



Convertisseurs statiques



Renaud Costadoat
Lycée Dorian



DORIAN



Introduction

Savoir

Vous êtes capables :

- de modéliser un dipôle en fonction de ses caractéristiques,
- de manipuler des sources de tension et de courant,
- de modéliser un circuit et de déterminer ces caractéristiques grâce aux lois de l'électrocinétique.

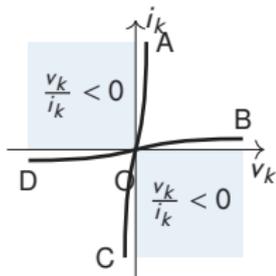
Problématique

Il est nécessaire d'utiliser d'autres formes de représentation d'un mécanisme.

- *Problème: Comment modéliser un convertisseur statique ?*
- **Perspectives:** Déterminer une méthode de modélisation et des critères de choix afin d'intégrer un convertisseur statique dans une chaîne d'énergie.

Interrupteurs à semi conducteurs

L'électronique de puissance utilise des semi conducteurs fonctionnant en "interrupteurs". Les figures suivantes permettent de montrer le comportement d'un interrupteur.

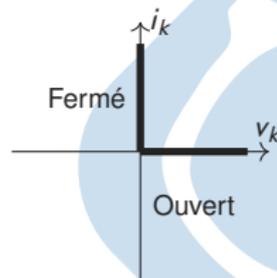
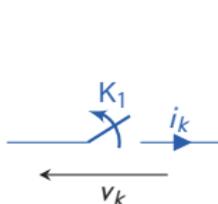


Un interrupteur équivaut à une résistance (toujours positive) :

- très faible lorsqu'il est fermé,
- très forte lorsqu'il est ouvert.

Définitions

Un interrupteur idéal est considéré comme un **dipôle orienté** en convention **récepteur**.



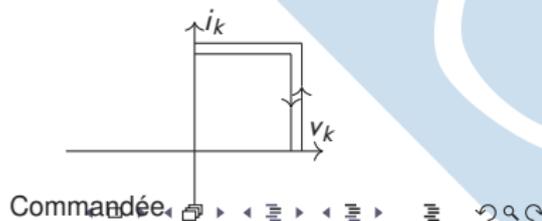
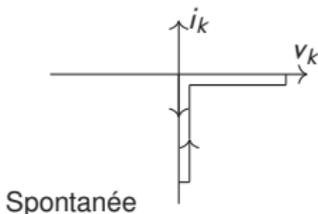
Il peut ainsi être caractérisé par les différents **segments** situés sur les axes du repère (v_k, i_k) . Il existe alors des interrupteurs à 2, 3 ou 4 segments. Ils seront utilisés en fonction de besoins liés à la nature et aux réversibilités des **sources** et des **charges**. Il sera considéré que pour un interrupteur idéal, la caractéristique statique est **non dissipative**.

Caractéristique dynamique

La caractéristique **dynamique** d'un interrupteur est caractérisée par la trajectoire suivie par le point de fonctionnement pour passer d'un point situé sur un segment à un point situé sur un autre segment. Elle peut être amenée à passer dans un des quarts de plan ou suivre les axes comme on le verra plus loin.

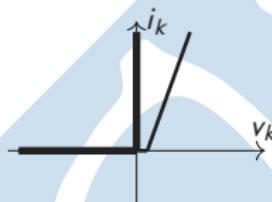
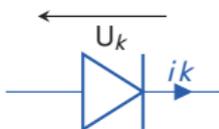
L'étude de cette façon de commuter permet de prévoir les **pertes par commutation**. En effet, la puissance électrique est définie par: $P_{elec} = U \cdot i$, celle ci est toujours positive (système dissipatif). Ainsi, deux cas de figure doivent être pris en compte:

- Segments de signes opposés, le point de fonctionnement se déplace le long des axes: $W = 0$ "commutation spontanée",
- Segments de même signe, déplacement dans un quart de plan : $W > 0$ "commutation commandée à l'amorçage ou au blocage".

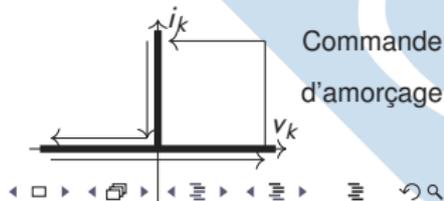


Exemples d'interrupteurs

Une **diode** est un interrupteur à 2 segments de signe opposés. Idéalement, elle ne peut donc commuter que sans pertes.

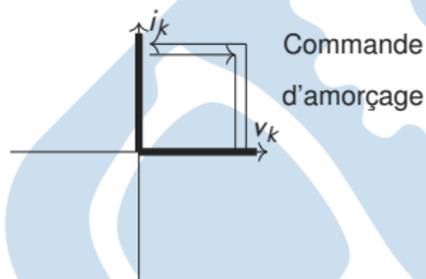
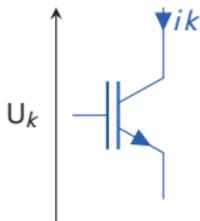


Le **thyristor** est un interrupteur à 3 segments et à commande d'amorçage. La trajectoire du point de fonctionnement est représentée sur la figure suivante compte tenu de la présence de 2 segments de signe opposés.



Exemples d'interrupteurs

L'IGBT est un interrupteur à 2 segments commandable à l'amorçage et au blocage.

