

# CORRECTION

Section : <b>S</b>	Option : <b>Sciences de l'ingénieur</b>	Discipline : <b>Génie Électrique</b>	
<b>Les hacheurs</b>			
Domaine d'application : <b>Contrôle de l'énergie</b>	Type de document : <b>Cours</b>	Version : <b>201201</b>	Date :

## I - Principe du hachage de la tension

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

### I - 1 - Qu'est-ce que le MLI ?

Examinons les caractéristiques d'un signal rectangulaire de valeur minimale 0 V :

Temps haut :  $t_H$

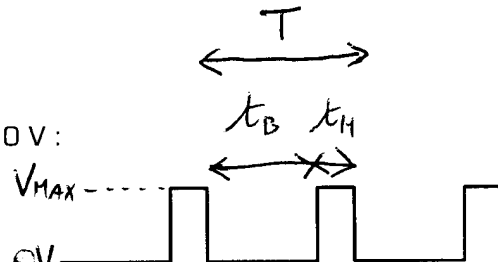
Temps bas :  $t_B$

Période :  $T = t_H + t_B$

Valeur maximale :  $V_{MAX}$

Rapport cyclique :  $\alpha = \frac{t_H}{T}$

Valeur moyenne :  $V_{MOY} = \alpha \cdot V_{MAX}$



On en déduit que la **valeur moyenne** d'un signal rectangulaire est proportionnelle à son **rapport cyclique**.

Le principe consistant à modifier le rapport cyclique d'un signal rectangulaire afin de créer une tension moyenne variable est appelé la **Modulation de Largeur d'Impulsion**, soit **M.L.I.** en abrégé (**Pulse Width Modulation** en anglais, soit **P.W.M.** en abrégé).

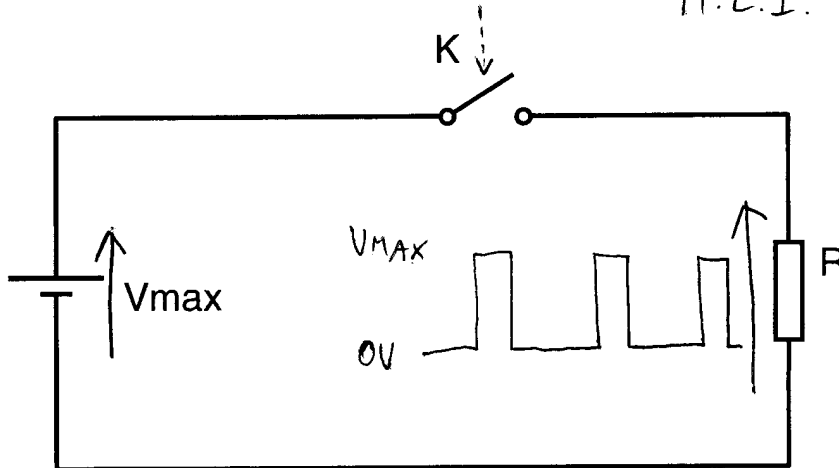


### I - 2 - Le montage hacheur de base

Le montage ci-contre est composé d'une batterie fournissant une tension  $V_{max}$ , une charge  $R$  et un interrupteur commandé  $K$ .

On commande l'interrupteur  $K$  par un signal MLI, c'est-à-dire un signal à rapport cyclique variable. La tension aux bornes de la charge  $R$  est alors « **hachée** », et non continue.

Si la fréquence de hachage est suffisamment élevée, la charge  $R$  se comportera comme si elle était alimentée avec une tension continue de valeur égale à la **valeur moyenne** de la tension hachée.



Examinons la valeur moyenne de la tension aux bornes de  $R$  pour 3 rapports cycliques différents du signal M.L.I. :

Premier cas :

Temps haut :  $t_H = 10 \mu s$

Rapport cyclique :  $1/4 = 25\%$

Temps bas :  $t_B = 30 \mu s$

Valeur moyenne :  $0,25 \cdot V_{MAX}$

Second cas :

Temps haut :  $t_H = 20 \mu s$

Rapport cyclique :  $1/2 = 50\%$

Temps bas :  $t_B = 20 \mu s$

Valeur moyenne :  $0,5 \cdot V_{MAX}$

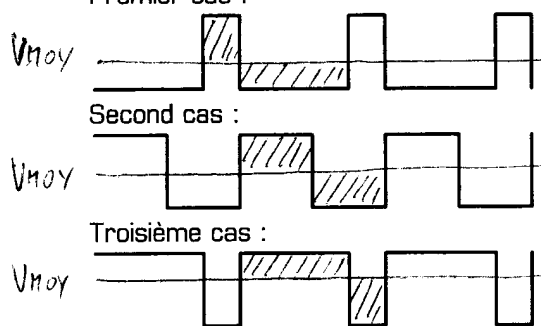
Troisième cas :

Temps haut :  $t_H = 30 \mu s$

Rapport cyclique :  $3/4 = 75\%$

Temps bas :  $t_B = 10 \mu s$

Valeur moyenne :  $0,75 \cdot V_{MAX}$



Ce montage est appelé un « **hacheur à M.L.I.** ». *Hacheur* car la tension reçue par la charge  $R$  est hachée (et non parfaitement continue). Et *à M.L.I.* car pour faire varier la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge il faut modifier le rapport cyclique du signal de commande de l'interrupteur  $K$  : on dit que  $K$  est commandé par M.L.I.

