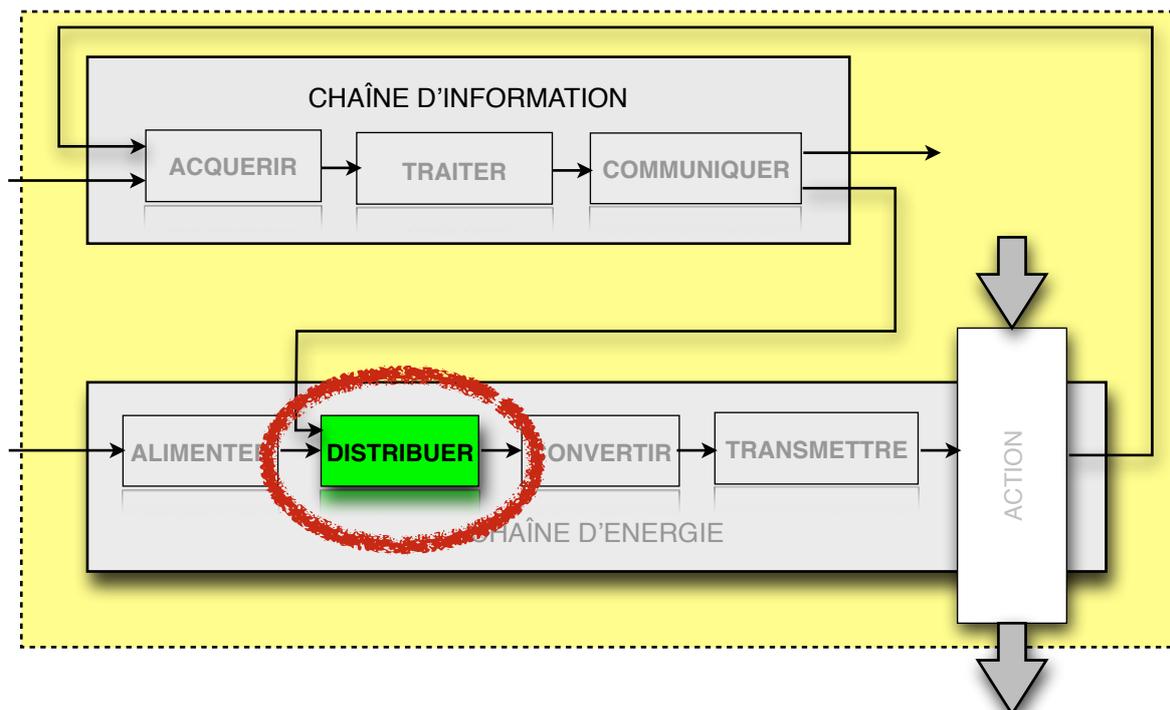


DISTRIBUTION D'ENERGIE

LE HACHEUR



	CI3 : Chaînes d'énergie	
	DISTRIBUTION DC/DC : LE HACHEUR	COURS
	<i>Problématique</i>	Edition 5 - 05/10/2018

PROBLEMATIQUE

« Les moteurs à courant continu sont pilotés en vitesse en adaptant leur tension d'alimentation. Or la tension d'alimentation d'un système est constante.

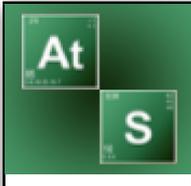
Il faut donc insérer entre l'alimentation et le convertisseur un composant qui aura pour fonction de fournir une tension de valeur variable et pilotable : c'est le rôle du hacheur»

B - MODELISER	
B1 : Identifier et caractériser les grandeurs physiques agissant sur un système	Associer les grandeurs physiques aux échanges d'énergie et à la transmission de puissance Proposer des hypothèses simplificatrices en vue de la modélisation
B2 Proposer un modèle de connaissance et de comportement	Associer un modèle aux constituants d'une chaîne d'énergie
C - RESOUDRE	
C1 : Choisir une démarche de résolution	Proposer une méthode de résolution permettant la détermination des courants des tensions, des puissances échangées, des énergies transmises ou stockées
C2 : Procéder à la mise en œuvre d'une démarche de résolution analytique	Déterminer les courants et les tensions dans les composants Déterminer les puissances échangées

	CI3 : Chaînes d'énergie	
	DISTRIBUTION DC/DC : LE HACHEUR	COURS
	<i>Sommaire</i>	Edition 5 - 05/10/2018

Sommaire

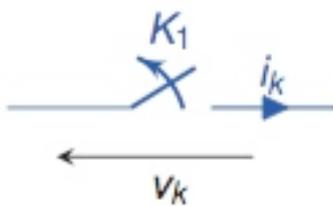
A.Préambule : diodes et transistors	4
A.1.Interrupteur idéal	4
A.2.Diode	4
A.3.Thyristor	4
A.4.Transistors	5
A.4.1. <i>Transistor bipolaire</i>	
A.4.2. <i>Transistor MOS ou MOSFET</i>	
A.4.3. <i>Le transistor bipolaire à grille isolée IGBT</i>	
B.Cellule de commutation	7
B.1.Généralités	7
B.1.1. <i>Cellule de commutation</i>	
B.1.2. <i>Exemple</i>	
C.Connexion à un moteur MCC	11
D.Hacheur	13
D.1.Composants constitutifs	13
D.1.1. <i>Notion de quadrant de fonctionnement</i>	
D.1.2. <i>Hacheur série 1 quadrant</i>	
D.2.Hacheur 2 quadrants réversible en courant	15
D.3.Hacheur 2 quadrants réversible en tension (Pont en H)	18
D.3.1. <i>Principe de fonctionnement</i>	
D.3.2. <i>Pilotage des transistors</i>	
D.3.3. <i>Remarque importante</i>	
D.4.Hacheur 4 quadrants	19
D.4.1. <i>Fonctionnement dans le premier quadrant : moteur, sens positif</i>	
D.4.2. <i>Fonctionnement dans le second quadrant : génératrice, sens négatif</i>	
D.4.3. <i>Fonctionnement dans le troisième quadrant : moteur, sens négatif</i>	
D.4.4. <i>Fonctionnement dans le quatrième quadrant : génératrice, sens positif</i>	
D.5.Forme des signaux	24
D.5.1. <i>Modèle d'étude</i>	
D.5.2. <i>Tension moyenne aux bornes du moteur</i>	
D.5.3. <i>Evolution des signaux</i>	
D.5.4. <i>Formes des signaux</i>	
D.6.Commande séquentielle, unipolaire, bipolaire d'un hacheur 4 quadrants	26
D.6.1. <i>Commande séquentielle</i>	
D.6.2. <i>Commande continue bipolaire</i>	
D.6.3. <i>Commande continue unipolaire</i>	
D.6.4. <i>Conséquence du type de commande</i>	
D.6.5. <i>Puissance transmise en commande bipolaire</i>	



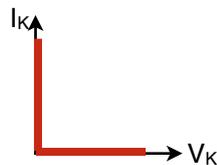
A. Préambule : diodes et transistors

L'électronique de puissance, qui distribue l'énergie électrique aux convertisseurs électromécaniques, est constituée de composants qui ont pour fonction de piloter le passage du courant : l'autoriser ou l'interdire. Ils agissent tels des interrupteurs.

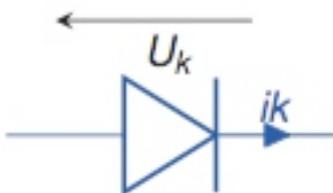
A.1. Interrupteur idéal



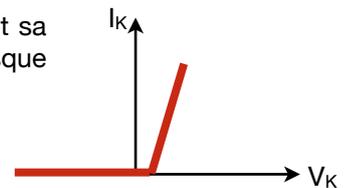
Sa relation caractéristique est la suivante :



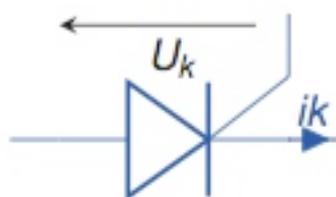
A.2. Diode



Une diode, caractérisée par sa résistance interne et sa tension de seuil, autorise le passage du courant lorsque la tension à ses bornes dépasse la valeur de seuil :



A.3. Thyristor



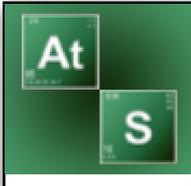
Le thyristor est un interrupteur commandable à l'amorçage. Cet amorçage est commandé sur la gâchette par la présence d'un «courant de gâchette».

Le thyristor reste alors fermé tant qu'une tension U_K existe.

Le désamorçage d'un thyristor a lieu :

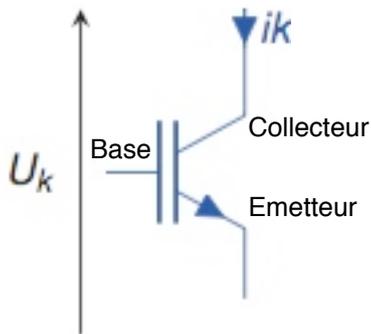
- soit par annulation du courant (extinction naturelle)
- soit par application d'une tension négative (extinction forcée)

Notes



A.4. Transistors

A.4.1. Transistor bipolaire

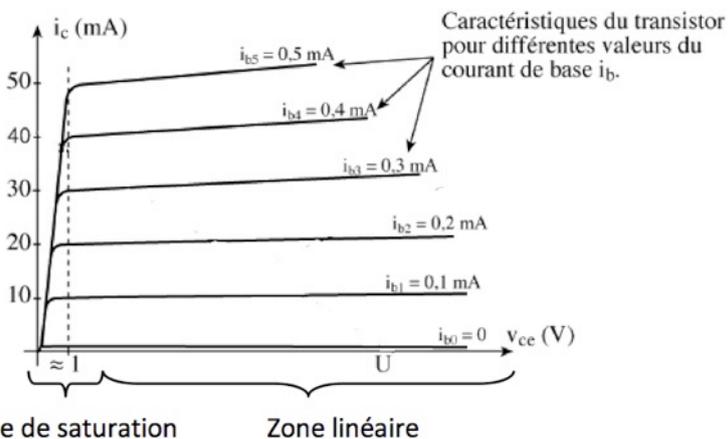


Le transistor bipolaire est quant à lui un interrupteur commandable à l'amorçage et au blocage.