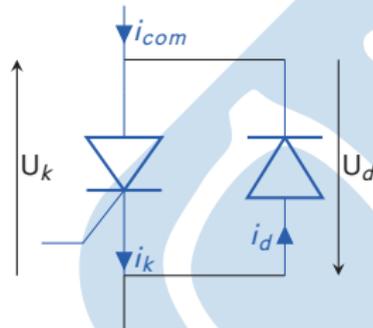
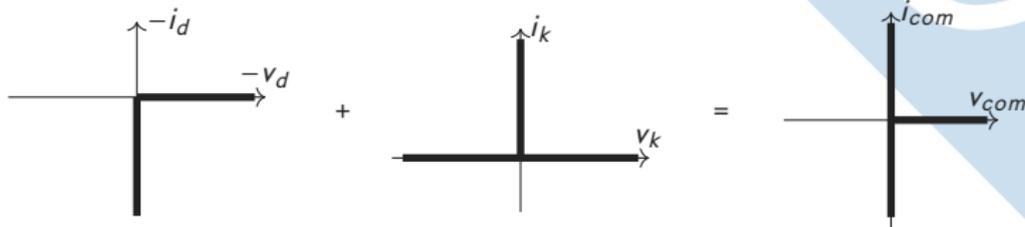


Ces exemples correspondent aux interrupteurs « classiques » existants, un autre exemple (MOSFET) aurait pu faire partie de cette liste mais ne sera pas présenté ici.

Lorsqu'il est nécessaire de réaliser une commande spécifique, il est toutefois possible d'associer ces éléments.

Association d'interrupteurs

Exemple: L'association d'une **diode antiparallèle** et d'un **thyristor** permet de générer un *interrupteur à trois segments bidirectionnel en courant*. Pas en tension car la diode impose une tension nulle lorsque le courant est négatif.



Cellule de commutation

Un **convertisseur statique** d'énergie permet d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Son mode de fonctionnement consiste par commutation à connecter/déconnecter la **source** de la **charge**.

Il est alors possible de convertir:

- Une tension continue
 - ▶ en une tension continue : **Hacheur**,
 - ▶ en une tension alternative : **Onduleur**,
- Une tension alternative
 - ▶ en une tension continue : **Redresseur**,
 - ▶ en une tension alternative : **Gradateur**.



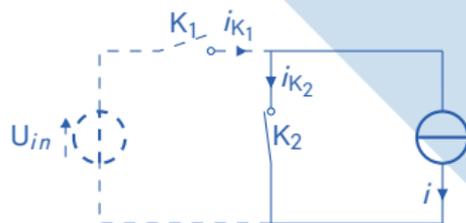
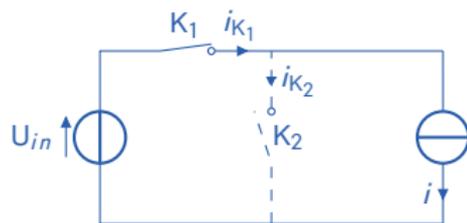
La charge de la sortie sera modélisée par une **source de courant** car elle est potentiellement *réversible* et d'après les critères d'association des sources, seules une source de tension et une source de courant peuvent être associées directement.

Cellule de commutation

L'introduction d'**interrupteurs** permet donc le contrôle de l'**échange d'énergie** entre ces deux **sources**. Le respect des règles énoncées précédemment conduit donc à devoir utiliser deux interrupteurs :

- le premier connecte les sources entre elles,
- le second assure le raccordement correct de la source de courant.

La structure de conversion la plus simple met donc en œuvre obligatoirement 2 interrupteurs dont les fonctionnements sont liés : leurs états sont nécessairement complémentaires. Cette structure de base est nommée « cellule de commutation » elle est la brique élémentaire de tout convertisseur statique.



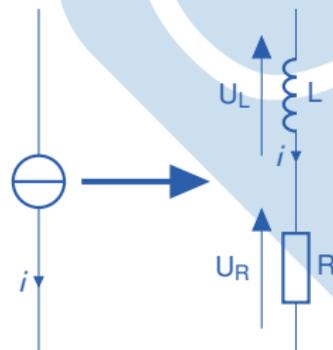
Source de courant R,L

Afin de simuler le comportement d'une source de courant, l'alimentation d'un circuit R,L, peut être étudiée. Cela permet de déterminer la forme du courant la traversant.

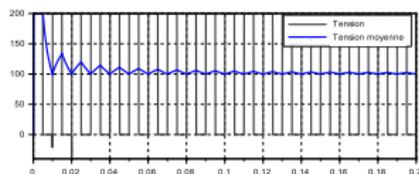
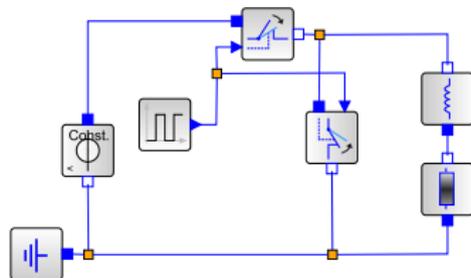
Le transfert de l'énergie entre les sources est dans un premier temps réalisé avec un **rapport cyclique** de 50%, cela signifie que chaque interrupteur sera ouvert et fermé pendant la même durée.

Données de simulation:

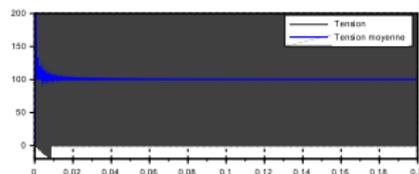
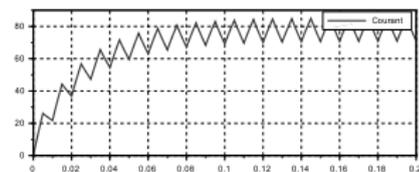
- Inductance $L = 12.8\text{mH}$,
- Résistance $R = 2.84\Omega$,
- Alimentation $U_{in} = 200\text{V}$ à 50%.