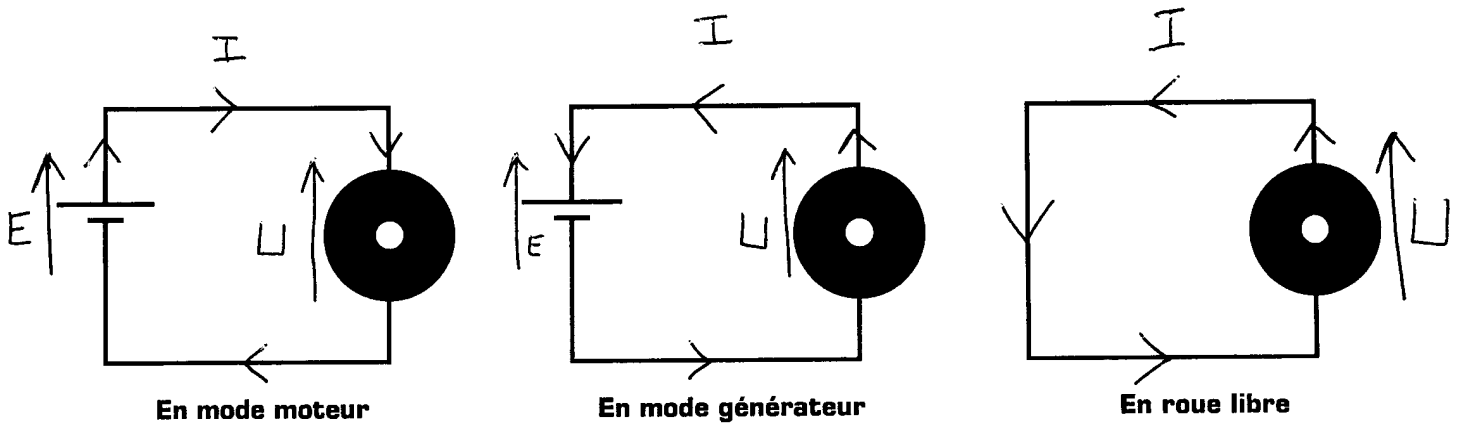
## II - Quadrants de fonctionnement d'un moteur

### II - 1 - Les 2 modes de fonctionnement du moteur à courant continu

Un moteur à courant continu est un convertisseur réversible pouvant fonctionner dans les 2 modes suivants :

- \* En **mode moteur** il convertit l'énergie électrique reçue en énergie mécanique
- \* En **mode générateur** il convertit l'énergie mécanique reçue en énergie électrique [comme une dynamo]

De plus lorsque l'alimentation électrique du moteur est coupée brutalement, la circulation du courant dans le moteur doit être si possible assurée pour éviter toute discontinuité du courant : on parle alors de **roue libre**.



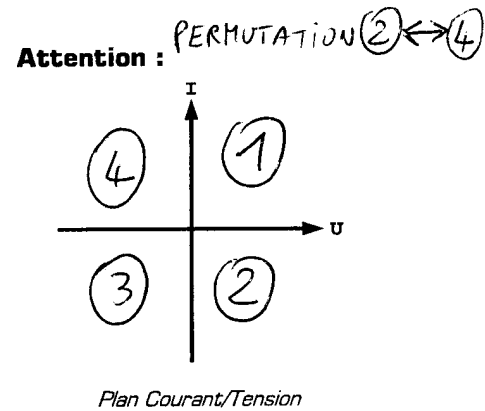
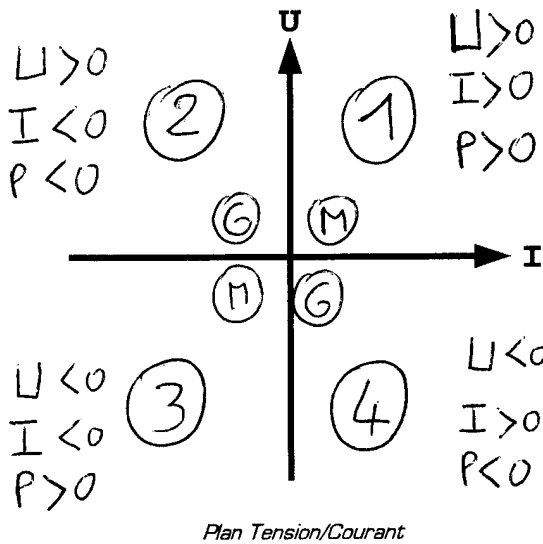
En mode moteur (ou **phase motrice**) l'énergie électrique est transférée **de la batterie vers le moteur** : la batterie se comporte en **générateur** [elle se décharge] et le moteur se comporte en **récepteur**.

En mode générateur (ou **phase génératrice**) l'énergie électrique est transférée **du moteur vers la batterie** : le moteur se comporte en **générateur** et la batterie se comporte en **récepteur** [elle se charge].