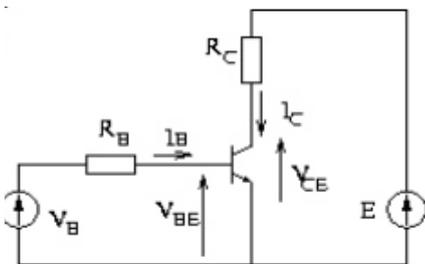
L'amorçage est obtenu en appliquant un courant dans la base du transistor.

En mode linéaire il agit comme un amplificateur de courant avec $i_K = i_C = \beta i_B$

En mode saturé, il agit comme un interrupteur commandé



Utilisation en commutation :

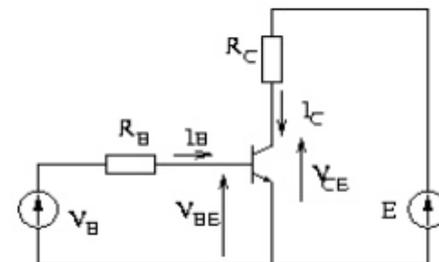


Lorsque $V_B = 0$, alors $V_{BE} = 0$: $I_B = 0$ et $i_C = \beta i_B = 0$

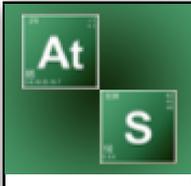
Lorsque $V_B > V_{seuil}$ alors $i_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B} \approx \frac{V_B}{R_B}$

Si R_B est suffisamment faible, alors I_B sature le

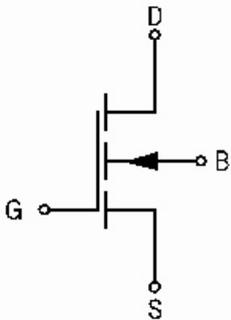
transistor et $I_C \approx \frac{E}{R_C}$



Notes



A.4.2. Transistor MOS ou MOSFET



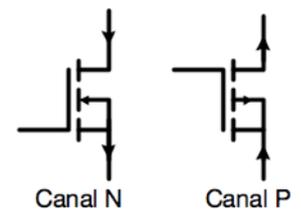
Le transistor MOS est également commandé à l'amorçage et au blocage par la tension V_{GS} :

- si $V_{GS} > V_{GSth}$ alors le transistor est passant (V_{GSth} désignant la tension de seuil). Il se comporte comme une résistance R_{DSon}
- $V_{GS} = 0$ alors le transistor est bloqué

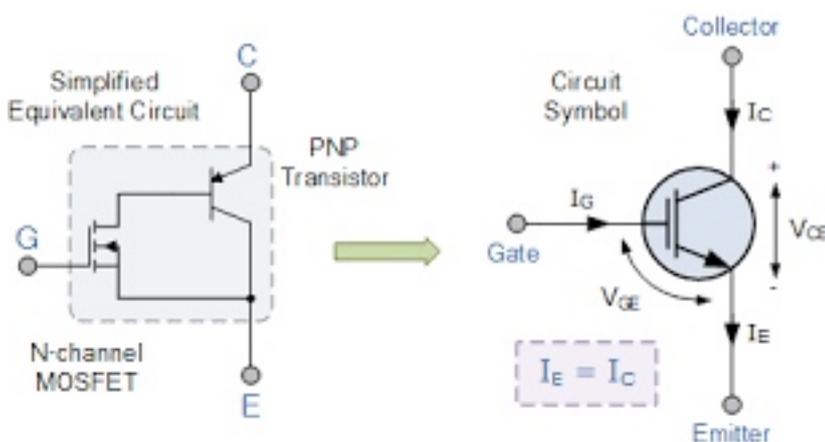
Un transistor MOS permet des commutations plus rapides qu'un transistor bipolaire, et peuvent donc être utilisés à des fréquences élevées.

En revanche, la résistance R_{DSon} augmente fortement avec la tension maximale du transistor ce qui limite son utilisation aux faibles tensions (400V maxi)

Les MOSFET se déclinent en «Canal N» (les plus courants) et les «Canal P». L'amorçage d'un MOSFET-N est obtenu par application d'une tension positive sur la grille, tandis l'amorçage d'un MOSFET-P demande une tension nulle.



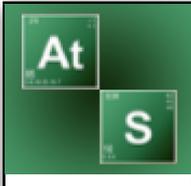
A.4.3. Le transistor bipolaire à grille isolée IGBT



Ce transistor combine les caractéristiques d'un transistor bipolaire et d'un transistor MOS.

Il est de ce fait de plus en plus utilisé en électronique de puissance

Notes



B. Cellule de commutation

B.1. Généralités

Un convertisseur statique a pour rôle d'adapter une source d'énergie à un récepteur. Son principe va être de successivement connecter et déconnecter par commutation contrôlée la charge à la source

Il est alors possible de convertir :

- une tension continue en :
 - ➔ tension continue : le **hacheur**
 - ➔ tension alternative : l'**onduleur**
- une tension alternative en :
 - ➔ tension continue : le **redresseur**
 - ➔ une tension alternative : le **gradateur**

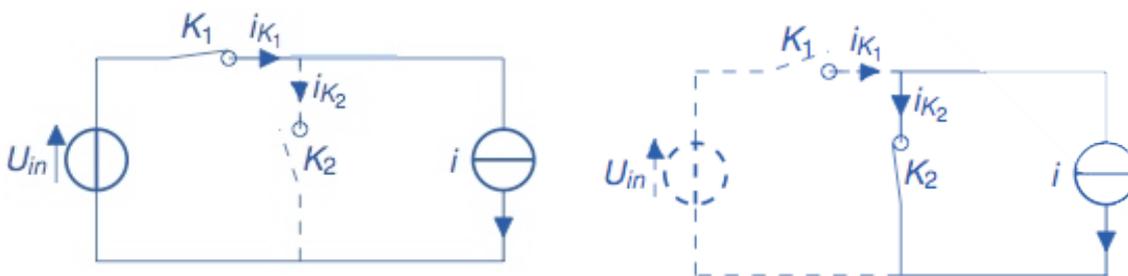
La charge de la sortie sera modélisée par une **source de courant**

B.1.1. Cellule de commutation

Deux interrupteurs sont nécessaires pour assurer le transfert d'énergie entre une source et une charge :

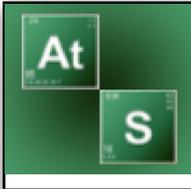
- Le premier pour connecter la source de tension et la source de courant qui modélise la charge
- Le second pour assurer le raccordement de la charge de courant

Ces deux interrupteurs sont nécessairement dans un état complémentaire : l'un est bloqué quand l'autre est passant

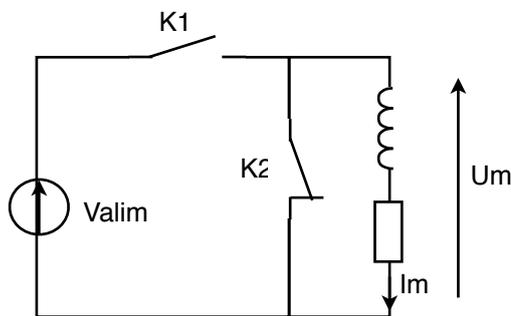


Cette structure, appelée cellule de commutation, est à la base de la construction de tout convertisseur statique.

Notes



B.1.2. Exemple

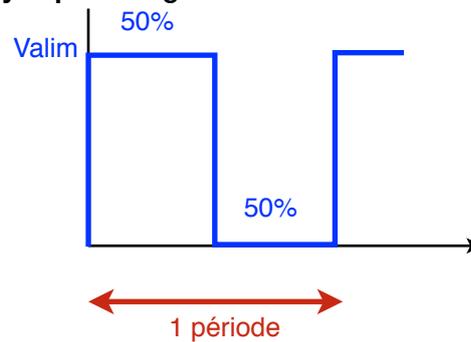


Connectons une source de tension au circuit RL ci-dessous, avec $V_{alim} = 100\text{ V}$, $R = 2\ \Omega$ et $L = 20\text{ mH}$

Une étude en régime transitoire montrerait rapidement que ce système est caractérisé par une constante de temps $\tau = \frac{L}{R} = 10\text{ ms}$

Les interrupteurs K1 et K2 sont ouverts et fermés de façon complémentaires, à une certaine fréquence

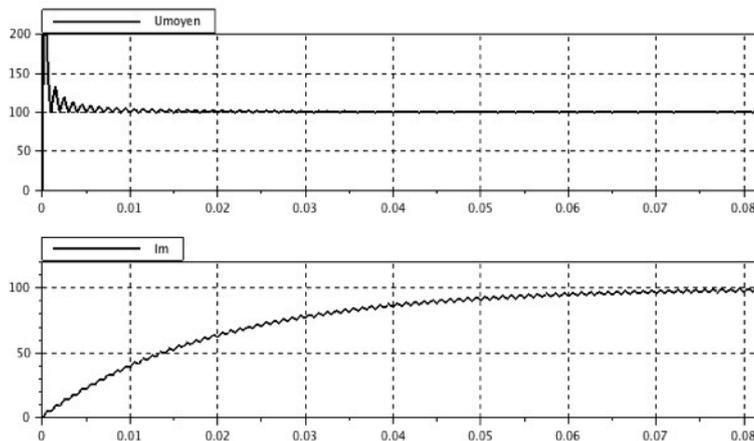
Chaque interrupteur sera ouvert et fermé pendant la même durée : le **rapport cyclique est égal à 50%** :



La fréquence de commutation est appelée **fréquence de découpage**.

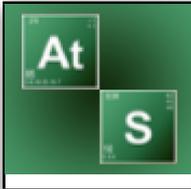
B.1.2.1. Influence du rapport cyclique

Pour une fréquence de 1kHz, on observe alors les valeurs suivantes de courant et de tension moyenne aux bornes du dipôle :

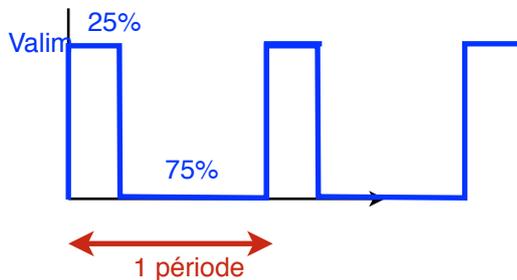


Le dipôle voit à des bornes une **tension moyenne de 100 V**, soit 50% de la tension d'alimentation.