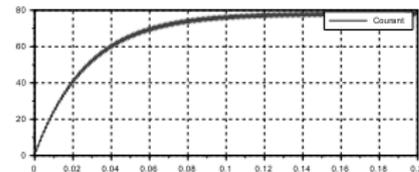
Source de courant R,L



Fréquence de commutation de 100Hz



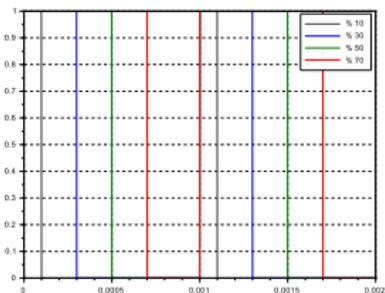
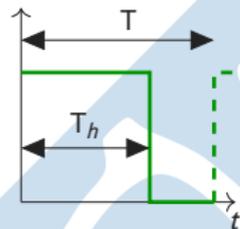
Fréquence de commutation de 1000Hz



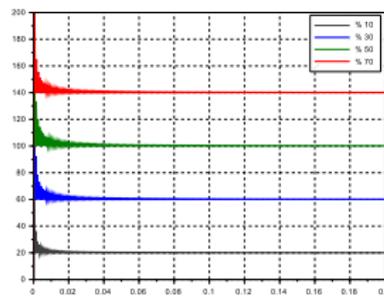
Source de courant R,L

Il est possible alors de faire varier le **rapport cyclique** afin de « laisser passer » plus ou moins d'énergie entre les deux sources.

Le pourcentage indique le rapport $K = \frac{T_h}{T}$ et le résultat est alors $U_{out} = U_L + U_R = K \cdot U_{in} = K$.



Commande



Tension moyenne

Source de courant R,L

La simulation précédente montre l'intérêt d'un tel système. Il permet de faire varier la puissance transmise à un système électrique en jouant sur la forme d'un signal de commande.

L'analyse de la source de courant permet de faire les constats suivants :

- la tension a la forme d'un créneau, ce qui peut être problématique, cependant la tension moyenne dépend de la largeur du créneau d'entrée,
- le courant est lissé par la bobine ($U_L = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$) et ce lissage est amélioré en augmentant la fréquence de commutation.

Remarque

Le format de cette alimentation est-il compatible avec un système réel ? Par exemple, est-il possible d'alimenter un moteur électrique à l'aide d'une cellule de commutation comme celle-ci ?

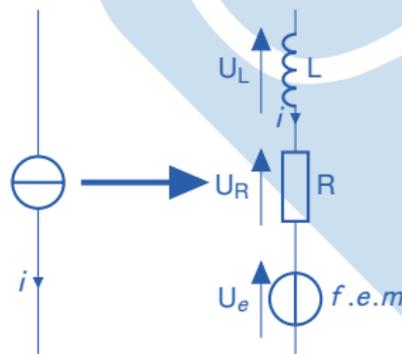
Application: Alimentation d'un MCC

Application: Distribuer l'énergie électrique à un Moteur à Courant Continu à l'aide d'une cellule de commutation.

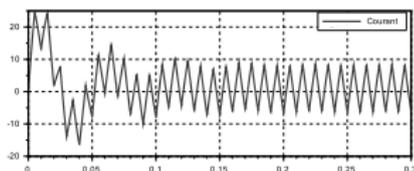
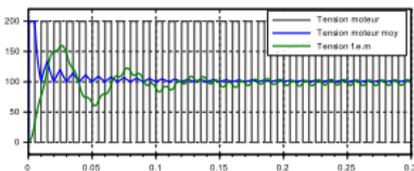
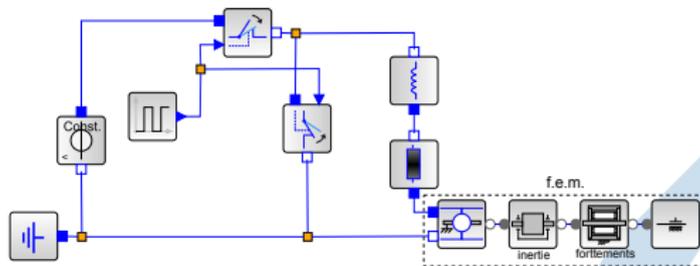
Dans ce cas, le modèle électrique du moteur est la **source de courant**. Elle est composée d'une **inductance**, d'une **résistance** et d'une force électro-motrice (f.e.m).

Données de simulation:

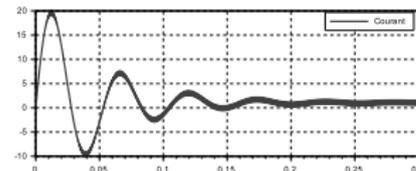
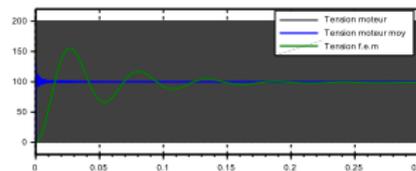
- Inductance $L = 12.8\text{mH}$,
- Résistance $R = 2.84\Omega$,
- Alimentation $U_{in} = 200\text{V}$ à 50%,
- Inertie $J_{eq} = 2,05 \cdot 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$,
- Frottements secs $f = 0.05\text{N} \cdot \text{m}$,
- Frottements visqueux $\lambda = 0.01\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$.