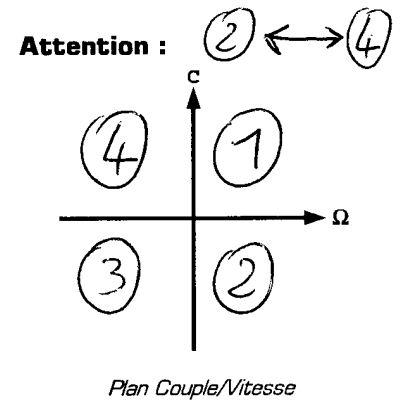
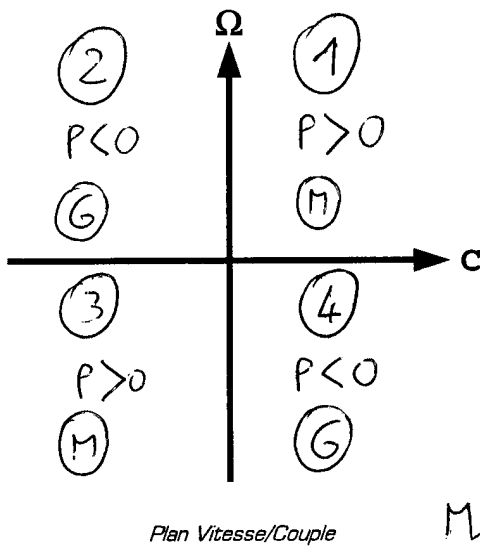
En phase de **roue libre** l'alimentation est totalement déconnectée : le seul but de la phase de roue libre (qui est extrêmement brève) est d'assurer **la continuité du courant** dans le moteur à l'instant de la déconnexion de l'alimentation, et ainsi éviter des pics de surtension qui risqueraient d'endommager les composants électroniques.

## II - 2 - Les 4 quadrants de fonctionnement du moteur à courant continu

Nous venons de voir que le moteur à courant continu peut fonctionner en mode **moteur** ou en mode **générateur**. De plus il peut tourner dans **deux sens de rotation** différents. Il en résulte 4 quadrants de fonctionnement dans le plan Tension/Courant :



Rappels :  
 $C = K \cdot I$   
 $E = K \cdot \Omega$



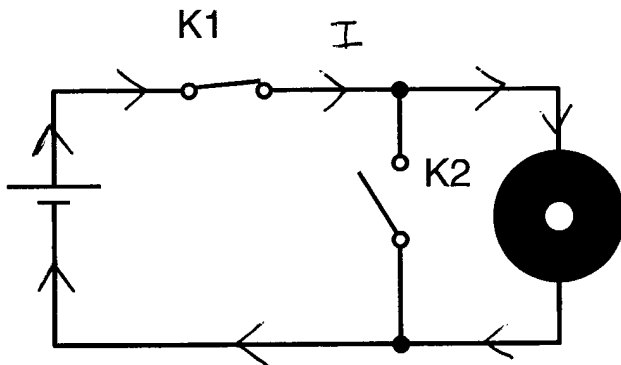
Remarques :  
 $P_{ELEC} = U \cdot I$        $P_{MECA} = C \cdot \Omega$   
 Moteur si  $P > 0$       Générateur si  $P < 0$

### III - Le hacheur série

Le hacheur série possède 2 interrupteurs K1 et K2 :

- \* K1 est l'interrupteur principal permettant d'alimenter le moteur lors de **la phase motrice**.
- \* K2 est l'interrupteur secondaire assurant la continuité du courant dans le moteur lors de **la phase de roue libre**.
- \* Les états des interrupteurs K1 et K2 sont complémentaires : si un interrupteur est ouvert alors l'autre est fermé

Comme l'interrupteur principal K1 est branché en série avec le moteur, ce hacheur s'appelle « le hacheur série ».



Phase motrice : K1 fermé et K2 ouvert

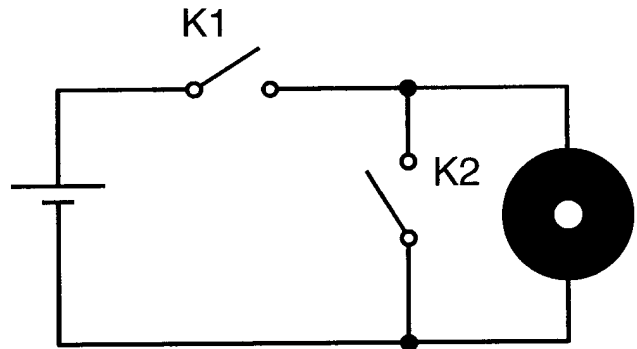
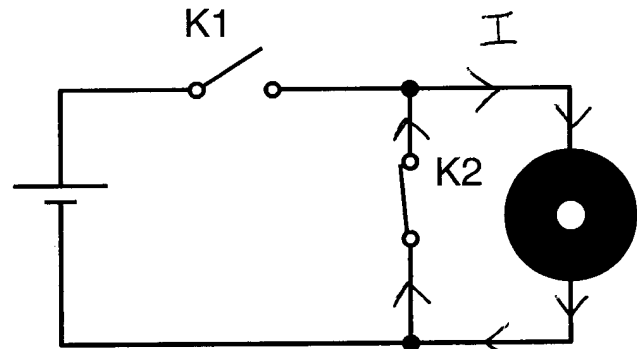


Schéma du hacheur série



Phase de roue libre : K1 ouvert et K2 fermé

Pour moduler la vitesse du chariot de Golf, son moteur est alimenté grâce à un hacheur série. Dans le chariot de Golf, l'interrupteur principal K1 est un transistor MOS et l'interrupteur secondaire K2 est une diode. Pour modifier la vitesse du moteur, l'utilisateur agit sur un bouton qui permet de changer le rapport cyclique du signal MLI commandant l'interrupteur K1.

