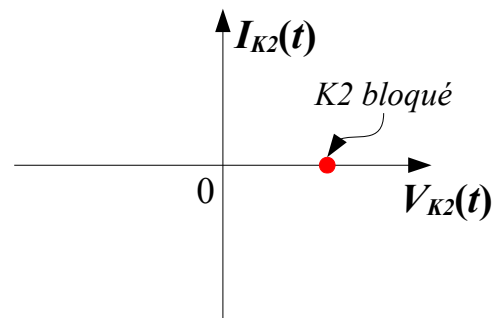
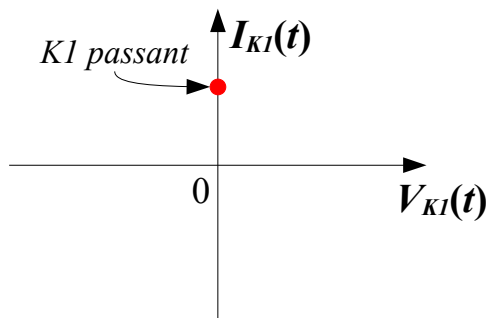
Phase 1 :

**$K1$ passant
et $K2$ bloqué :**

$$V_{K1}(t) = 0 \Rightarrow V_{K2}(t) = U_e > 0$$

$$I_{K2}(t) = 0 \Rightarrow I_{K1}(t) = I_L(t) > 0$$

=> On obtient un premier point dans la caractéristique ($I_K(t)$, $V_K(t)$)



II.2) Étude du hacheur dévolteur

II.2.3) Choix des interrupteurs

Équations générales :

Loi des mailles: $V_{K1}(t) + V_{K2}(t) = U_e$

Loi des nœuds : $I_{K1}(t) = I_{K2}(t) + I_L(t)$

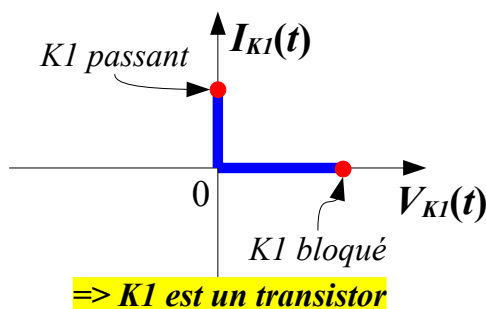
Phase 2 :

**$K2$ passant
et $K1$ bloqué :**

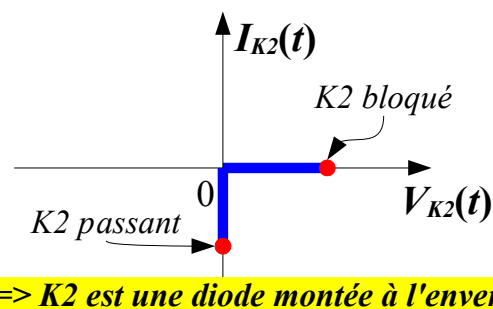
$$V_{K2}(t) = 0 \Rightarrow V_{K1}(t) = U_e > 0$$

$$I_{K1}(t) = 0 \Rightarrow I_{K2}(t) = -I_L(t) < 0$$

=> On obtient un deuxième point dans la caractéristique ($I_K(t)$, $V_K(t)$).
Puis on relie les deux points entre eux par deux segments.