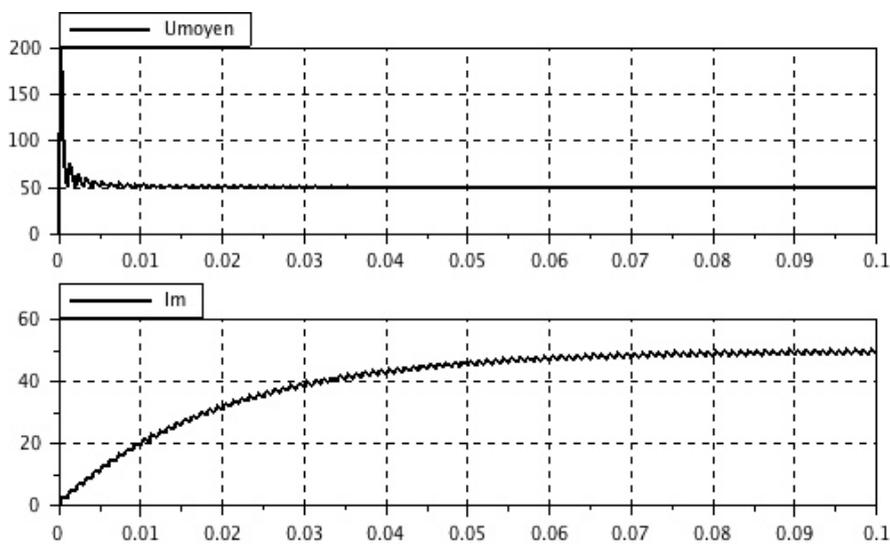
Notes



Appliquons maintenant un rapport cyclique de 25% :



On observe alors le courant et la tension moyenne suivantes :

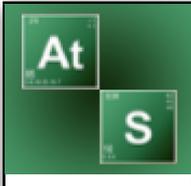


Le dipôle voit maintenant sa tension moyenne abaissée à 50 V, soit 25% de la tension d'alimentation.

Le rapport cyclique a donc une influence directe et, comme nous le verrons plus loin, proportionnelle sur la tension moyenne.

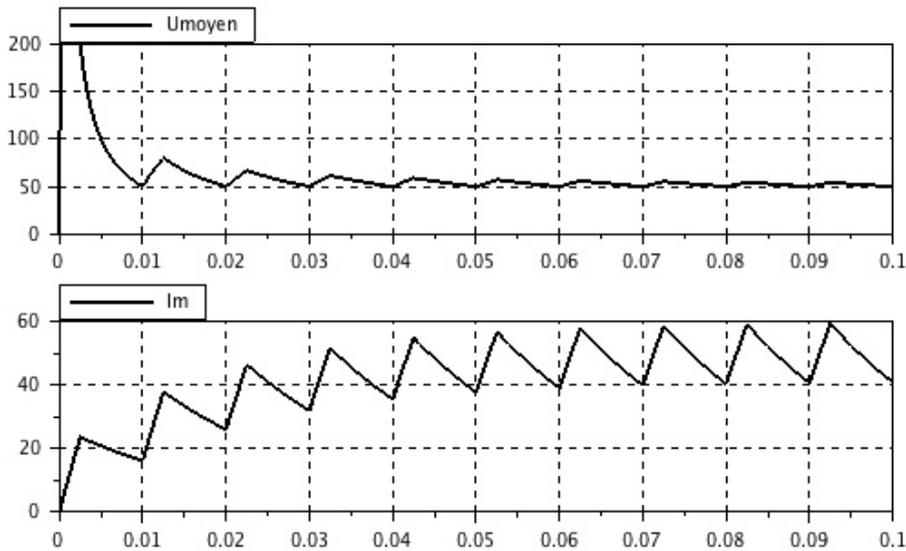
On parlera de **Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)** ou de **Pulse Width Modulation (PWM)**

Notes



B.1.2.2. Influence de la fréquence de découpage

Avec ce même rapport cyclique de 25%, appliquons maintenant une fréquence de 100 Hz.

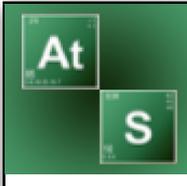


La tension moyenne reste identique, mais le signal est fortement dégradé.

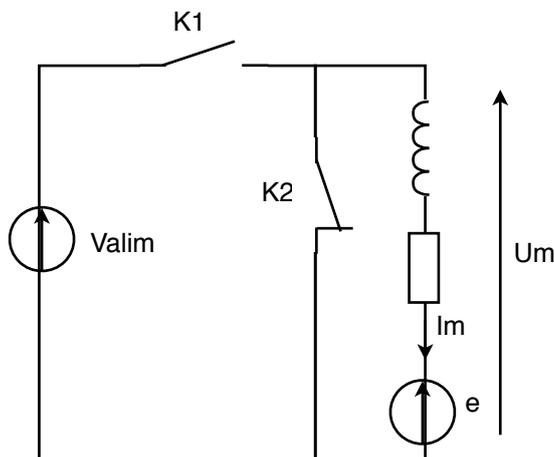
En effet, la période de découpage est maintenant du même ordre de grandeur que la constante de temps du système, et le régime transitoire devient influent.

La présence de l'inductance permet donc de lisser le signal, qui est en forme de créneau. Ce lissage est d'autant plus efficace que la fréquence de découpage est élevée.

Notes



C. Connexion à un moteur MCC

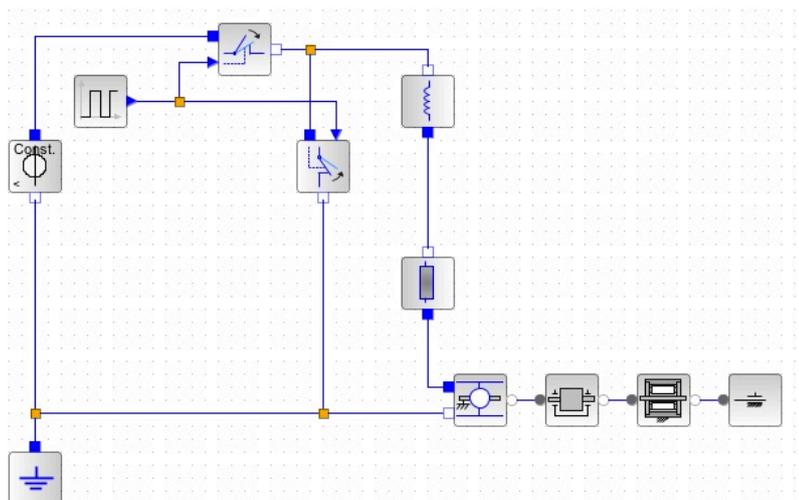


Le moteur à courant continu sera modélisé par une source de courant constituée :

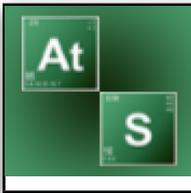
- de sa résistance d'induit R
- de son inductance L
- de sa fém e

Considérons un moteur caractérisé par :

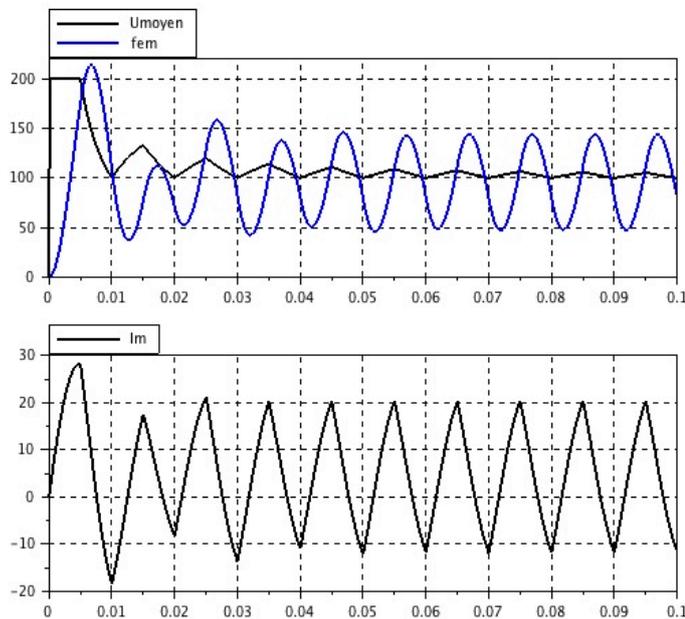
- sa résistance $R = 1 \Omega$
- son inductance $L = 20 \text{ mH}$
- sa constante $K = 0.15 \text{ V.rad}^{-1}.s$
- une inertie $J = 10^{-5} \text{ kg.m}^2$
- un frottement visqueux $f = 10^{-3} \text{ Nm.rad}^{-1}.s$



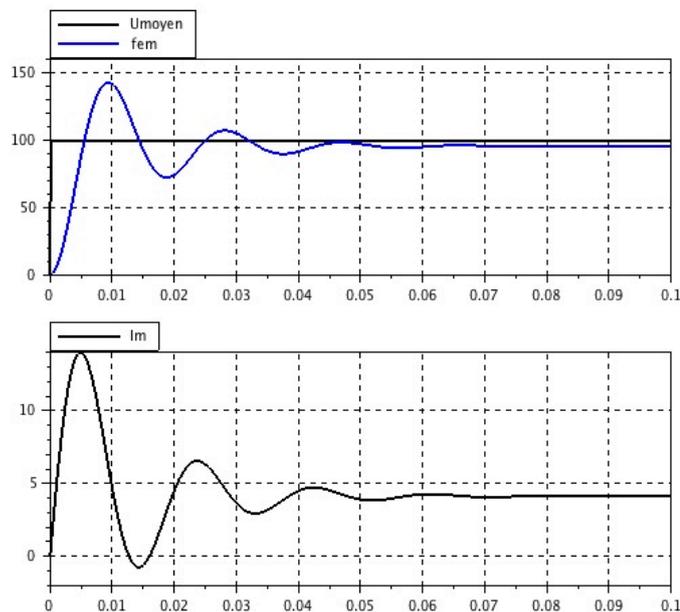
Notes



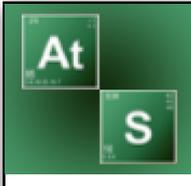
A une fréquence de découpage de 100 Hz, avec un rapport cyclique de 50%, le comportement du moteur est décrit par les courbes suivantes :



Si la fréquence de découpage est maintenant portée à 10 kHz, les courbes deviennent :



Notes



D. Hacheur

D.1. Composants constitutifs

Dans les schémas électriques précédents, le pilotage du moteur était effectué par l'intermédiaire de l'interrupteur K1, tandis que l'interrupteur K2 permettait de faire circuler l'énergie accumulée par le moteur lors que ce dernier n'est pas alimenté.