#### Remarques :

- \* K1 est bien branché en série avec le moteur
- \* Comme K1 est un transistor MOS à canal N il a sa source relié à la masse
- \* Pour que K1 se ferme il faut appliquer un niveau haut sur sa grille
- \* Si K1 est fermé alors K2 est forcément ouvert
- \* Si K1 est ouvert alors K2 se ferme pour assurer la continuité du courant dans le moteur lors de la phase de roue libre

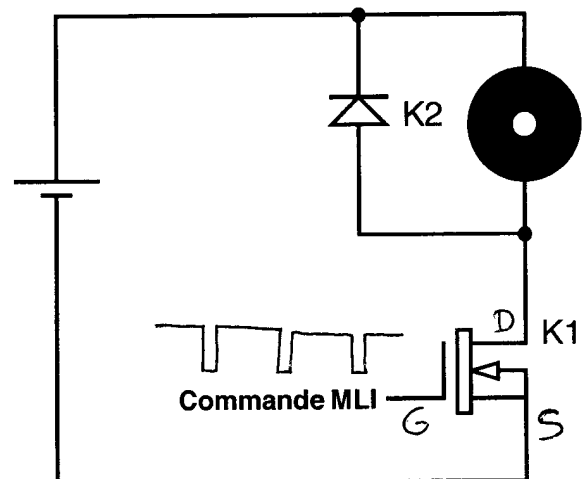
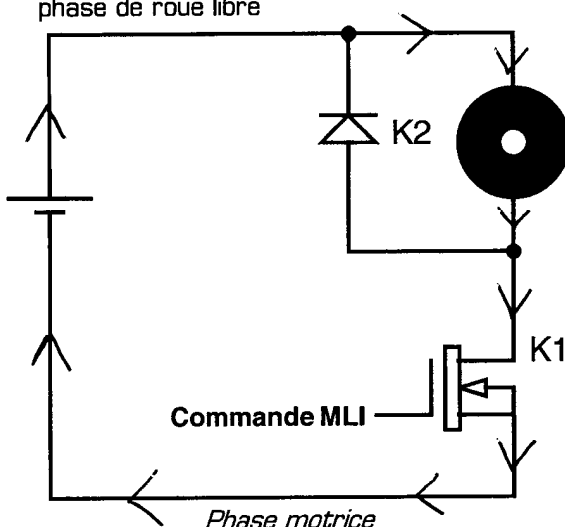
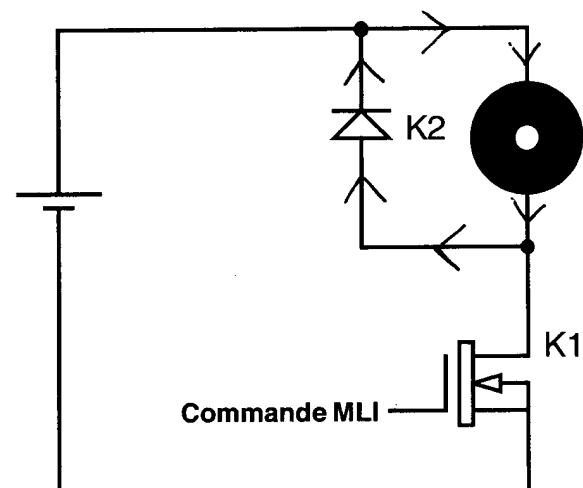


Schéma du hacheur série du chariot de Golf

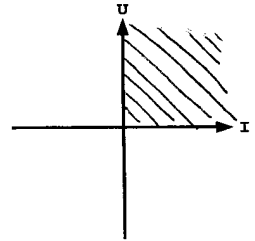


Phase motrice



Phase de roue libre

Le hacheur série est un hacheur 1 quadrant, permettant de moduler la vitesse du moteur pour un seul sens de rotation : il n'est pas réversible en tension. De plus si le moteur fonctionne en génératrice, ce hacheur ne permet pas de récupérer l'énergie électrique produite par le moteur : il n'est pas réversible en courant. Il fonctionne donc seulement dans le quadrant  $U > 0$  et  $I > 0$  dans le plan Tension/Courant.



**IV - Le hacheur série réversible en courant**

**Problème :** Lorsque le moteur à courant continu est entraîné par une charge mécanique, il fonctionne alors en génératrice : il convertit **l'énergie mécanique** qui l'entraîne en **énergie électrique**. Si on veut que cette énergie électrique produite soit récupérée, il faut lui assurer un passage dans le montage du hacheur afin de transférer le courant du moteur vers la batterie. La batterie étant réversible, si elle reçoit du courant elle se rechargera.

**Solution :** Pour convertir un hacheur série en hacheur série **réversible en courant** il faut placer une diode en anti-parallèle sur l'interrupteur principal K1. Ainsi, lorsque le moteur produit du courant en mode génératrice, le courant produit sera directement redirigé vers la batterie. C'est ce principe qui est mis en place sur le Scoot'Elec pour récupérer l'énergie électrique lors de la phase génératrice (par exemple lorsque le Scoot'Elec est entraîné dans une descente).