=> **$K1$ est un transistor**

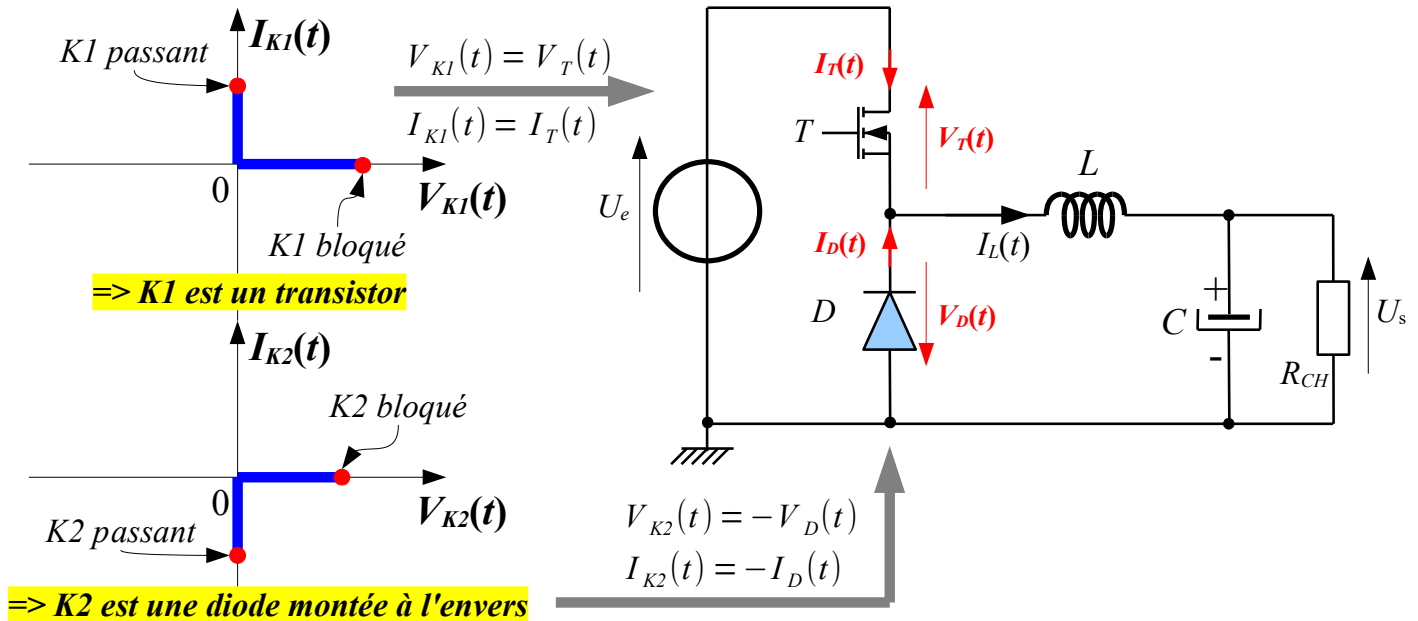


=> **$K2$ est une diode montée à l'envers**

II.2) Étude du hacheur dévolteur

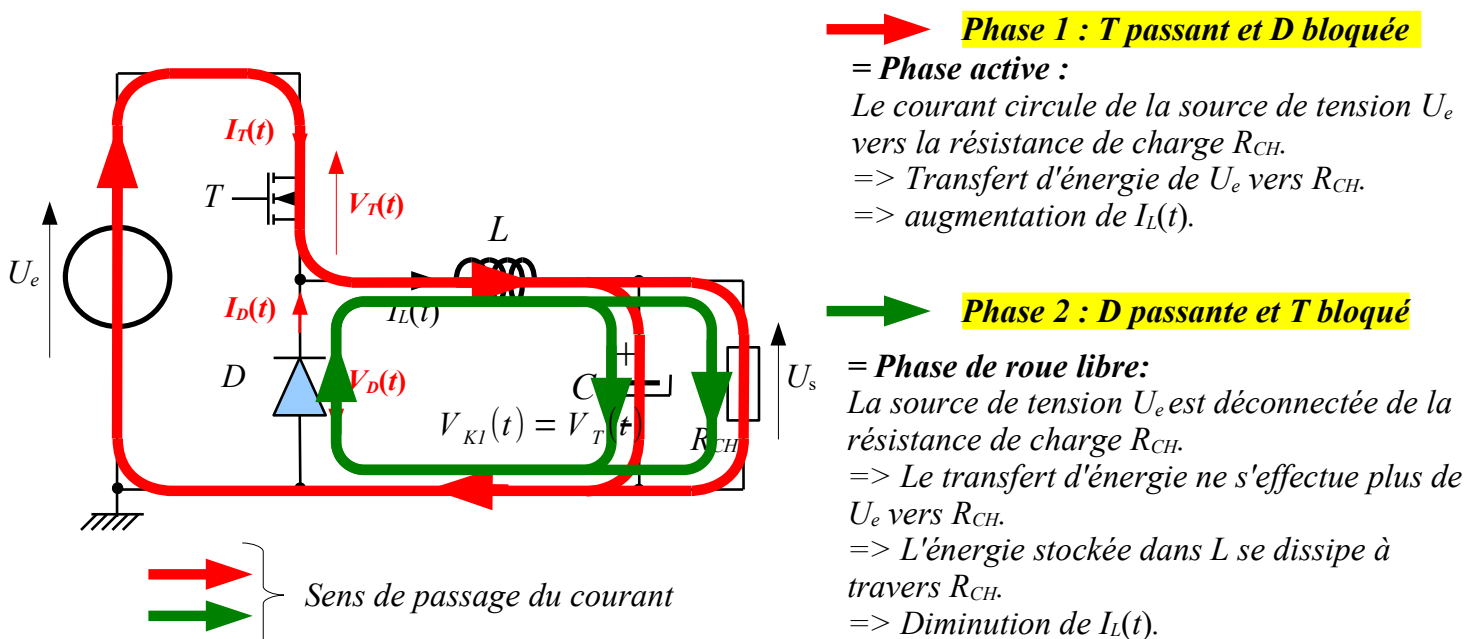
II.2.3) Choix des interrupteurs

=> Ainsi on a réalisé la synthèse des interrupteurs.