Application: Alimentation d'un MCC



Fréquence de commutation de 100Hz



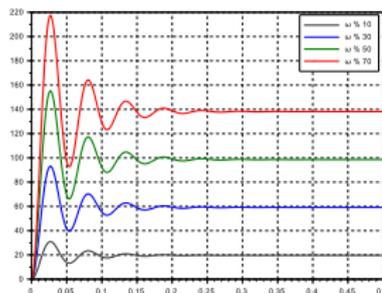
Fréquence de commutation de 10kHz

Application: L'alimentation du MCC

La simulation précédente montre que la forme « créneau » de la tension aux bornes du moteur **ne se retrouve pas** aux bornes de la f.e.m. Cela s'explique par la loi électrique $U_e(t) = K_e \cdot \omega(t)$. En effet, l'inertie mécanique équivalente ramenée à l'arbre du moteur empêche la variation brutale de la vitesse $\omega(t)$ et donc de la tension $U_e(t)$.

Il est alors possible de choisir la tension aux bornes de la f.e.m. du moteur en fonction du rapport cyclique de la commande.

Les pics du démarrage ne reflètent pas la réalité car le modèle de simulation n'est pas valable durant cette période.



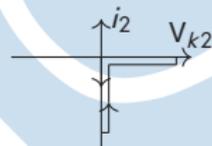
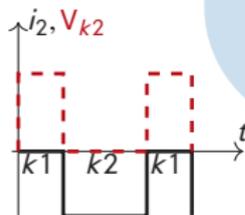
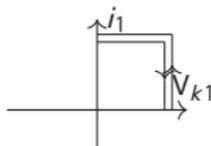
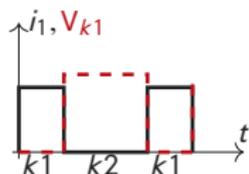
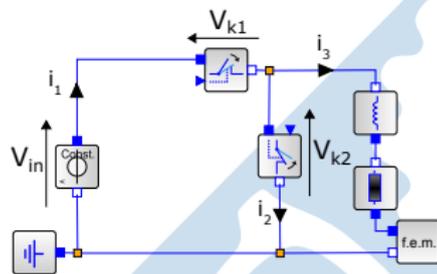
Résultat

La charge peut alors être alimentée à une tension U par cette « cellule de commutation » avec $0 < U < U_{in}$.

Hacheur série

Afin de mettre en œuvre la solution retenue, il est nécessaire de déterminer quels composants permettent de jouer le rôle de ces interrupteurs.

- $V_{in} = U_{k1} + U_{k2}$,
- $i_1 = i_2 + i_3$. (avec $i_3 > 0$, le moteur ne fonctionne pas en alternateur).

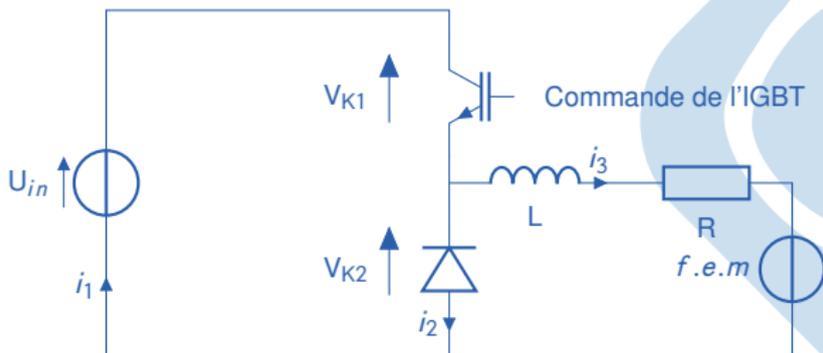
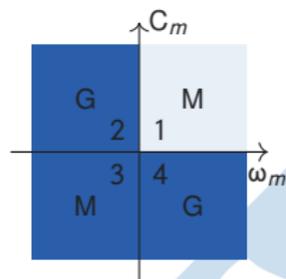


Le comportement des interrupteur permet de choisir:

- un IGBT pour l'interrupteur $k1$,
- une diode pour l'interrupteur $k2$.

Hacheur série

La solution de montage de la cellule correspondant au besoin est donc la suivante.

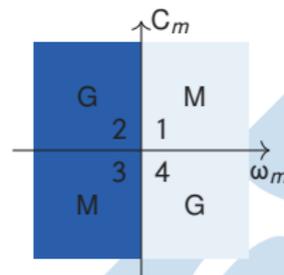
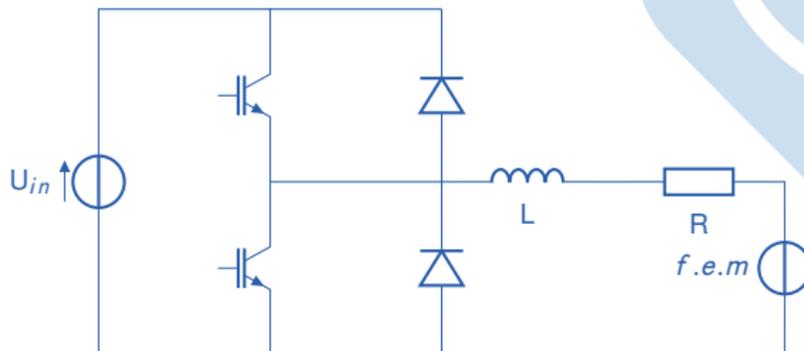


Commande **sans** réversibilité de la source de courant.

Hacheur 2 quadrants, réversible en courant

En choisissant de permettre l'utilisation du moteur en alternateur, il faut alors autoriser la réversibilité en courant. Attention dans cette solution la vitesse de rotation est toujours positive.