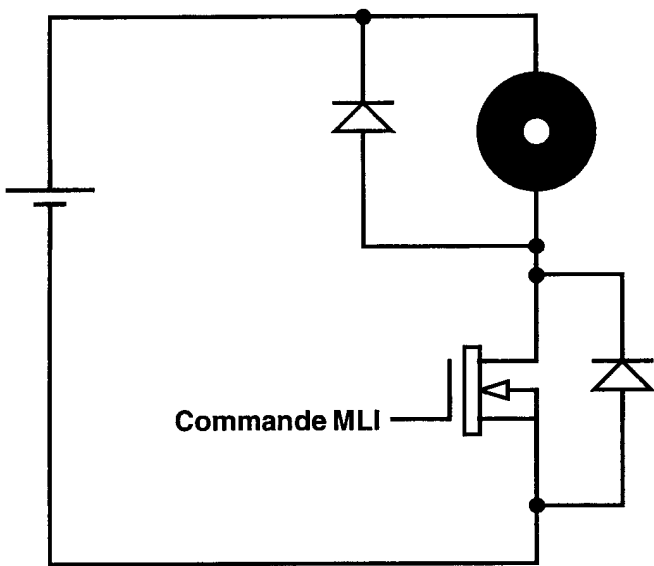
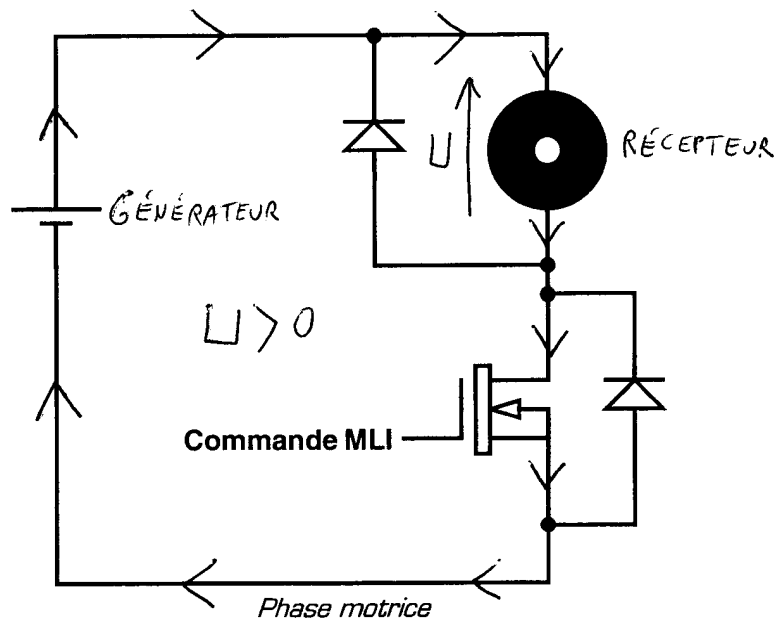
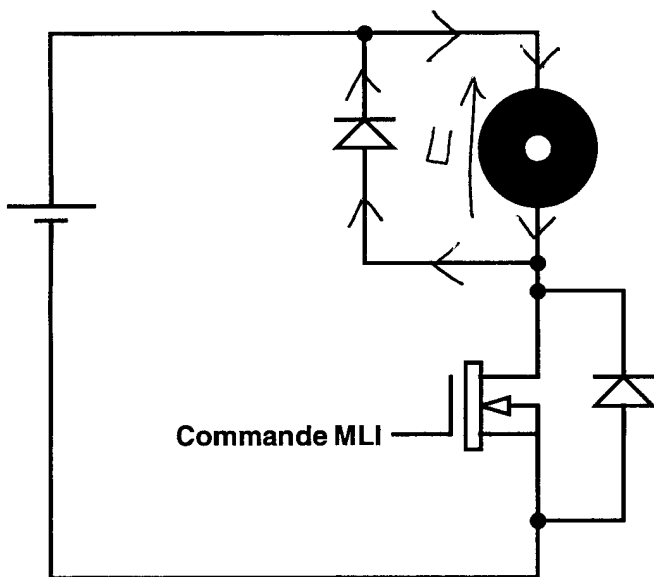


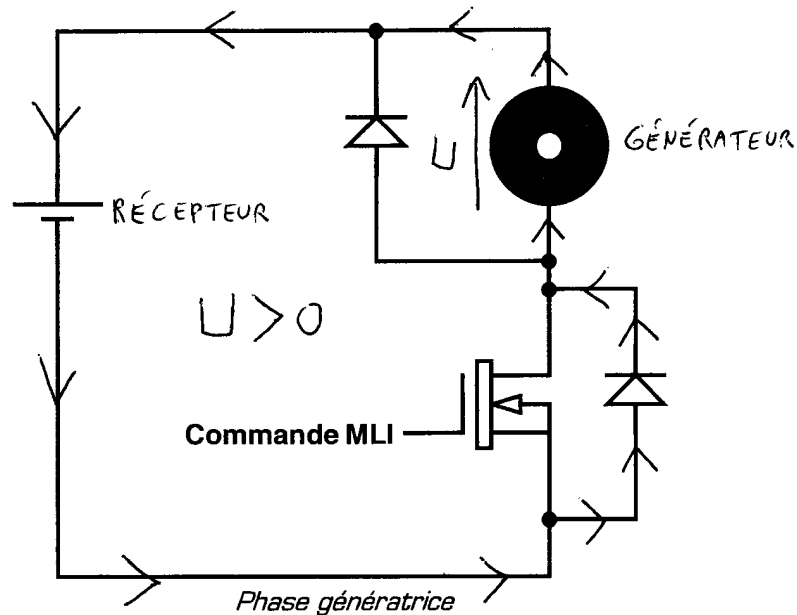
Schéma du hacheur série du Scoot'Elec



Phase motrice



Phase de roue libre

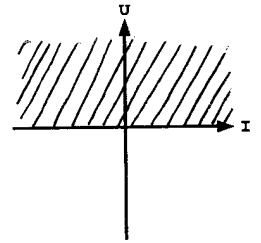


Phase génératrice

**Remarque :** dans chacune des 3 phases, un seul interrupteur est fermé parmi les 3, les deux autres restant ouverts.

Ce hacheur est un hacheur 2 quadrants. Il permet de moduler la vitesse du moteur pour un seul sens de rotation : il n'est pas réversible en tension.