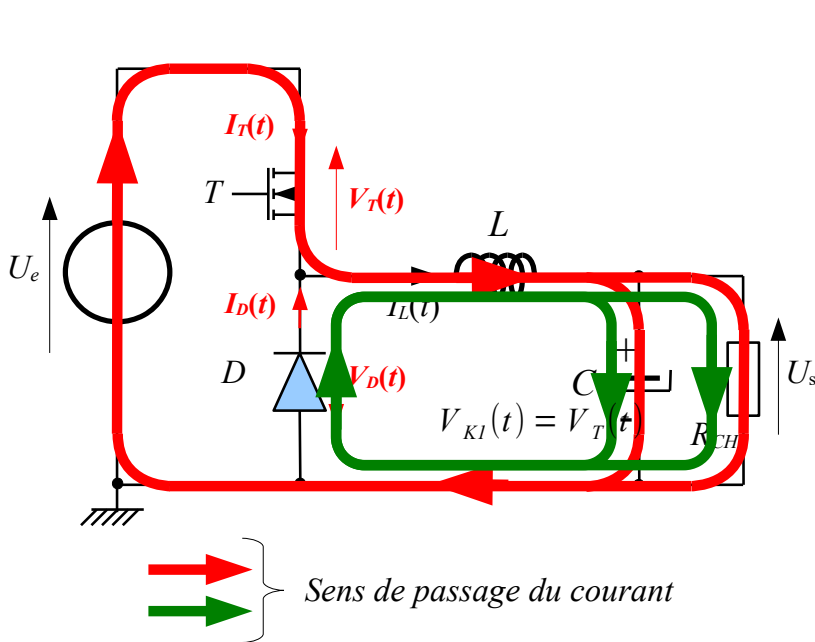
II.2) Étude du hacheur dévolteur

II.2.4) Séquence de fonctionnement du hacheur dévolteur



II.2) Étude du hacheur dévolteur

II.2.5) Réglage du transfert de puissance



→ **Phase 1 : T passant et D bloquée**

→ **Phase 2 : D passante et T bloqué**

Si on augmente la durée de la phase 1,
et l'on diminue la durée de la phase 2,

Alors la puissance moyenne transférée à R_{CH} augmente.

Inversement :

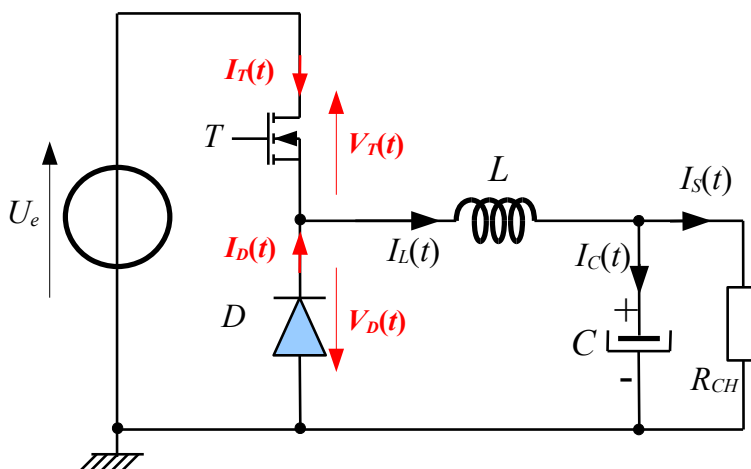
Si on diminue la durée de la phase 1,
et l'on augmente la durée de la phase 2,

Alors la puissance moyenne transférée à R_{CH} diminue.

II.2) Étude du hacheur dévolteur

II.2.6) Analyse des formes d'onde :

i) Méthode générale :



→ **Phase 1 : T passant et D bloquée**

→ **Phase 2 : D passante et T bloqué**

Méthode générale en 2 étapes :

1) écrire les lois générales de l'électro-cinétique
(loi des mailles, des nœuds, lois d'Ohm, etc.),
2) Analyser comment se simplifient ces équations
durant chaque phase de fonctionnement du
convertisseur.

Hypothèse de travail :

Le condensateur C possède une capacité
extrêmement élevée.

=> La tension à ses bornes ne fluctue
quasiment pas

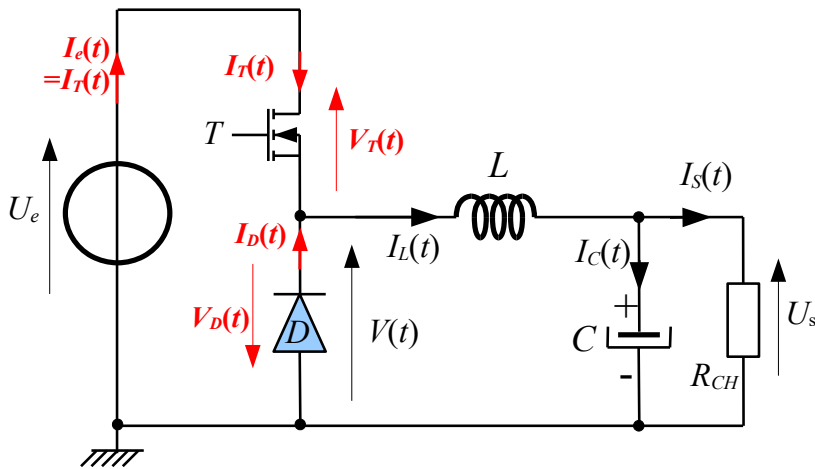
$U_s(t) \approx \text{cte}$

D'autre part, on suppose que $0 < U_s < U_e$

II.2) Étude du hacheur dévolteur

II.2.6) Analyse des formes d'onde :

ii) Équations générales :



Lois des mailles :

$$\begin{cases} U_s + L \cdot \frac{dI_L}{dt} + V_T(t) = U_e & (Eq.1) \\ -V_D(t) + V_T(t) = U_e & (Eq.2) \end{cases}$$

Lois de nœuds :

$$I_T(t) + I_D(t) = I_L(t) \quad (Eq.3)$$

$$I_L(t) = I_C(t) + I_S(t)$$

$$\Rightarrow I_L(t) = C \cdot \frac{dU_s(t)}{dt} + \frac{U_s(t)}{R_{CH}} \quad (Eq.4)$$

II.2) Étude du hacheur dévolteur

TD n°2 : étude du hacheur dévolteur :

- Étude des deux phases de fonctionnement,
- Tracé des courbes (chronogrammes) des différentes grandeurs en fonction du temps,
- Modèle aux valeurs moyennes du hacheur,
- Bilan de puissance.