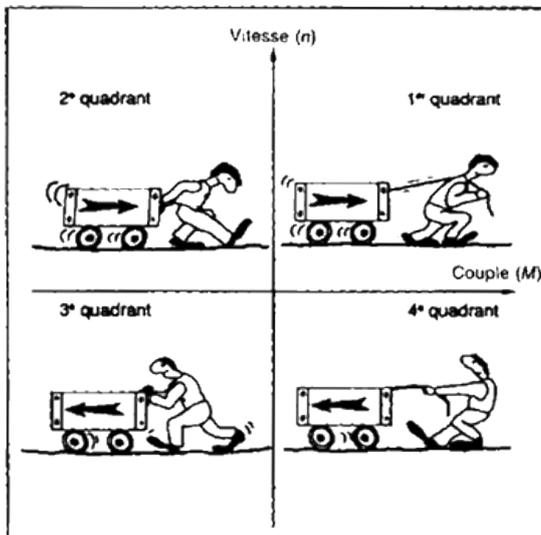
Le rôle de l'interrupteur commandé K1 sera rempli par un transistor. L'interrupteur K2 sera quant à lui réalisé par une diode.

D.1.1. Notion de quadrant de fonctionnement

En fonction des besoins de fonctionnement un moteur à courant devra pouvoir tourner dans un sens seulement, ou dans les deux sens.

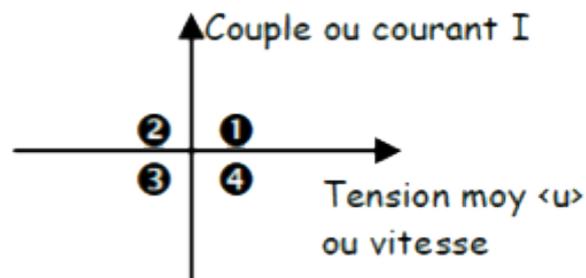
De même, il devra fournir uniquement un couple moteur, ou devra pouvoir fournir un couple résistant pour freiner la charge mécanique.

L'ensemble des 4 combinaisons possibles définit les 4 quadrants de fonctionnement possible d'un moteur :

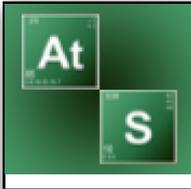


Les premier et troisième quadrants correspondent au cas où la puissance fournie est positive : couple et vitesse de rotation sont orientés dans le même sens. Le moteur entraîne la charge.

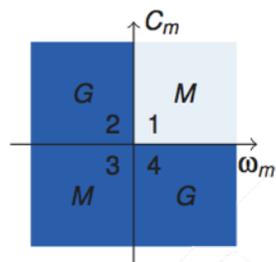
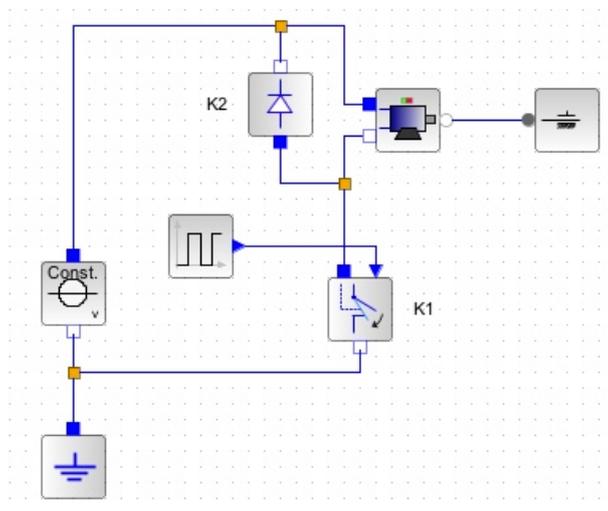
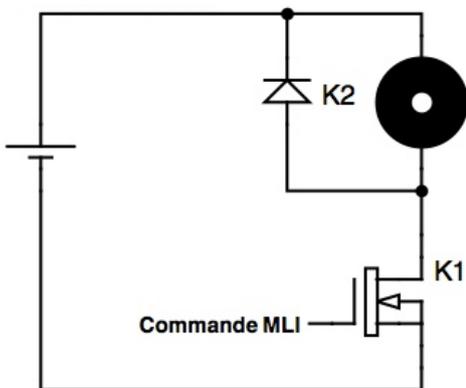
Les second et quatrième quadrants correspondent au cas où la puissance fournie est négative : couple et vitesse sont de sens différents. Le moteur freine la charge.



Notes



D.1.2. Hacheur série 1 quadrant

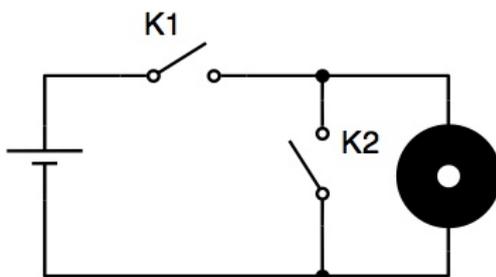


Un seul fonctionnement est possible dans ce montage. Aucune inversion ni de tension ni de courant n'est possible.

La vitesse est fonction du rapport cyclique α .

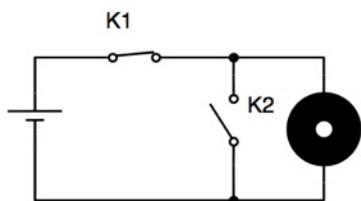
Ce hacheur est appelé hacheur série car l'interrupteur K1 est placé en série avec le moteur.

Son schéma d'étude équivalent, avec des interrupteurs, est le suivant :

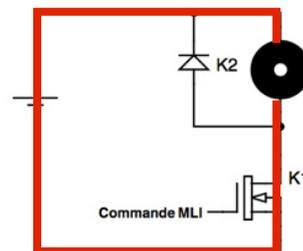


Notes

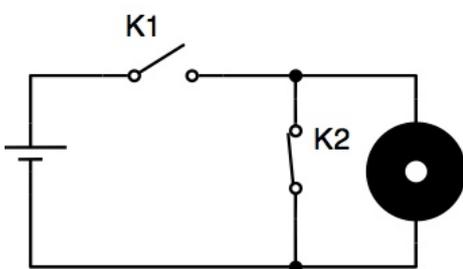
D.1.2.1. Phase motrice ($0 \leq t < \alpha T$)



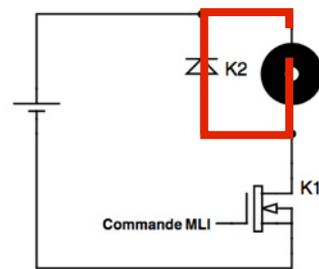
L'interrupteur K1 est fermé, K2 est ouvert.
La tension est appliquée aux bornes du moteur et courant circule dans le moteur en régime transitoire.



D.1.2.2. Phase de roue libre ($\alpha T \leq t < T$)



K1 s'ouvre. La chute brutale de courant induit une inversion de polarité aux bornes de l'inductance, qui se comporte alors en générateur de tension.
La tension aux bornes de la diode devient positive, et K2 se ferme, assurant ainsi la continuité du courant dans le moteur, et ainsi éviter les pics de tension liés à la discontinuité de courant.

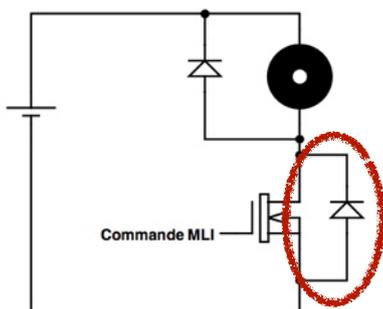


L'énergie accumulée dans le moteur se dissipe progressivement.

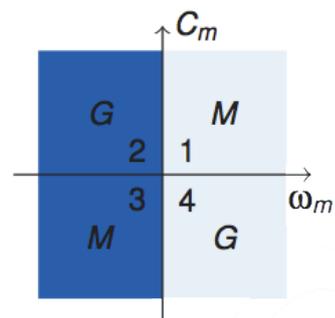
D.2. Hacheur 2 quadrants réversible en courant

Le hacheur précédent permet de faire fonctionner le convertisseur en mode moteur.

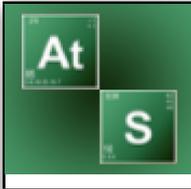
Mais lorsque le moteur à courant continu est entraîné par une charge mécanique, il fonctionne alors en génératrice. L'énergie mécanique qui l'entraîne est convertie en énergie électrique. Si on veut que cette énergie électrique produite soit récupérée, il faut alors lui assurer un passage dans le montage du hacheur afin de transférer le courant du moteur vers la batterie.