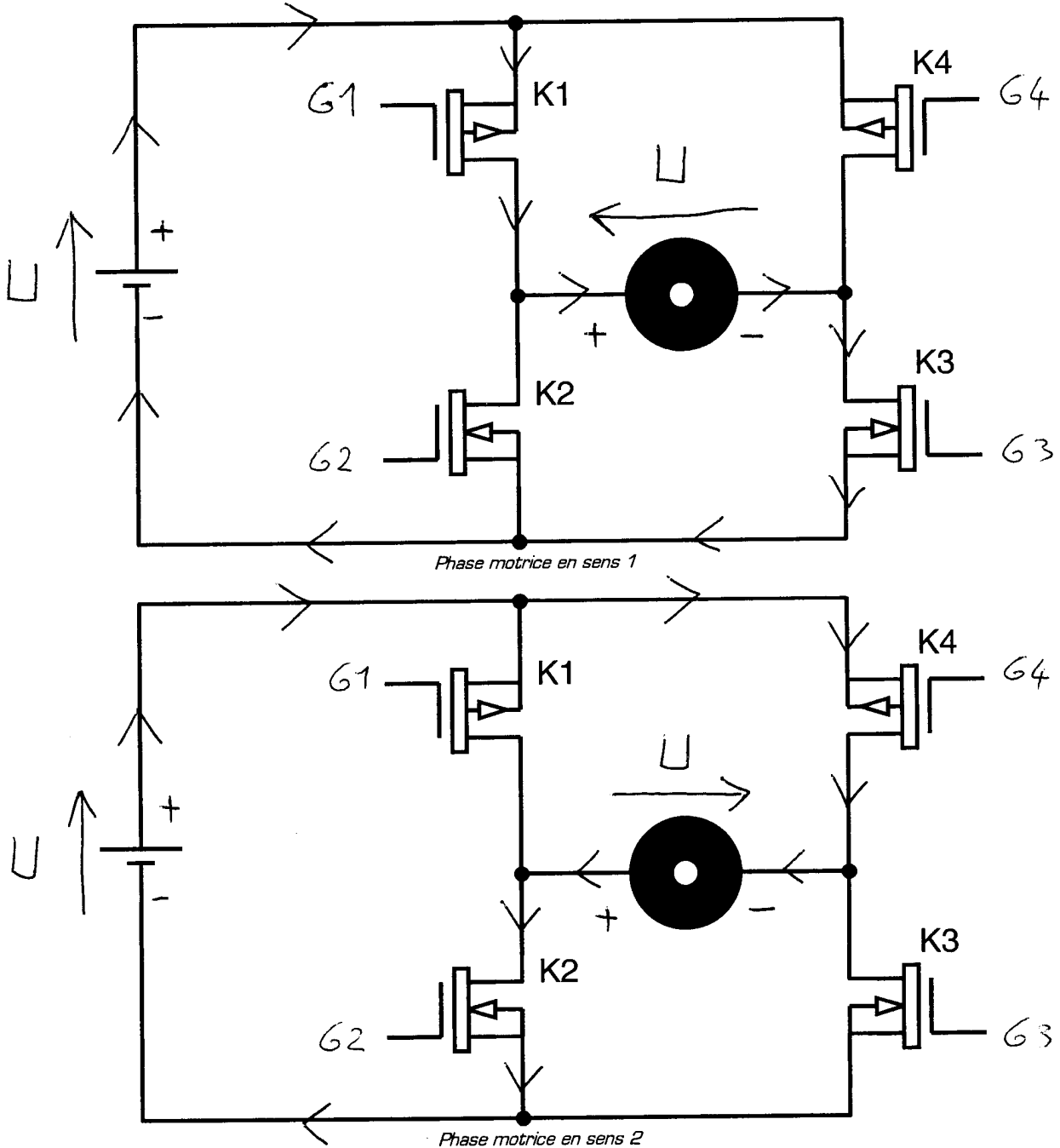
Mais si le moteur fonctionne en générateur, ce hacheur permet de récupérer l'énergie électrique produite par le moteur : il est donc **réversible en courant**.



**A retenir :** pour donner à un hacheur série la propriété de réversibilité en courant il faut connecter une diode en anti-parallèle sur l'interrupteur principal du hacheur.

**V - Le hacheur réversible en tension : le pont en H**

Un pont en H est un dispositif à 4 interrupteurs permettant d'alimenter un moteur à courant continu dans les deux sens de rotation, en inversant la polarité de la tension aux bornes du moteur.