II.3) Étude du hacheur survolteur

II.3.1) Structure de base

- Le hacheur survolteur sert à élever le niveau de tension.
- Il connecte une source de courant (qui fournit la puissance électrique) à une source de tension qui la reçoit.
- Le hacheur survolteur utilise une seule cellule de commutation ($\Leftrightarrow$ 2 interrupteurs associés dont les états sont complémentaires, voir chapitre 1).

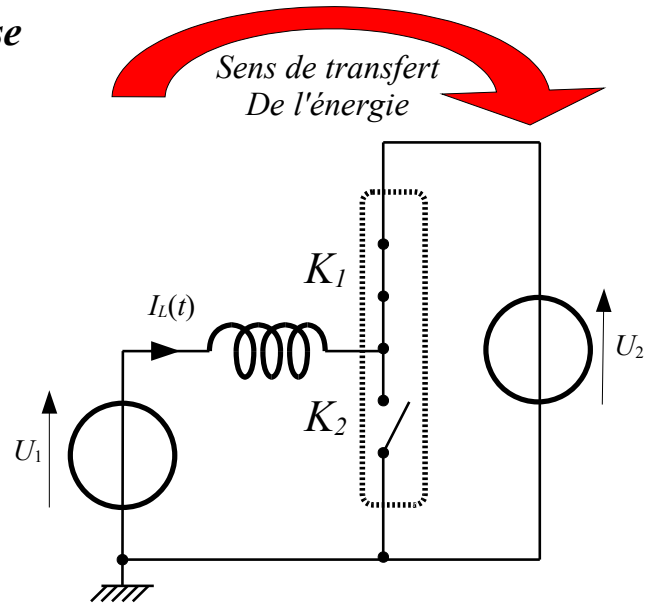


Schéma de principe du hacheur survolteur.
Les états de K_1 et K_2 sont obligatoirement complémentaires

III) Bibliographie

[1] JP. Ferrieux, F. Forest « Alimentations à découpage, convertisseurs à résonance » 3ème édition, Ed : Dunod, ISBN 2-10-050539-4

[2] G. Séguier, « L'électronique de puissance - Les fonctions de base et leur principales applications », Ed : Dunod, ISBN 2-10-003107-4

[3] JY. Fourniols, C. Escriba « Systèmes électroniques analogiques – Amplification, filtrage et optronique », Presses Universitaires du Mirail, ISBN 978-2-8107-0058-5

TD1 Technologies des convertisseurs et des actionneurs

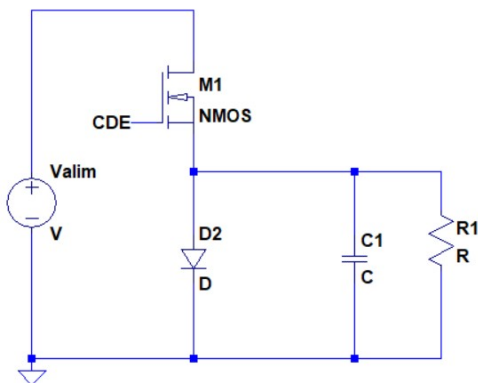
Analyse de structures de convertisseurs statiques et de leurs réversibilités :

Les structures représentées ci-dessous sont toutes fausses, et ne peuvent pas fonctionner en l'état. Pour chacune de ces structures :

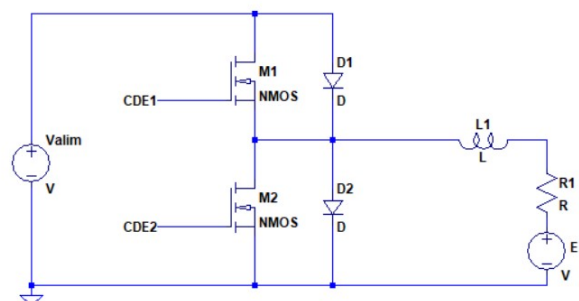
1. Identifier la nature des sources.
2. Identifier les cellules de commutation qui les composent.
3. Corriger les erreurs de topologie.
4. Préciser la fonction réalisée.
5. Donner un nom à la structure.
6. Dessiner les trajets possibles pour le passage du courant.
7. Préciser le signe des grandeurs de sortie (tension de sortie et courant de sortie). En déduire les éventuelles réversibilités des structures proposées, du point de vue de la tension, du courant, ainsi que les réversibilités énergétiques.

Structures proposées :

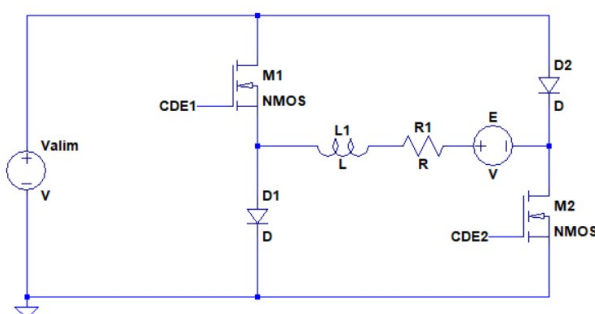
NB : afin de ne pas alourdir les schémas électriques, la commande des transistors n'est pas représentée.