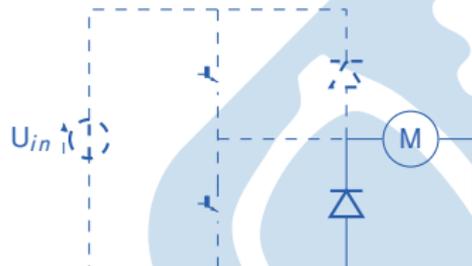
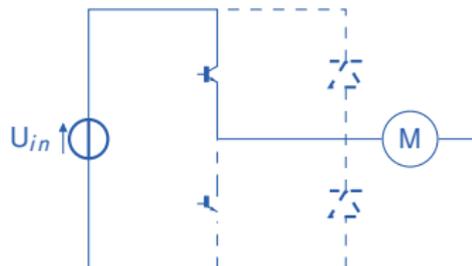
- $V_{in} = U_{k1} + U_{k2}$,
- $i_1 = i_2 + i_3$. (avec i_3 quelconque).



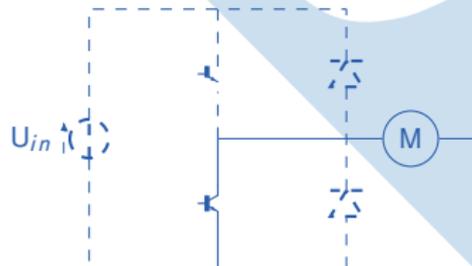
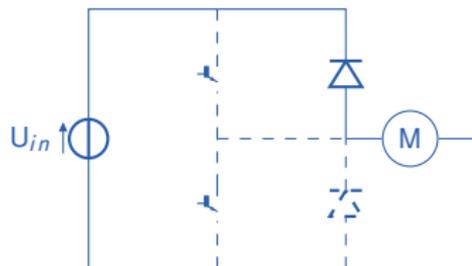
Commande **avec** réversibilité de la source de courant.

Hacheur 2 quadrants, réversible en courant

Moteur



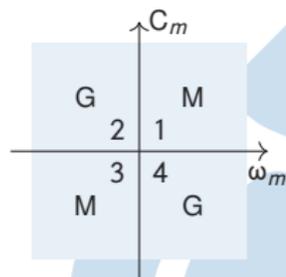
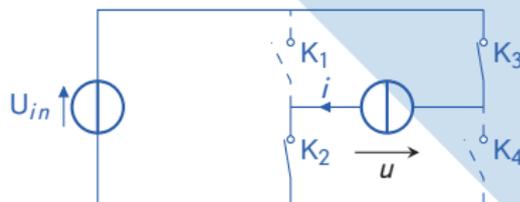
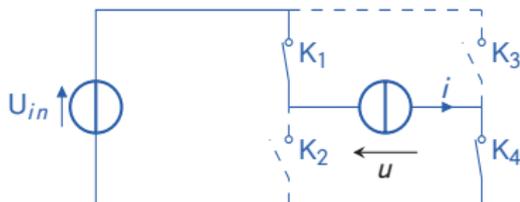
Générateur



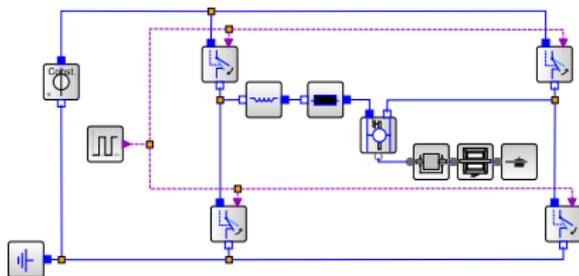
Hacheur 4 quadrants

Le dernier cas consiste à permettre la réversibilité en tension (choix du *sens de rotation* d'un moteur). Cela revient à alimenter la charge avec une tension U telle que $-U_{in} < U < U_{in}$.

La **configuration d'interrupteurs** suivante permet cette application.



Hacheur 4 quadrants



Cette configuration a été mise en place sur le modèle de simulation précédent.

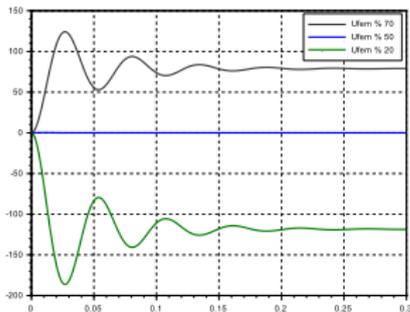
Il est alors possible de gérer le signe de la tension aux bornes de la f.e.m.

La tension U_{out} est donc la moyenne entre U_{in} et $-U_{in}$ pondérée du rapport cyclique.

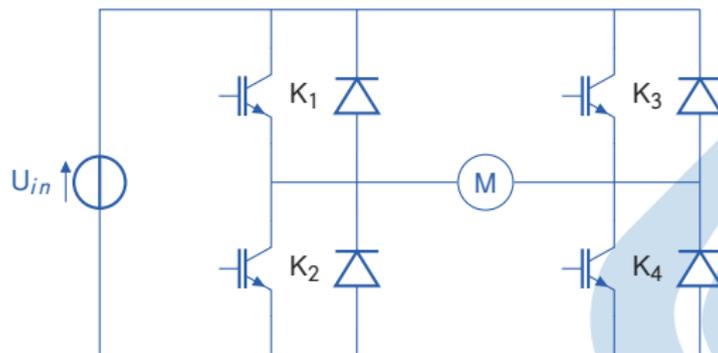
$$U_{out} = U_{in} \cdot K - U_{in} \cdot (100 - K) = U_{in} \cdot (2 \cdot K - 100)$$

Ainsi:

- $K = 50\%$: $U_{fem} = 0$,
- $K > 50\%$: $U_{fem} > 0$,
- $K < 50\%$: $U_{fem} < 0$,