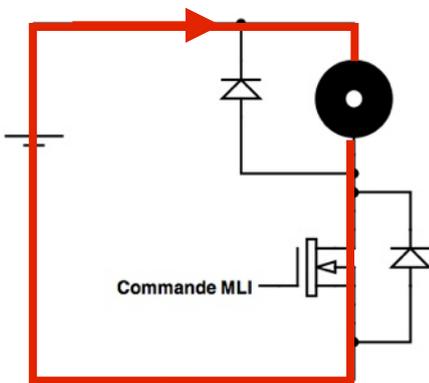
Ce transfert d'énergie est rendu possible par l'adjonction d'une diode en parallèle du transistor MOSFET représenté par K1.
Le hacheur devient alors un hacheur 2 quadrants



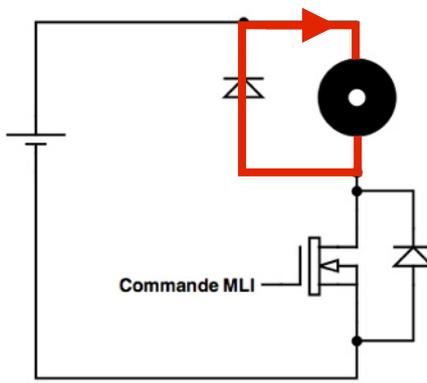
Notes



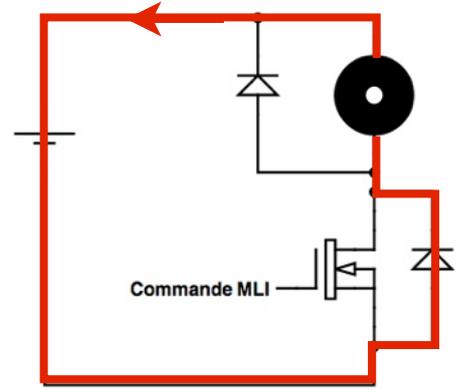
Dans chacune des trois phases (motrice, roue libre, génératrice), un seul des 3 interrupteurs est fermé à la fois :



Phase motrice



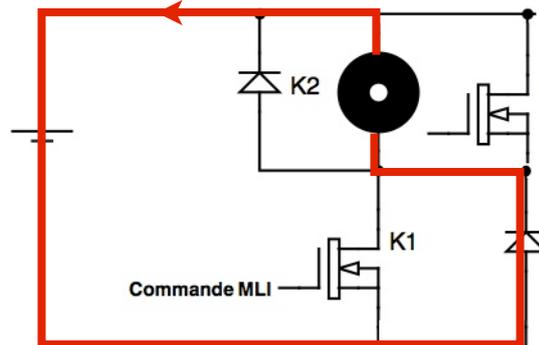
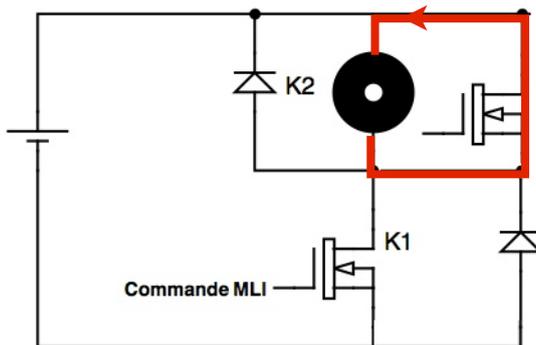
Phase de roue libre



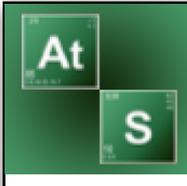
Phase génératrice

Le hacheur ci-dessus est donc réversible en courant. Toutefois, la diode dite **de récupération** en parallèle du transistor ne permet pas la variation de vitesse en mode génératrice.

Il est possible de remplacer cette diode par un second transistor qui sera piloté en commutation :

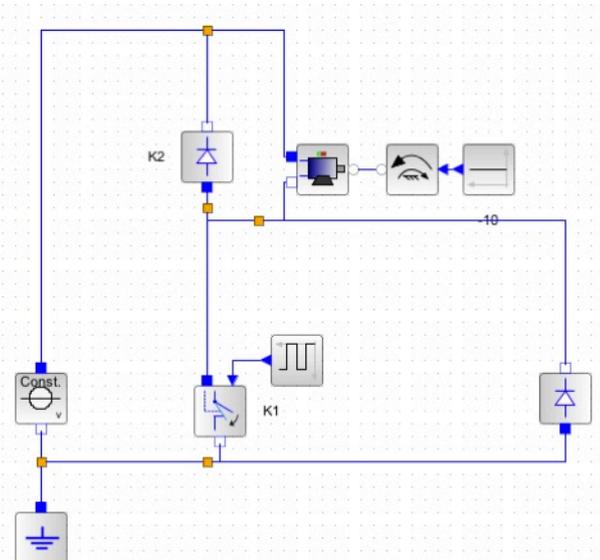


Notes

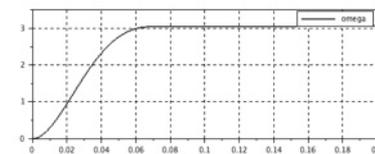
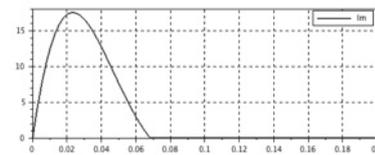


Simulation du comportement

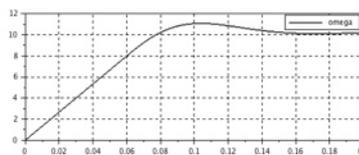
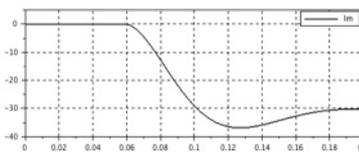
Hacheur 2 quadrants avec diode de récupération :



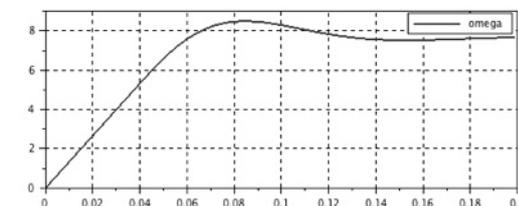
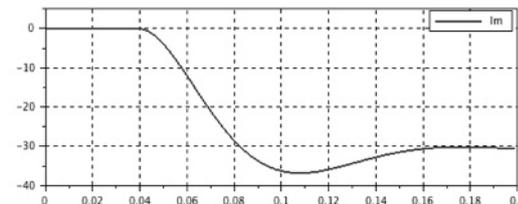
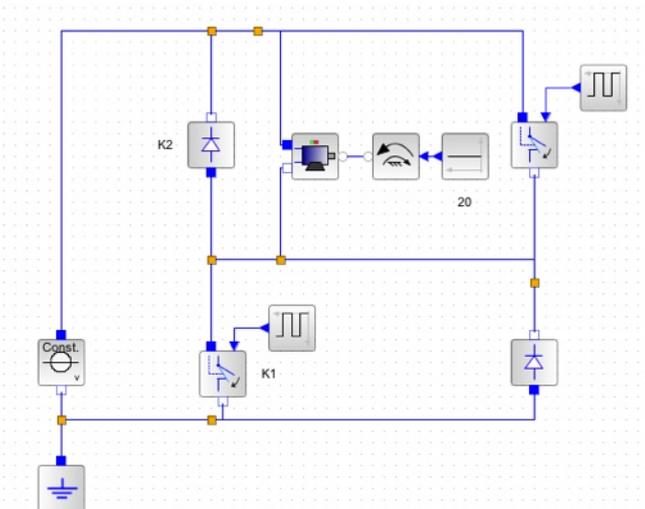
En mode moteur avec MLI :



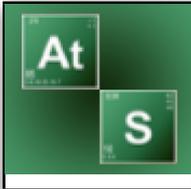
En mode génératrice :



Hacheur 2 quadrants avec MLI sur le mode génératrice :

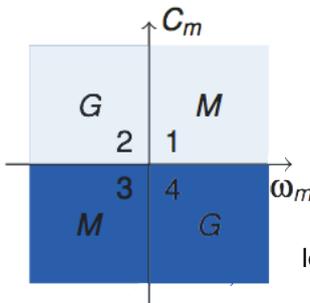


Notes



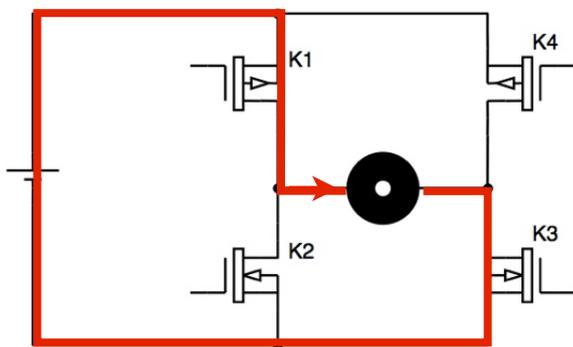
D.3. Hacheur 2 quadrants réversible en tension (Pont en H)

D.3.1. Principe de fonctionnement

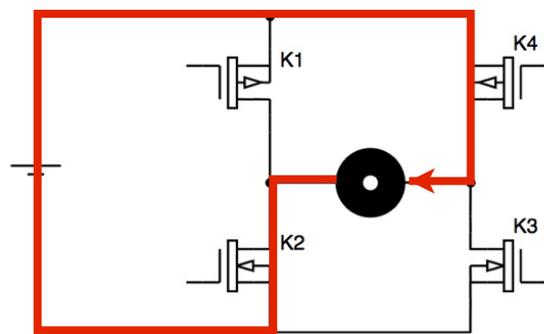


Le hacheur 2 quadrants précédent était réversible en courant, mais pas en tension.

Constitué de 4 transistors, le pont en H permet de rendre le fonctionnement réversible en tension. Il a pour principe d'inverser la tension aux bornes du moteur, en commutant les transistors sur une diagonale du pont.