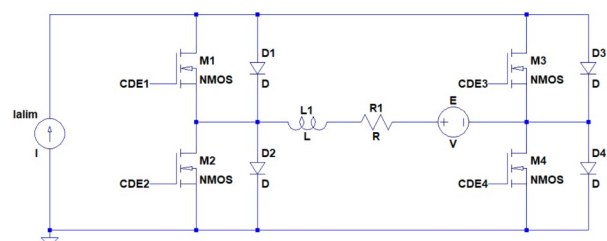
Structure 1 :



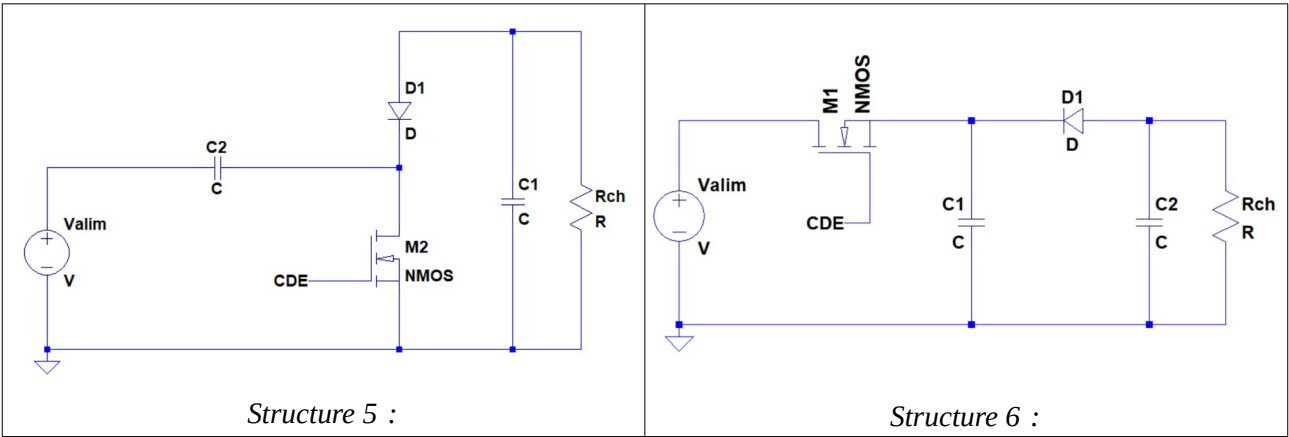
Structure 2 :



Structure 3 :



Structure 4 :



TD 2 Technologies des convertisseurs et des actionneurs

Recharge d'une batterie à l'aide d'un panneau photovoltaïque

On désire recharger une batterie à partir d'un panneau photovoltaïque (PV). Pour cela, on utilise un convertisseur statique représenté sur la figure ci-dessous.

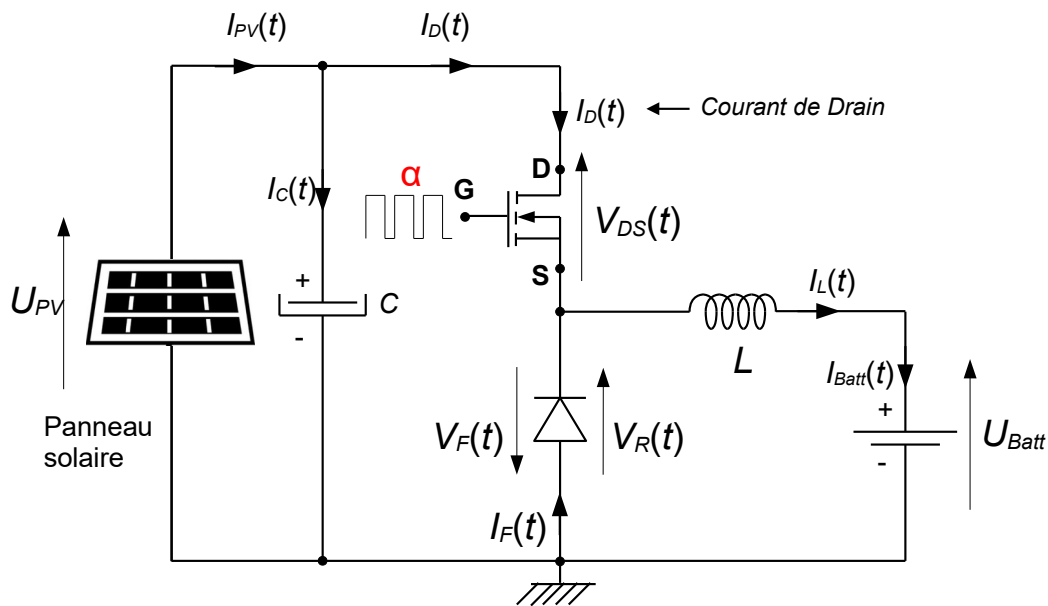


Figure 1 : schéma électrique du convertisseur situé entre le panneau solaire et la batterie.

La puissance délivrée par le panneau photovoltaïque est $P_{PV} = 20W$ sous une tension $U_{PV} = 40V$. La batterie présente une tension U_{Batt} de l'ordre de 24V. La fréquence de découpage (=fréquence de commutation des interrupteurs) est choisie égale à $f_{dec} = 20kHz$. Nous souhaitons que le taux d'ondulation $\Delta I_L / \langle I_L \rangle$ du courant de charge de la batterie ne dépasse pas 5%. $\langle I_L \rangle$ est la notation du courant moyen qui circule dans l'inductance. Et ΔI_L son ondulation $\Delta I_L = I_{max} - I_{min}$.