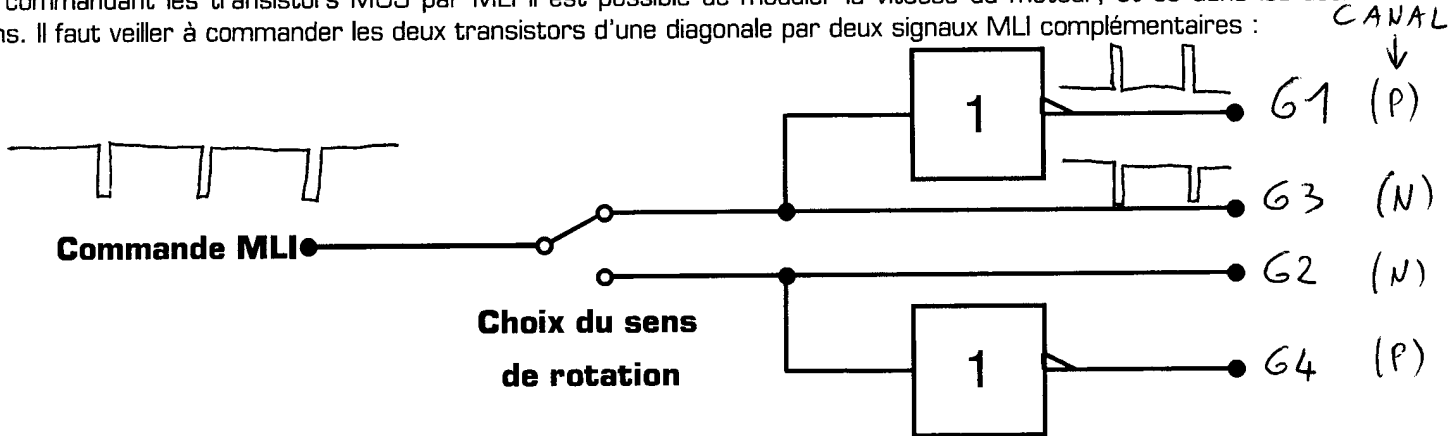


Le moteur est alimenté si on ferme une des deux diagonales du pont en H :

K1	K2	K3	K4	Moteur
F	O	F	O	SENS 1
O	F	O	F	SENS 2
O	O	O	O	ARRÊTÉ

Les deux transistors du haut (K1 et K4) qui ont leur source reliée à la borne positive de l'alimentation sont des transistors MOS à canal P : ils seront fermés si leur grille est reliée à 0 V, c'est-à-dire lorsque  $V_{GS} < 0$ .  
 Les deux transistors du bas (K2 et K3) qui ont leur source reliée à la masse sont des transistor MOS à canal N : ils seront fermés si leur grille est reliée à une tension positive, c'est-à-dire lorsque  $V_{GS} > 0$ .

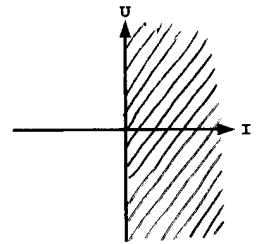
En commandant les transistors MOS par MLI il est possible de moduler la vitesse du moteur, et ce dans les deux sens. Il faut veiller à commander les deux transistors d'une diagonale par deux signaux MLI complémentaires :



Commandé par MLI, le pont en H est un hacheur 2 quadrants.

Il permet de moduler la vitesse du moteur dans les deux sens de rotation : il est donc **réversible en tension**.

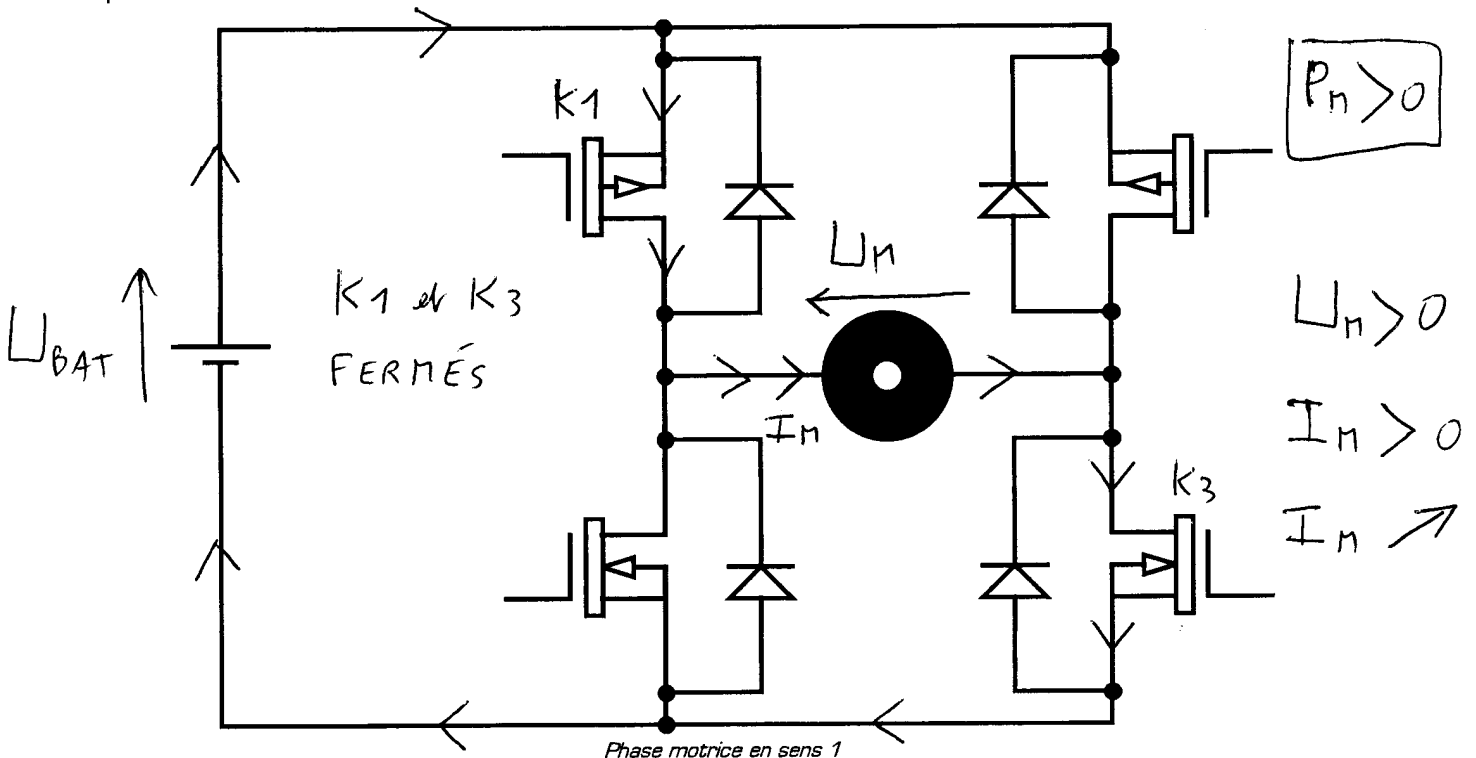
Mais si le moteur fonctionne en générateur, ce hacheur ne permet pas de récupérer l'énergie électrique produite par le moteur : il n'est pas réversible en courant.