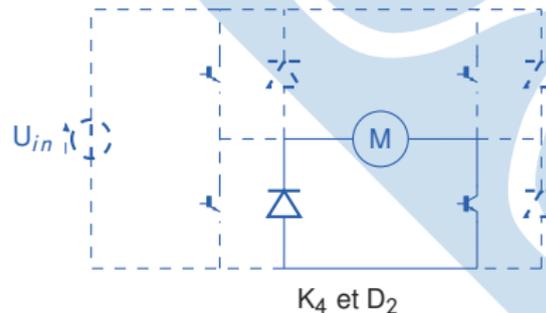
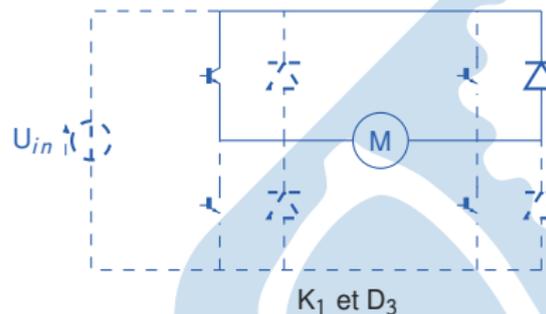
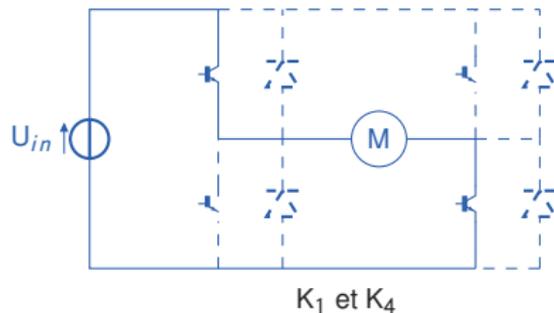
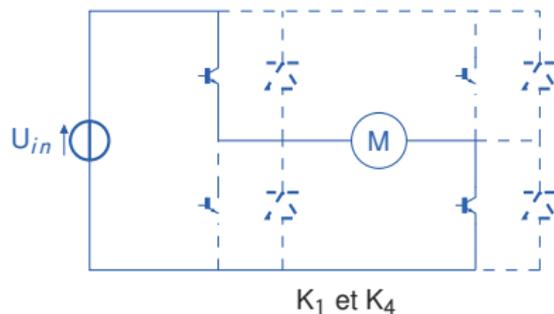
Hacheur 4 quadrants



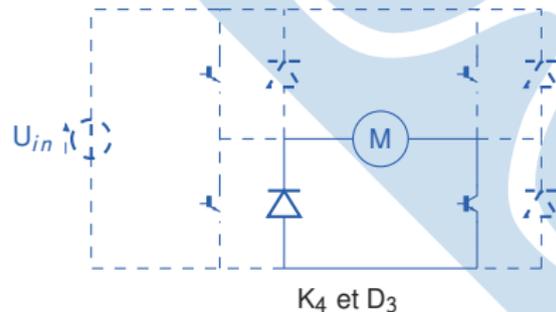
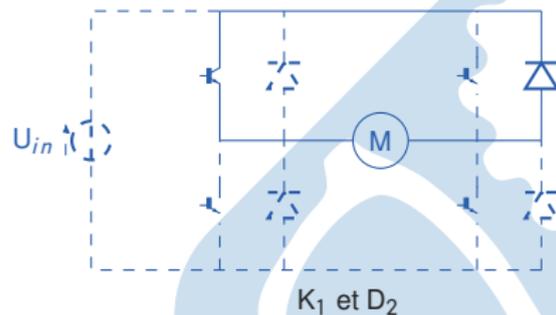
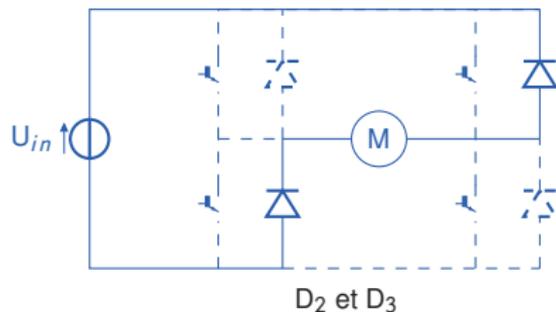
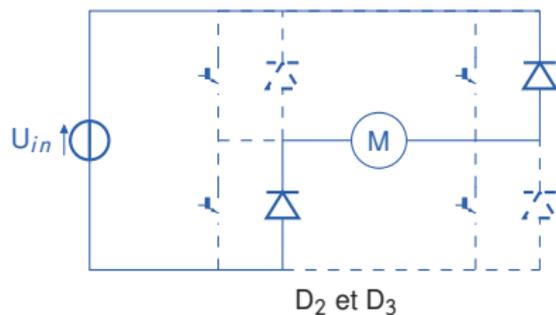
La commutation combinée des IGBT K_1 , K_2 , K_3 et K_4 va permettre les comportements des 4 quadrants suivants:

- Quadrant 1: MCC fonctionne en moteur tournant dans le sens positif,
- Quadrant 2: MCC fonctionne en générateur tournant dans le sens négatif,
- Quadrant 3: MCC fonctionne en moteur tournant dans le sens négatif,
- Quadrant 4: MCC fonctionne en générateur tournant dans le sens positif.