Nous étudierons le régime établi (permanent) et nous considérons dans un premier temps que le convertisseur de puissance présente un rendement de 100%. D'autre part, nous supposons que la capacité du condensateur est très grande. Ainsi, l'ondulation de la tension $U_{PV}(t)$ sera considérée comme négligeable devant sa valeur moyenne $\langle U_{PV} \rangle = 40V$.

Enfin, les interrupteurs (transistor et diode) sont supposés idéaux. Cela signifie que :

- Lorsqu'ils sont passants, la chute de tension à leurs bornes est supposée nulle,
- Lorsqu'ils sont bloqués, l'intensité du courant qui les traverse est nulle.

NB : On rappelle que la valeur moyenne d'une grandeur T-périodique se calcule de la manière

suivante : $\langle x \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot dt$

Où x désigne soit une tension, soit une intensité, soit une puissance.

- 1) Donner le nom du convertisseur de puissance utilisé. Et donner la raison de ce choix.
- 2) Comment se comporte l'ensemble {panneau photovoltaïque + condensateur} ?
- 3) Comment se comporte l'ensemble {inductance + batterie} ?
- 4) La règle d'alternance des sources est-elle bien respectée ?

Nous considérons que le transistor est piloté à une fréquence de découpage $f_{dec}=1/T_{dec}=20\text{kHz}$, avec un rapport cyclique α défini de la manière suivante :

- Sur l'intervalle de temps $[0; \alpha T_{dec}]$, le transistor est passant tandis que la diode est bloquée.
 - Sur l'intervalle de temps $[\alpha T_{dec}; T_{dec}]$, le transistor est bloqué tandis que la diode est passante.
- 5) On note $V_R(t)$ la tension inverse aux bornes de la diode (voir figure 1). En analysant le circuit durant ces deux intervalles de temps, représenter graphiquement la tension $V_R(t)$ en fonction du temps sur le chronogramme de la figure 2. En déduire le tracé de la tension entre drain et source du transistor MOSFET $V_{DS}(t)$, ainsi que le tracé de la tension directe aux bornes de la diode $V_F(t)$.
 - 6) Exprimer le courant $I_L(t)$ pour les deux intervalles de temps $[0; \alpha T_{dec}]$ et $[\alpha T_{dec}; T_{dec}]$.
 - 7) Représenter graphiquement l'allure du courant $I_L(t)$, et en déduire le tracé du courant de drain dans le transistor $I_D(t)$, puis dans la diode $I_F(t)$.
 - 8) Calculer la valeur moyenne de l'intensité du courant débité par le panneau photovoltaïque : $\langle I_{PV} \rangle$.
 - 9) Quelle est la valeur moyenne de l'intensité absorbée en régime permanent par le condensateur de filtrage ?
 - 10) En déduire la valeur moyenne du courant de drain $\langle I_D \rangle$.
 - 11) Exprimer la valeur moyenne de la tension inverse aux bornes de la diode $\langle V_R \rangle$ en fonction des autres paramètres.
 - 12) Quelle est la tension moyenne aux bornes de l'inductance L en régime permanent ?
 - 13) En déduire l'expression en fonction du rapport cyclique de la tension aux bornes de la batterie en régime permanent.
 - 14) En déduire la valeur du rapport cyclique α qui permet d'obtenir le bon niveau de tension aux bornes de la batterie.

- 15) En effectuant un bilan de puissance sur le hacheur, calculer la valeur moyenne du courant absorbé par la batterie $\langle I_{\text{batt}} \rangle$.
- 16) La batterie possède une capacité égale à 10Ah. Sachant qu'elle était initialement déchargée à 30 % de sa capacité, combien de temps faudra-il au panneau solaire pour la recharger entièrement ?