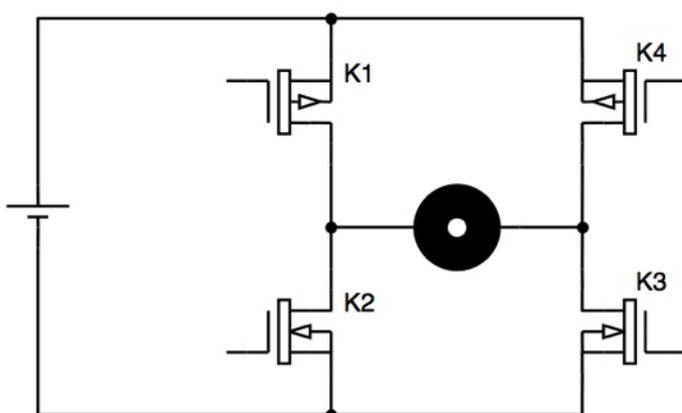


Commutation des interrupteurs K1 et K3



Commutation des interrupteurs K2 et K4

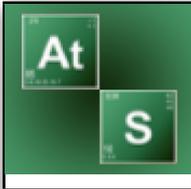
D.3.2. Pilotage des transistors



On remarquera que K1 et K4 sont des transistors MOS à canal P : ils seront passants lorsque la tension appliquée sur leur grille est nulle (en réalité inférieure à V_{DStH})

Inversement, K2 et K3 sont des transistors MOS à canal N : ils seront passants lorsque la tension sur leur grille sera positive (en réalité supérieure à V_{DStH})

Notes

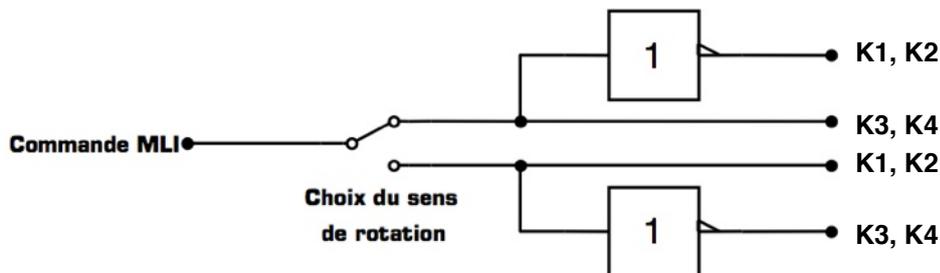


Par conséquent, pour commuter K1 et K3 il faudra fournir une tension :

- nulle sur K1 et K2
- positive sur K3 et K4

Inversement, pour inverser le sens de rotation et donc commuter K2 et K4, il faudra fournir une tension :

- positive sur K1 et K2
- nulle sur K3 et K4



D.3.3. Remarque importante

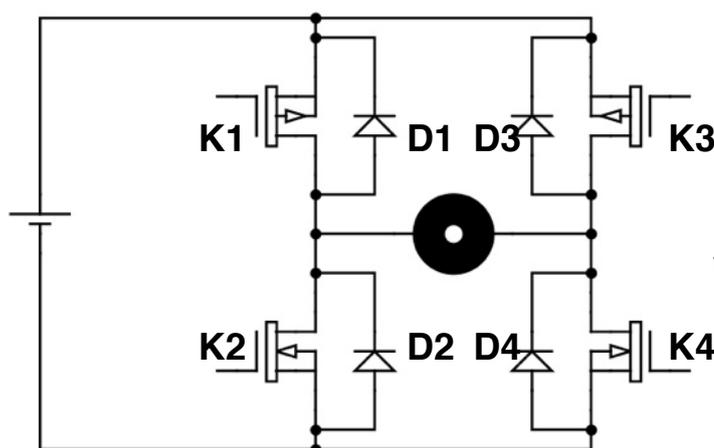
Dans le pont en H, le moteur est alimenté avec une tension qui peut être aussi bien positive que négative (en sens 2).

Par conséquent, il est **impossible de placer une diode de roue libre** permanente en dérivation du moteur dans le cas du pont en H.

Le pont en H de base ne peut alors pas assurer la continuité du courant dans le moteur, ce qui implique à chaque commutation des pics de tension aux bornes du moteur.

D.4. Hacheur 4 quadrants

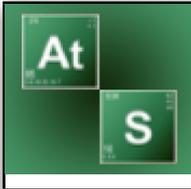
Le hacheur 4 quadrants permet de faire fonctionner le moteur dans les 4 quadrants possibles : il est possible de le faire fonctionner aussi bien en moteur qu'en génératrice, et ce dans les sens de rotation.



Le hacheur 4 quadrants est un pont en H auquel on a rajouté en parallèle de chaque transistor une diode qui permet d'assurer la réversibilité en courant /

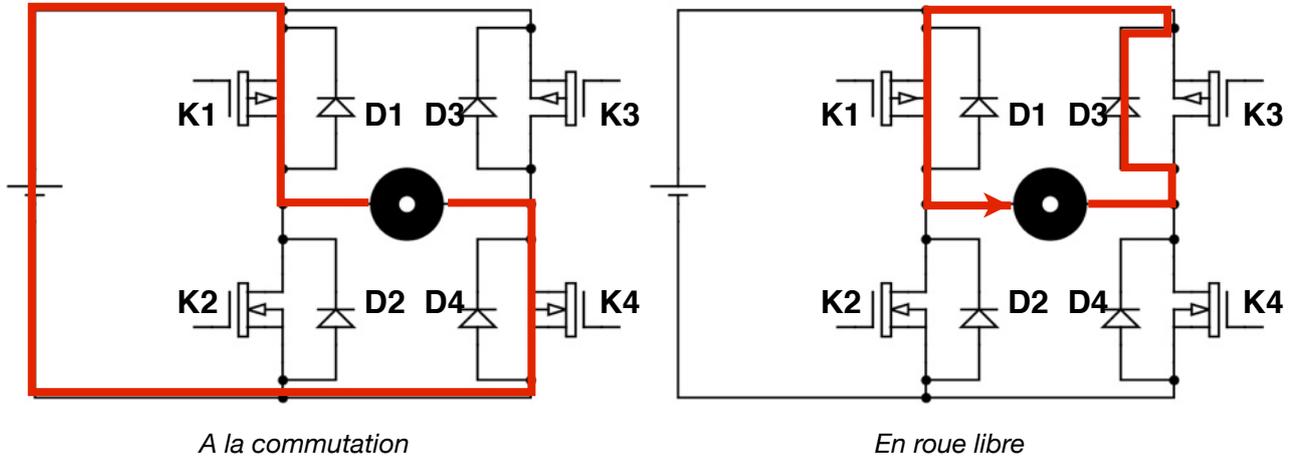
Il existe plusieurs stratégies de commande des transistors.

Notes

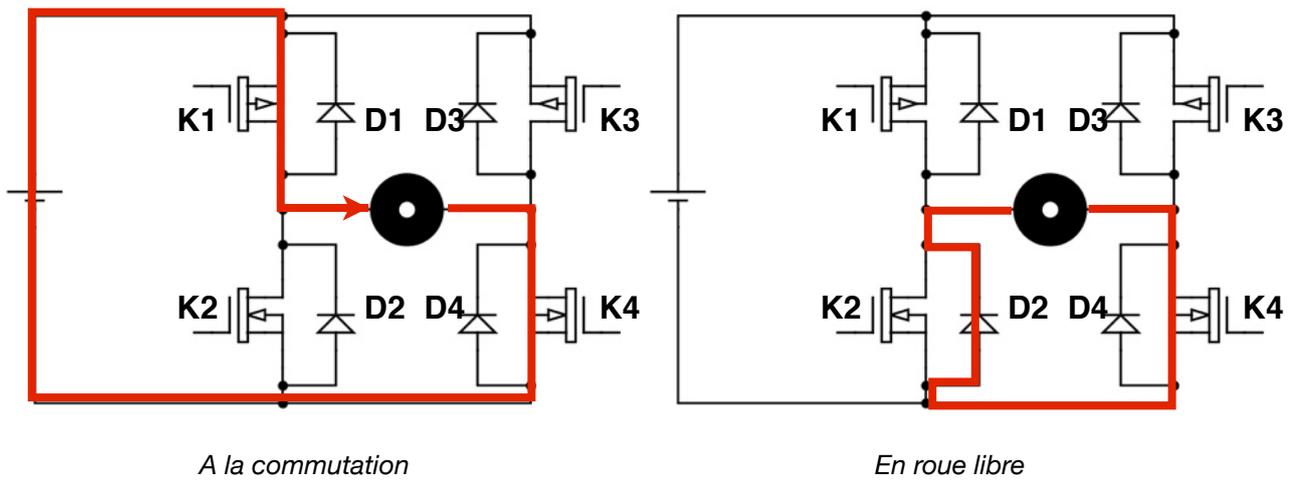


D.4.1. Fonctionnement dans le premier quadrant : moteur, sens positif

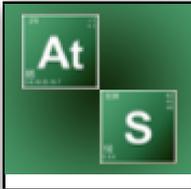
D.4.1.1. Première stratégie : K1 est toujours passant



D.4.1.2. Seconde stratégie : K4 est toujours passant

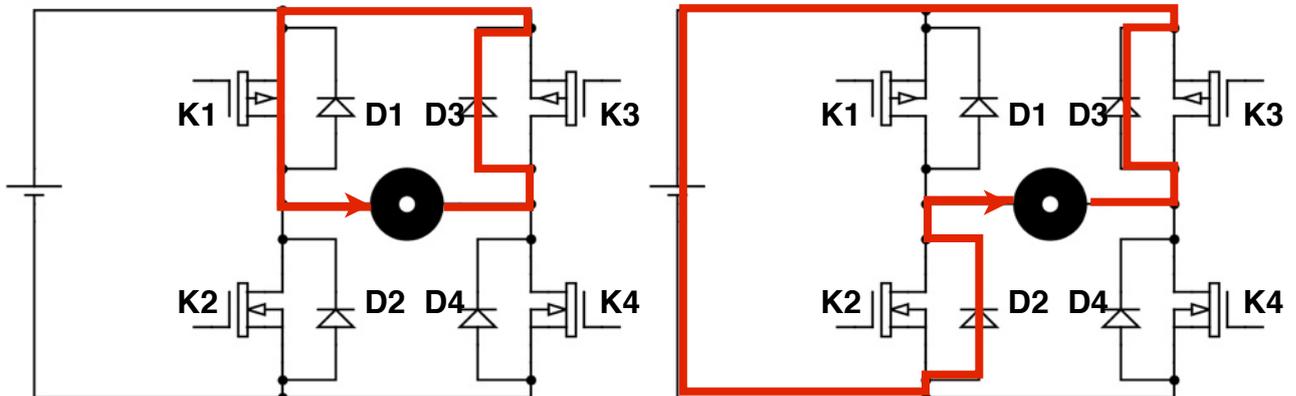


Notes



D.4.2. Fonctionnement dans le second quadrant : génératrice, sens négatif

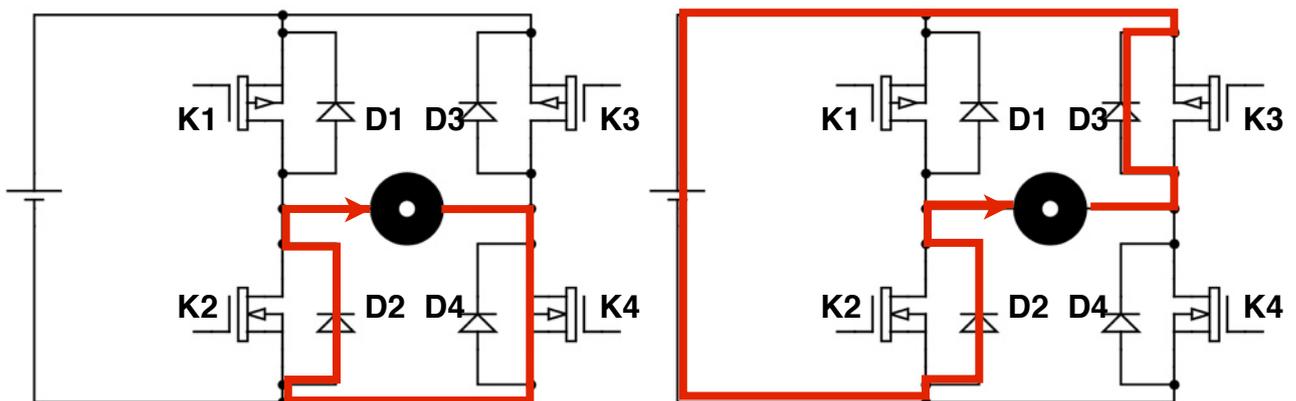
D.4.2.1. Première stratégie : K1 est piloté en MLI