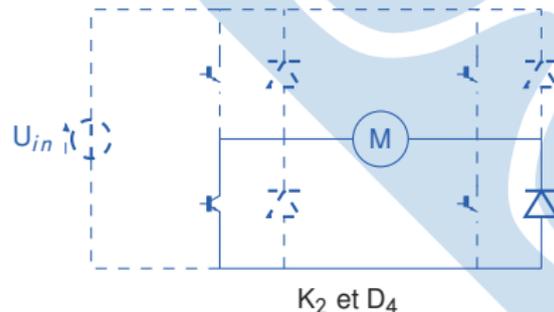
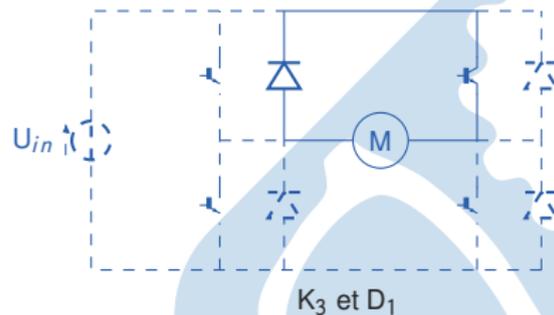
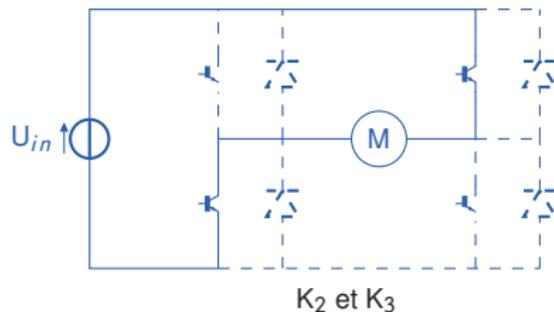
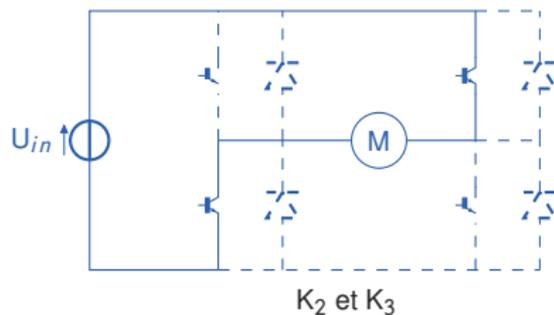
Quadrant 1: Moteur, sens positif



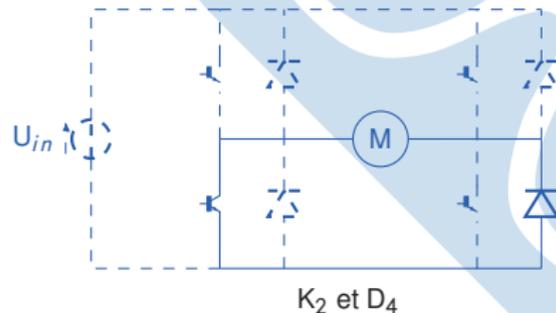
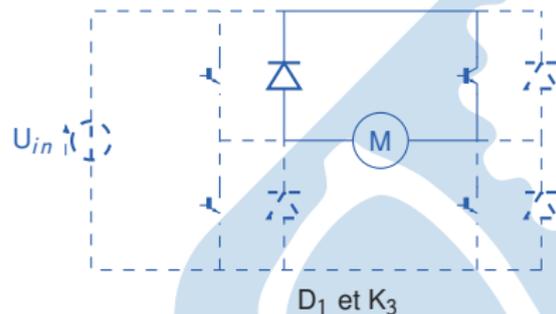
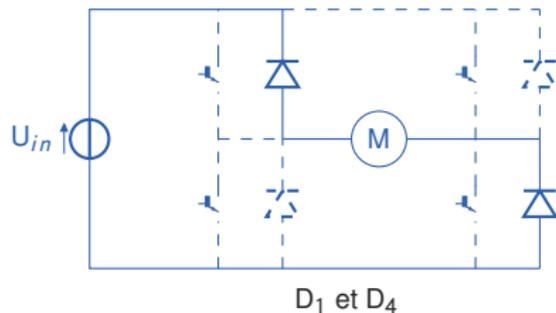
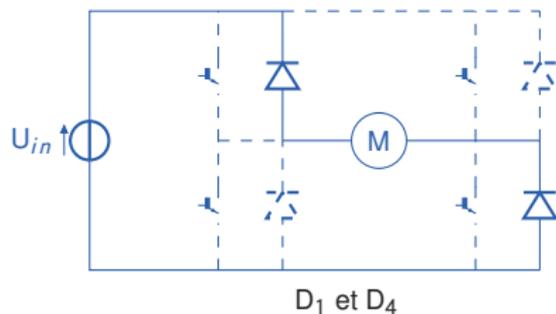
Quadrant 2: Générateur sens négatif



Quadrant 3: Moteur, sens négatif



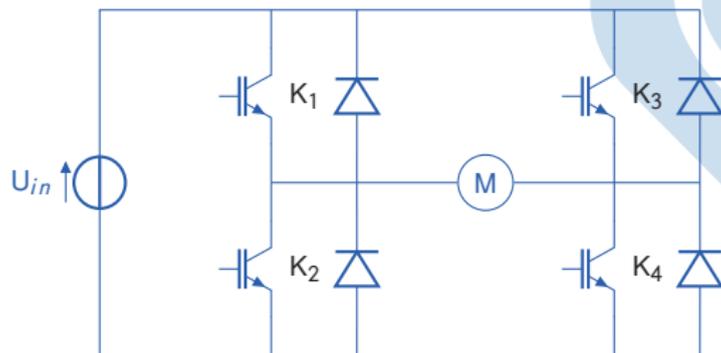
Quadrant 4: Générateur, sens positif



Onduleur

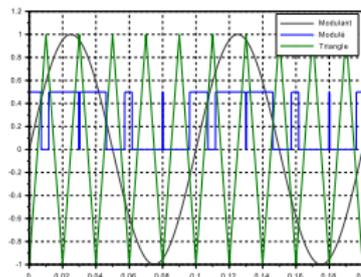
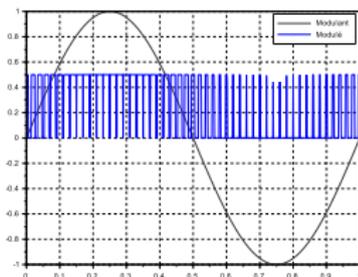
L'objectif d'un **onduleur** est de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue.