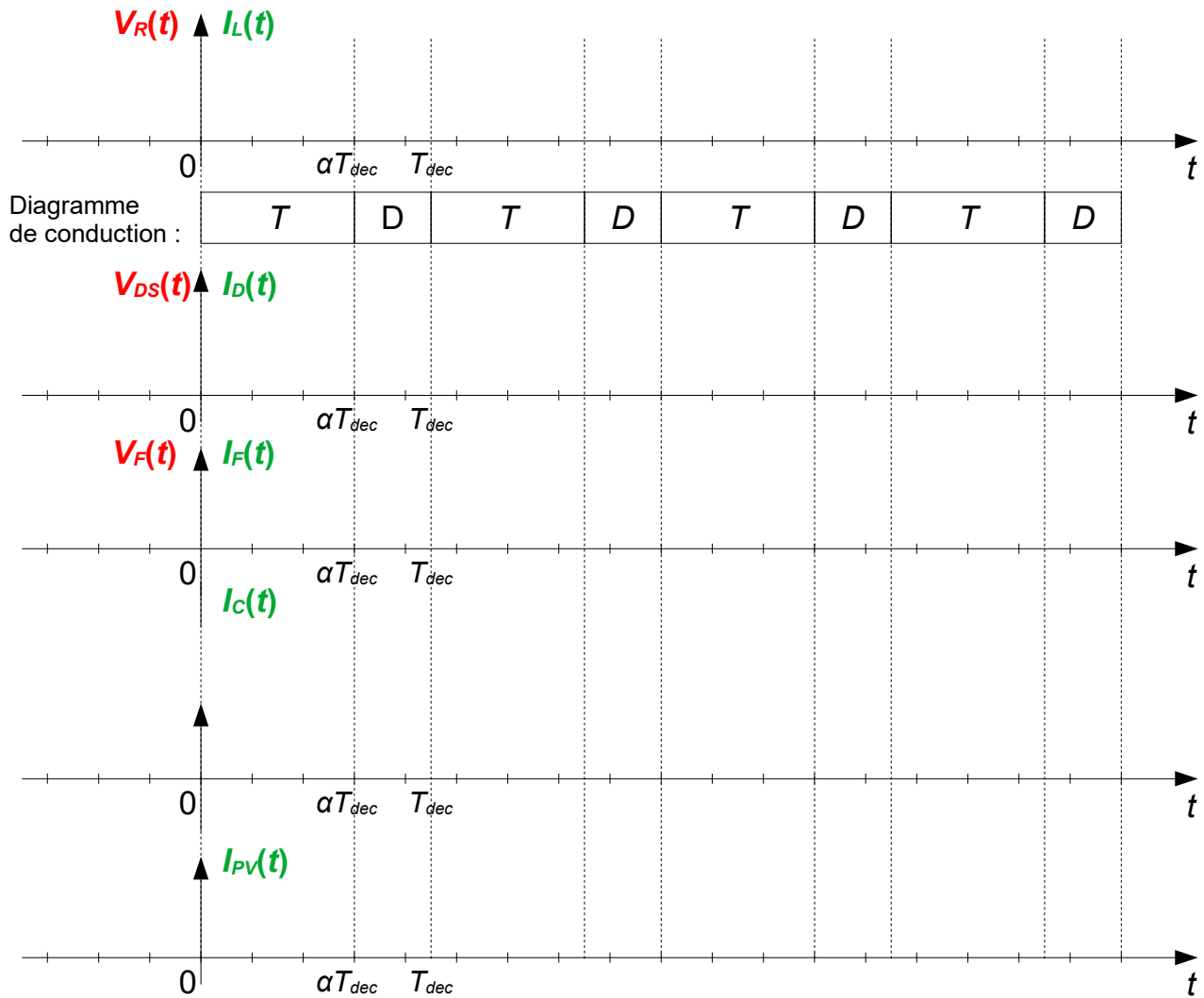


Figure 2 : chronogrammes des grandeurs électriques du convertisseur.

TD3 Technologies des convertisseurs et des actionneurs

Hacheur dévolteur : Dimensionnement des éléments et estimation des pertes

On considère le circuit déjà étudié dans le TD n°2. L'objectif est de dimensionner les éléments de filtrage (L et C), et de calculer les pertes dans les interrupteurs de puissance (MOSFET et diode). Enfin, nous concluons ce TD par une estimation du rendement du hacheur dévolteur.

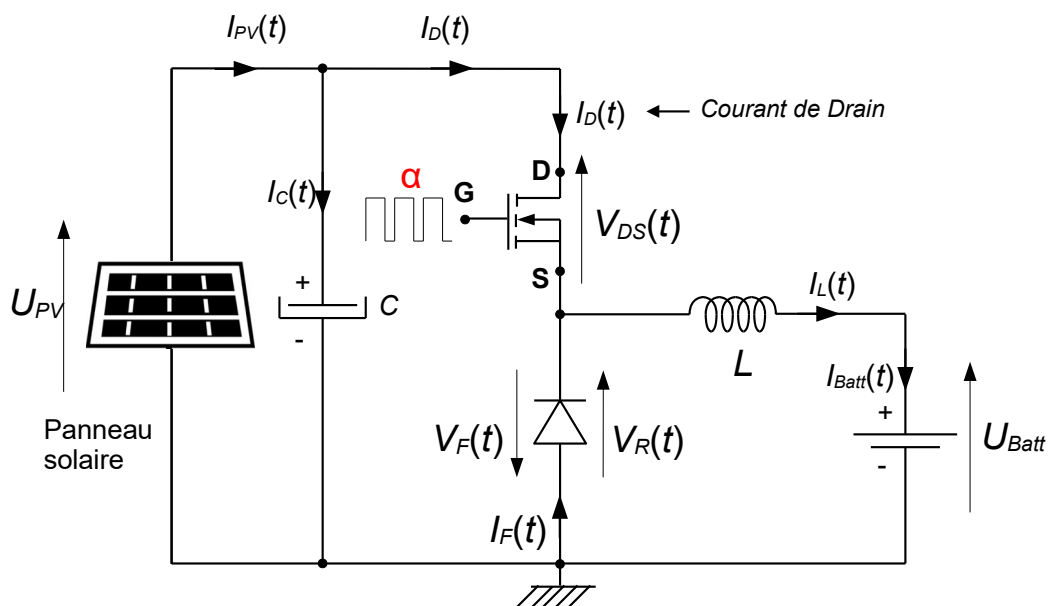


Figure 1 : schéma électrique du hacheur dévolteur situé entre le panneau solaire et la batterie.

On rappelle les données techniques :

Puissance délivrée par le panneau photovoltaïque	$P_{PV}=20 \text{ W}$
Tension délivrée par le panneau photovoltaïque	$U_{PV}=40 \text{ V}$
Tension aux bornes de la batterie à recharger	$U_{Batt}=24 \text{ V}$
Fréquence de découpage des interrupteurs de puissance	$f_{dec}=20 \text{ kHz}$

Cette fois, les interrupteurs ne seront plus considérés comme idéaux. Nous allons prendre en compte leurs caractéristiques réelles données par les documentations techniques des constructeurs.