A la commutation

En roue libre

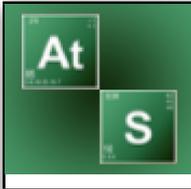
D.4.2.2. Seconde stratégie : K4 est piloté en MLI



A la commutation

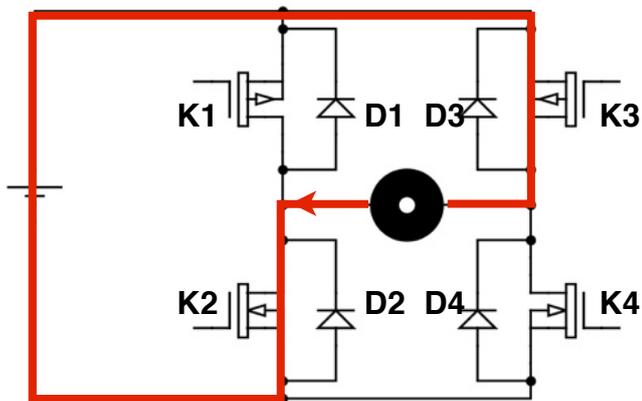
En roue libre

Notes

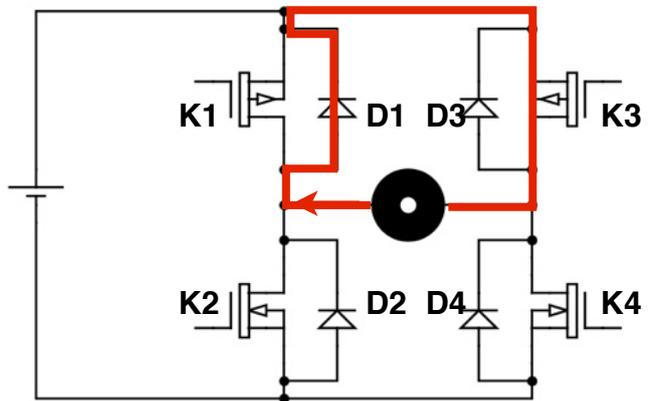


D.4.3. Fonctionnement dans le troisième quadrant : moteur, sens négatif

D.4.3.1. Première stratégie : K3 est toujours passant

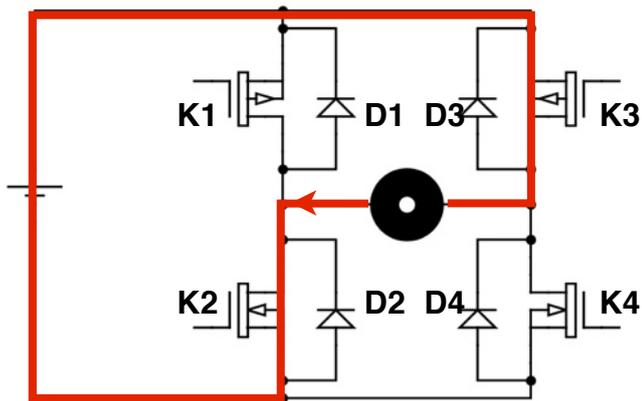


A la commutation

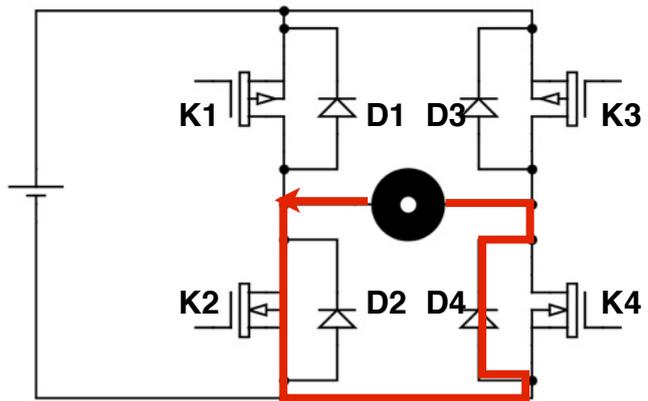


En roue libre

D.4.3.2. Seconde stratégie : K2 est toujours passant

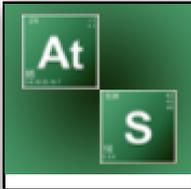


A la commutation



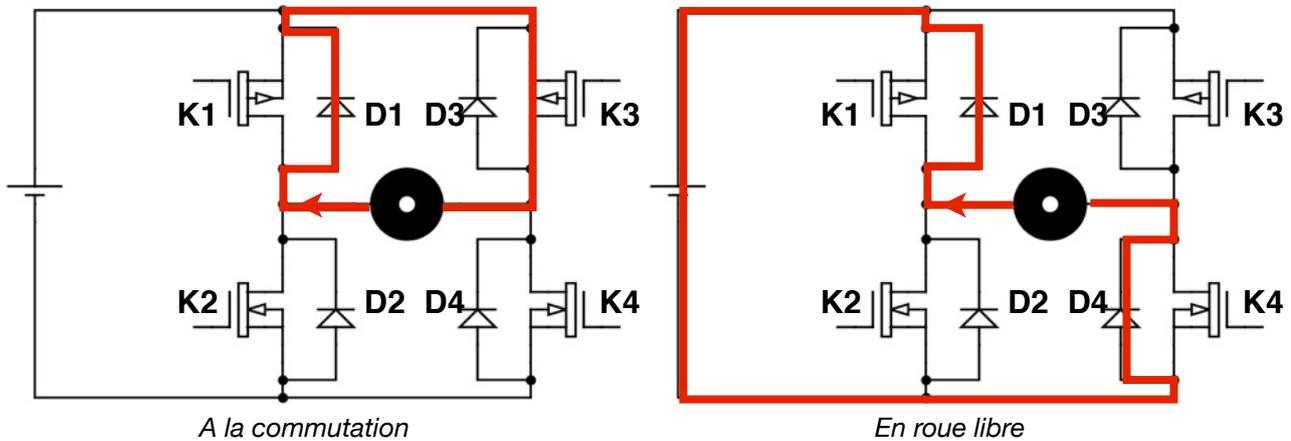
En roue libre

Notes



D.4.4. Fonctionnement dans le quatrième quadrant : génératrice, sens positif

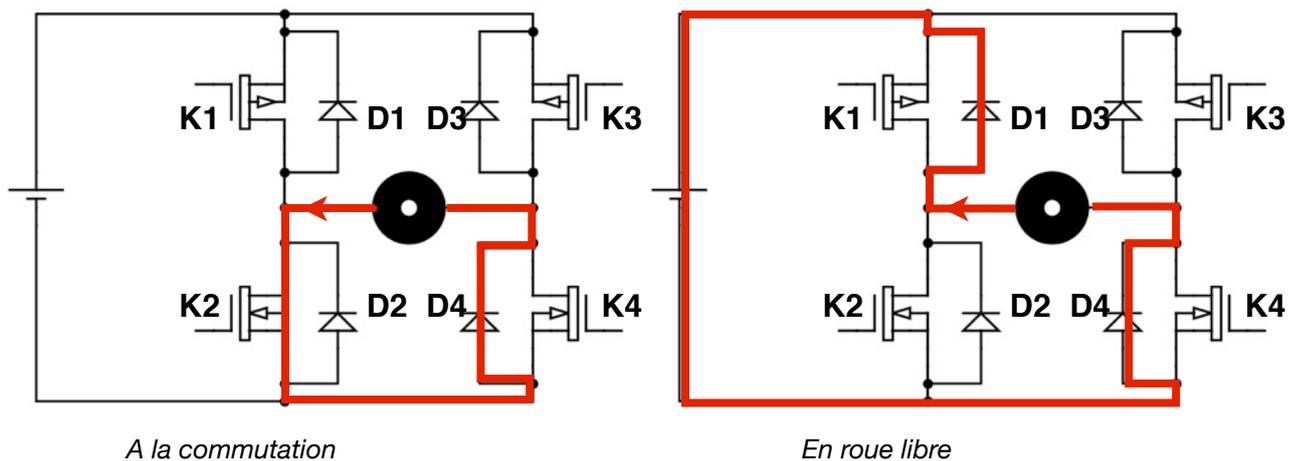
D.4.4.1. Première stratégie : K3 est piloté en MLI



A la commutation

En roue libre

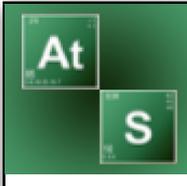
D.4.4.2. Seconde stratégie : K2 est piloté en MLI



A la commutation

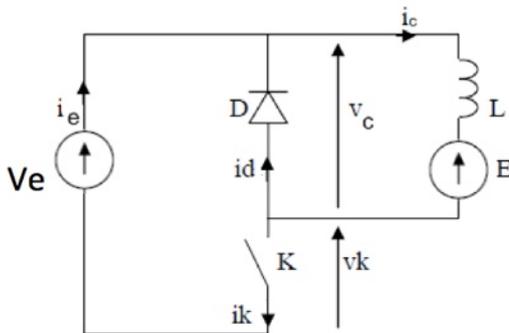
En roue libre

Notes



D.5. Forme des signaux

D.5.1. Modèle d'étude



Nous allons dans la suite négliger la résistance d'induit du moteur, afin de simplifier l'étude.

Une inductance est parfois ajoutée en série au moteur afin de contribuer au lissage des signaux. Dans un tel cas, les valeurs des deux inductances (induit et lissage) s'ajoutent.