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



Onduleur

Une commande MLI est envoyée à l'onduleur afin d'obtenir le signal souhaité.

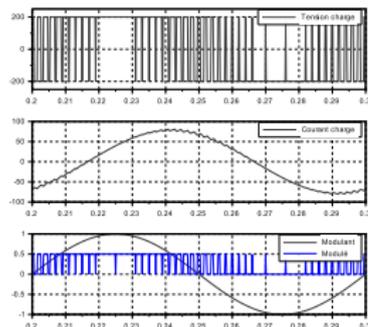
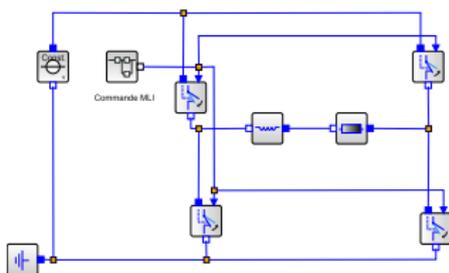


Le modulé est défini à partir de la comparaison du modulant et d'un signal triangulaire de même amplitude.

- Modulant **au dessus**: le **modulé vaut 1**,
- Modulant **en dessous**: le **modulé vaut 0**,

Onduleur

La charge est donc alimentée par ce montage.



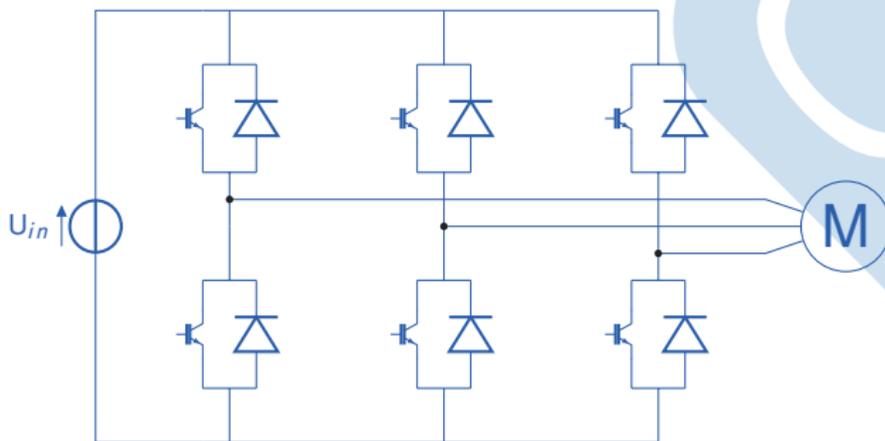
On constate alors que:

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

Onduleur triphasé

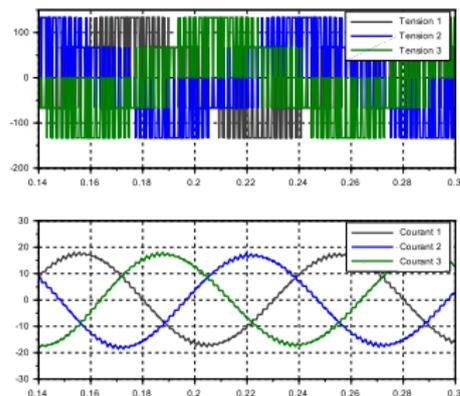
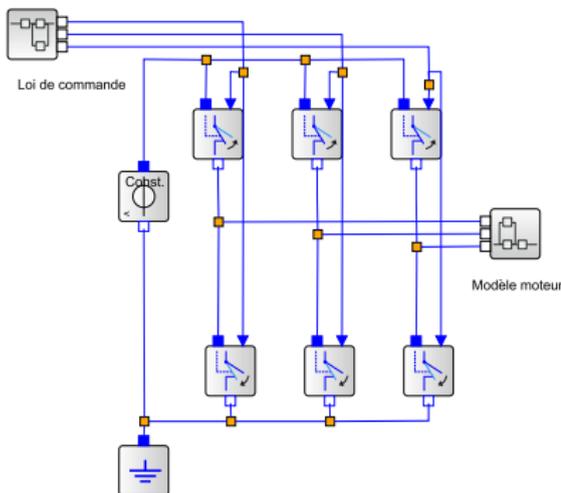
Un onduleur triphasé peut être utilisé pour l'alimentation d'un moteur triphasé, comme le moteur brushless, très utilisé en modélisme.

Chaque entrée du moteur est connectée à une source de tension, ces phases étant déphasées de $\varphi = \frac{2\pi}{3}$.



Onduleur triphasé

La mesure de la **tension** et du **courant** dans chacune des bobines d'un moteur alimenté par un **onduleur triphasé** est présentée ici.



Les formes des tensions et courants correspondent à celles présentées précédemment.

Électronique de puissance

Savoir

Vous devez être capables :

- de modéliser le comportement d'un semi-conducteur,
- de modéliser le comportement d'une cellule de commutation,
- de concevoir et de commander une cellule de commutation afin de piloter une machine électrique.

Problématique

Il est nécessaire d'utiliser d'autres formes de représentation d'un mécanisme.

- *Problème: Comment modéliser un moteur électrique ?*
- **Perspectives:** Concevoir une chaîne d'énergie électrique en associant une cellule de commutation à la machine électrique correspondante.