Partie I : dimensionnement des éléments passifs de filtrage (L et C)

On peut démontrer que l'ondulation du courant dans l'inductance de lissage en sortie du hacheur dévolteur peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot U_{PV}}{L \cdot f_{dec}} \quad (\text{Eq.1})$$

où α désigne le rapport cyclique obtenu sur la tension découpée $V_R(t)$ (voir TD précédent).
 U_{PV} désigne la tension d'alimentation en amont du hacheur dévolteur.

- 1) On désire obtenir un taux d'ondulation du courant dans l'inductance de lissage inférieur ou égal à 5 %. C'est à dire : $\frac{\Delta I_L}{\langle I_L \rangle} = 0,05$. Dimensionner la valeur de L qui satisfait le cahier des charges. Choisir cette valeur dans la série E12.

On peut démontrer que l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur de filtrage en entrée du hacheur dévolteur peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\Delta U_{PV} = \frac{\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot \langle I_L \rangle}{C \cdot f_{dec}} \quad (\text{Eq.2})$$

où α désigne le rapport cyclique obtenu sur la tension découpée $V_R(t)$ (voir TD précédent).
 $\langle I_L \rangle$ désigne la valeur moyenne de l'intensité du courant dans l'inductance de sortie du hacheur.

- 2) On désire obtenir un taux d'ondulation de la tension aux bornes du condensateur de filtrage inférieur ou égal à 5 %. C'est à dire : $\frac{\Delta U_{PV}}{\langle U_{PV} \rangle} = 0,05$. Dimensionner la valeur de C qui satisfait le cahier des charges. Choisir cette valeur dans la série E12.

Partie II : dimensionnement des composants de puissance (MOSFET et diode)

On choisit pour notre application un MOSFET de type IRFD014PBF et une diode de type STPS2L60.

- 3) Quelle est la valeur maximale de la tension que subit le MOSFET lorsque celui-ci est à l'état bloqué ?
- 4) Quelle est la valeur maximale de l'intensité du courant qui traverse le MOSFET lorsque celui-ci est à l'état passant ?
- 5) En consultant la documentation technique du MOSFET IRFD014PBF, déterminer
 - Sa tenue en tension. Est-elle suffisante pour notre application ?
 - Sa tenue en courant. Est-elle suffisante pour notre application ?

NB : pour dimensionner les interrupteurs, prévoir une marge de sécurité égale à 50 %. C'est à dire que la tenue en tension devra être choisie 50 % supérieure à la tension maximale subie au cours d'un cycle de découpage. De même, la tenue en courant devra être choisie 50 % supérieure à l'intensité maximale subie par le composant.

- 6) Quelle est la valeur maximale de la tension que subit la diode lorsque celle-ci est à l'état bloqué ?
- 7) Quelle est la valeur maximale de l'intensité du courant qui traverse la diode lorsque celle-ci est à l'état passant ?
- 8) En consultant la documentation technique de la diode STPS2L60, déterminer
 - Sa tenue en tension. Est-elle suffisante pour notre application ?
 - Sa tenue en courant. Est-elle suffisante pour notre application ?

Partie III : calcul des pertes dans les interrupteurs de puissance et estimation du rendement du hacheur

- 9) Combien vaut la chute de tension directe V_{Fd} (Forward Voltage Drop) aux bornes de la diode lorsque celle-ci est à l'état passant ?
- 10) Représenter graphiquement le chronogramme de la tension directe aux bornes de la diode $V_F(t)$ et de l'intensité $I_F(t)$ qui la traverse durant le fonctionnement de notre montage. Prendre en considération V_{Fd} .
- 11) Exprimer la puissance dissipée par conduction (pertes ON) de la diode en fonctionnement en fonction des paramètres connus. Cette puissance est à l'origine de quel phénomène ? Donner la valeur de cette puissance.
- 12) Extraire la valeur de la résistance à l'état passant $R_{DS(ON)}$ du MOSFET à partir des données constructeur.
- 13) Représenter graphiquement l'évolution de la tension aux bornes du MOSFET $V_{DS}(t)$ ainsi que celle de l'intensité du courant $I_D(t)$ qui le traverse durant le fonctionnement de notre montage.
- 14) Exprimer la puissance dissipée par conduction (pertes ON) du MOSFET en fonctionnement en fonction des paramètres connus. Cette puissance est à l'origine de quel phénomène ? Donner la valeur de cette puissance.
- 15) Représenter les allures des courants et tensions aux bornes du MOSFET et de la diode lors des commutations de ces composants.
- 16) Identifier et exprimer l'énergie mise en jeu à chaque commutation.

17) Exprimer la puissance dissipée par commutation des deux composants pour une fréquence f_{dec} donnée.

18) Effectuer le bilan de puissance dans le hacheur :

- compléter le tableau ci-dessous : indiquer dans chaque case l'expression littérale, puis la valeur numérique de chaque perte.
- En déduire la puissance moyenne transférée vers la charge, puis le rendement théorique du hacheur.

Puissance fournie par le panneau solaire			$P_{pv}=20\text{ W}$
	MOSFET IRFD014PBF	Diode STPS2L60	Total
Pertes par conduction			
Pertes par commutation			
Puissance délivrée à la charge			
Rendement théorique			

Tableau 1 : bilan de puissance dans le hacheur dévolteur