D.5.2. Tension moyenne aux bornes du moteur

La loi des mailles nous permet d'écrire :

$$V_C = E + L \frac{di}{dt}$$

D'où l'expression de la tension moyenne $\langle V_C \rangle$:

$$\langle V_C \rangle = E + \int_0^T L \frac{di}{dt} dt = E \text{ car } i(t) \text{ est sinusoïdale}$$

La valeur de la fém est donc exactement égale à tension moyenne aux bornes moteur. Cette tension moyenne va donc directement pouvoir piloter la vitesse de rotation du moteur.

Le rapport cyclique impose donc directement la vitesse de rotation du moteur

D.5.3. Evolution des signaux

D.5.3.1. Pour $0 \leq t < \alpha T$

Le courant à $t=0$ vaut $i(0) = I_{\min}$

K est fermé, et la diode D est bloquée car $V_D = -V_E < 0$

On écrit alors que

$$V_E = V_C = L \frac{di}{dt} + E$$

Notes

	CI3 : Chaînes d'énergie	
	DISTRIBUTION DC/DC : LE HACHEUR	COURS
	<i>Hacheur</i>	Edition 5 - 05/10/2018

Soit
$$i(t) = \frac{V_E - E}{L}t + I_{\min}$$

Le courant est maximal à $t = \alpha T$, et vaut
$$I_{\max} = \frac{V_E - E}{L}\alpha T + I_{\min}$$

D.5.3.2. Pour $\alpha T \leq t < T$

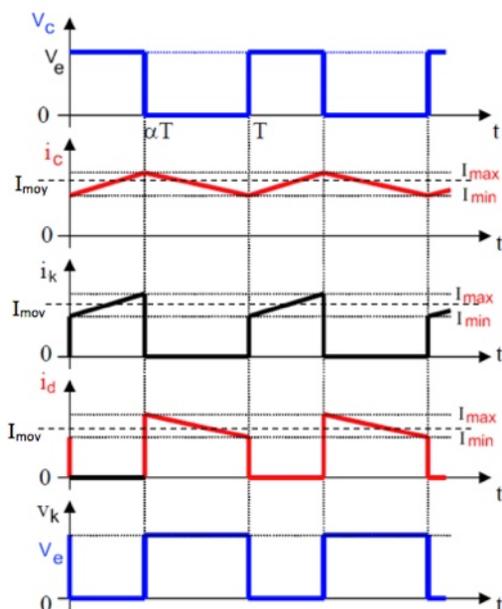
K est ouvert, et la diode D devient passante, permettant ainsi de dissiper l'énergie accumulée dans l'inductance.

La loi des mailles permet d'écrire :

$$V_C = 0 = L \frac{di}{dt} + E$$

On en déduit immédiatement :
$$i(t) = \frac{-E}{L}(t - \alpha T) + I_{\max}$$

D.5.4. Formes des signaux



On montre aisément que la tension moyenne s'écrit :

$$\langle V_C \rangle = \frac{1}{T}(\alpha T V_E + 0) = \alpha V_E$$

et donc $E = \alpha V_E$

L'ondulation du courant est définie par :

$$\Delta i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} = \frac{\alpha(1 - \alpha)}{2L} ET$$

Le courant moteur n'est donc pas lissé, et va être à l'origine d'harmoniques de courant.

Ces harmoniques de courant vont se retrouver dans le circuit magnétique du moteur et provoquer des échauffements, qui peuvent entraîner une diminution de la durée de vie du moteur.

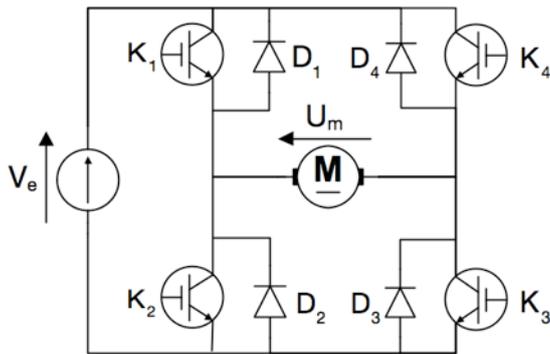
Il est donc important de réduire Δi à des niveaux raisonnables. Les solutions envisageables sont :

- l'augmentation de la fréquence de découpage (dépend du composant utilisé : quelques 100 kHz pour un MOS, 1kHz pour un thyristor)
- l'ajout d'une inductance de lissage en série avec le moteur.

Notes

D.6. Commande séquentielle, unipolaire, bipolaire d'un hacheur 4 quadrants

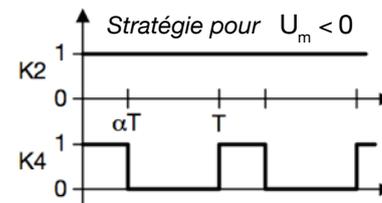
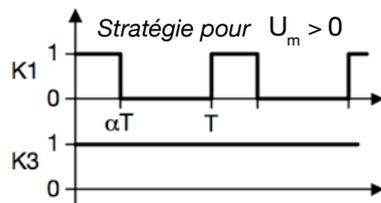
D.6.1. Commande séquentielle



Les stratégies de pilotage des transistors vues dans les paragraphes précédents sont basées sur le maintien permanent dans l'état passant d'un transistor.

Ainsi, pour obtenir $U_m > 0$, on peut choisir de :

- maintenir K1 passant et de commuter K3 de façon cyclique,
 - ou maintenir K3 passant et de commuter K1 de façon cyclique
- Inversement, pour obtenir $U_m < 0$, on peut choisir de :
- maintenir K4 passant et de commuter K2 de façon cyclique,
 - ou maintenir K2 passant et de commuter K4 de façon cyclique



Cette stratégie de pilotage est dite **séquentielle**. Le couple de transistor mis en oeuvre dépend du signe souhaité aux bornes du moteur.

La tension moyenne aux bornes du moteur est égale à :

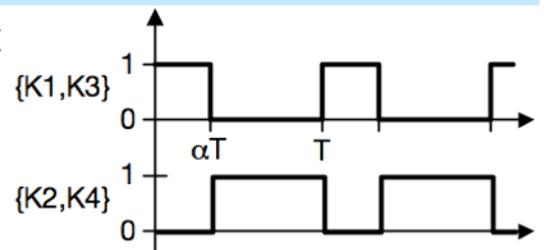
- $U_m = \alpha V_e$ pour les transistors {K1,K3}
- $U_m = -\alpha V_e$ pour les transistors {K2,K4}

D.6.2. Commande continue bipolaire

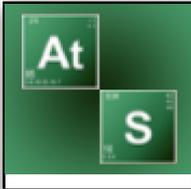
Une autre stratégie de pilotage des transistors consiste à commander alternativement les couples {K1,K3} et {K2,K4} du hacheur 4 quadrants :

- Pour $0 \leq t < \alpha T$: commande des transistors {K1,K3}
- Pour $\alpha T \leq t < T$: commande des transistors {K2,K4}

On parlera ici de **commande bipolaire**.



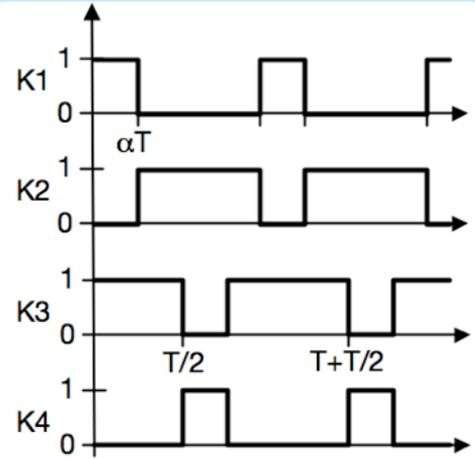
Notes



D.6.3. Commande continue unipolaire

Dérivée de la commande bipolaire, la **commande unipolaire** commande les bras {K1,K2} et {K3,K4} alternativement, mais avec un décalage d'une demi-période :

- Pour $0 \leq t < \alpha T$: commande complémentaire du bras {K1,K2}
- Pour $\alpha T + T/2 \leq t < T + T/2$: commande complémentaire du bras {K2,K4}



D.6.4. Conséquence du type de commande

Selon la commande mise en place, l'allure de la tension aux bornes du moteur et du courant sont représentés ci-dessous :

Commande séquentielle	Commande bipolaire	Commande unipolaire

La commande bipolaire est la plus simple à mettre en oeuvre; En effet, avec cette stratégie, il est possible d'obtenir $-V_e \leq U_m \leq V_e$ pour $0 \leq \alpha \leq 1$. La valeur particulière $U_m = 0$ correspond à un rapport cyclique $\alpha = 0,5$. En revanche, elle génère une ondulation de courant importante.

L'ondulation du courant sera réduite en adoptant une commande unipolaire ou séquentielle, ou en ajoutant une inductance de lissage.

La commande séquentielle génère un minimum de commutations de transistor.

Notes

	CI3 : Chaînes d'énergie	
	DISTRIBUTION DC/DC : LE HACHEUR	COURS
	<i>Hacheur</i>	Edition 5 - 05/10/2018

D.6.5. Puissance transmise en commande bipolaire

Dans le cas d'un hacheur 4 quadrants dont la stratégie de pilotage est la commande bipolaire, les interrupteurs {K1,K3} commutent de façon complémentaire avec les interrupteurs {K2,K3}.

La tension aux bornes de la charge est alors :

$$\langle V_c \rangle = \alpha V_e - (1 - \alpha) V_e = (2\alpha - 1) V_e$$

L'ondulation du courant a pour expression :

$$\Delta I_c = \frac{2\alpha(1-\alpha)}{L} E T$$

La puissance moyenne transférée à la charge est déterminée par :

$$\langle p_c \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} V_e \cdot i(t) dt - \int_{\alpha T}^T V_e \cdot i(t) dt \right] = \frac{E}{T} \left[\alpha T I_{\text{moy}} - (1 - \alpha T) I_{\text{moy}} \right]$$

$$\langle p_c \rangle = (2\alpha - 1) E I_{\text{moy}}$$

On reconnaît dans cette expression qu'en fonction de la valeur du rapport cyclique, la puissance peut être positive ou négative, traduisant l'inversion du sens de transfert de l'énergie.

Notes