**Remarque :** comme lors de la phase motrice le moteur est alimenté avec une tension qui peut être aussi bien positive (en sens 1) que négative (en sens 2) il est impossible de placer une diode de roue libre permanente en dérivation du moteur dans le cas du pont en H. On en déduit qu'en cas de commande par MLI, le pont en H de base n'assure pas la continuité du courant dans le moteur.

**VI - Le hacheur 4 quadrants** *! Sans quoi le moteur comme une charge RLE réversible (ou au moins LE) et sans chronogramme de hacheur 4 quadrants pour poser certaines questions (ex:  $U_M < 0$  en roue libre mais en sens de rotation)*

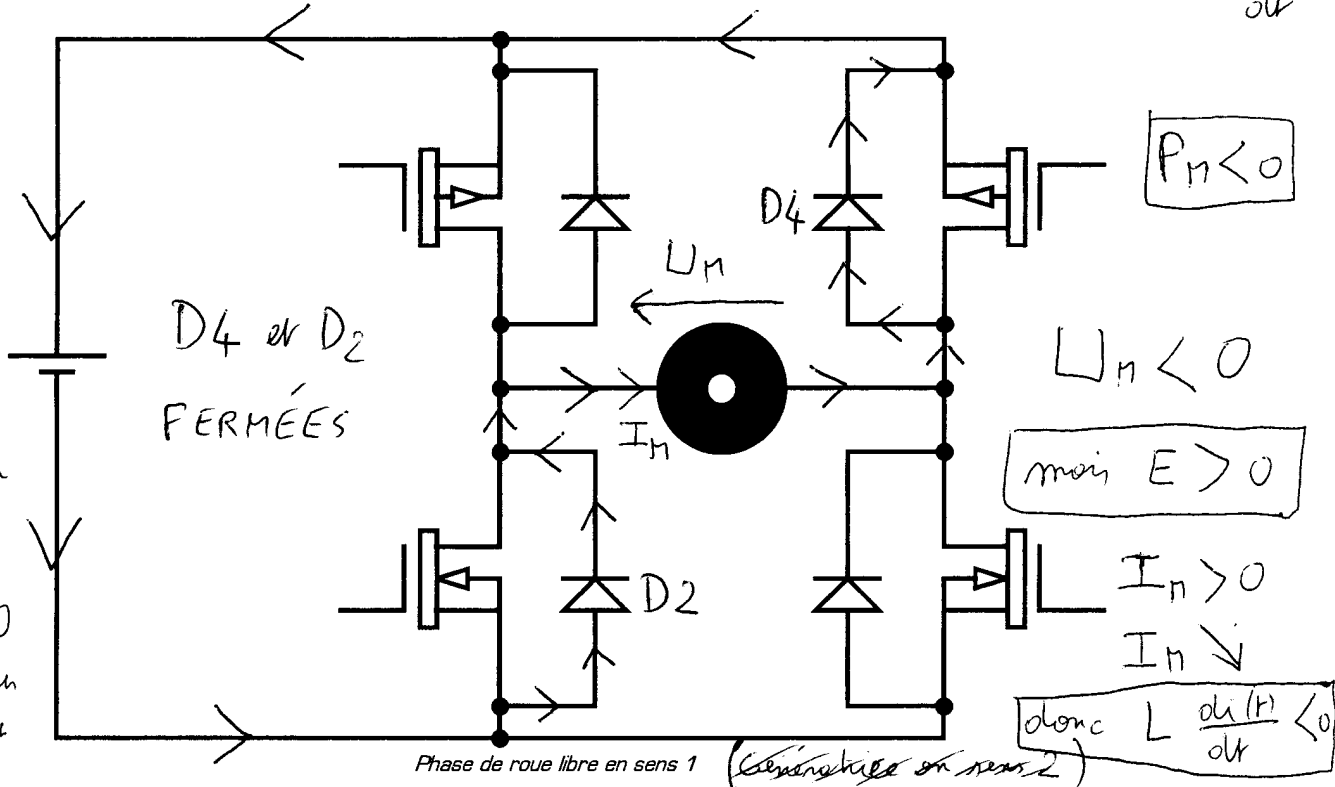
Le hacheur 4 quadrants permet d'alimenter un moteur à courant continu dans les deux sens de rotation (en mode moteur), et permet également de récupérer l'énergie dans les deux sens de rotation lorsque le moteur fonctionne en générateur. Le schéma du hacheur 4 quadrants est celui du pont en H (réversible en tension) à qui on a rajouté 4 diodes pour assurer la réversibilité en courant :



*Une réversible phase de roue libre permet de court-circuiter le moteur en assurant la continuité du courant. Or dans le 4 quadrants,  $U_M$  n'est jamais nul :  $U_M = U_{BAT}$  ou  $U_M = -U_{BAT}$  : la réversible roue libre n'existe pas.*

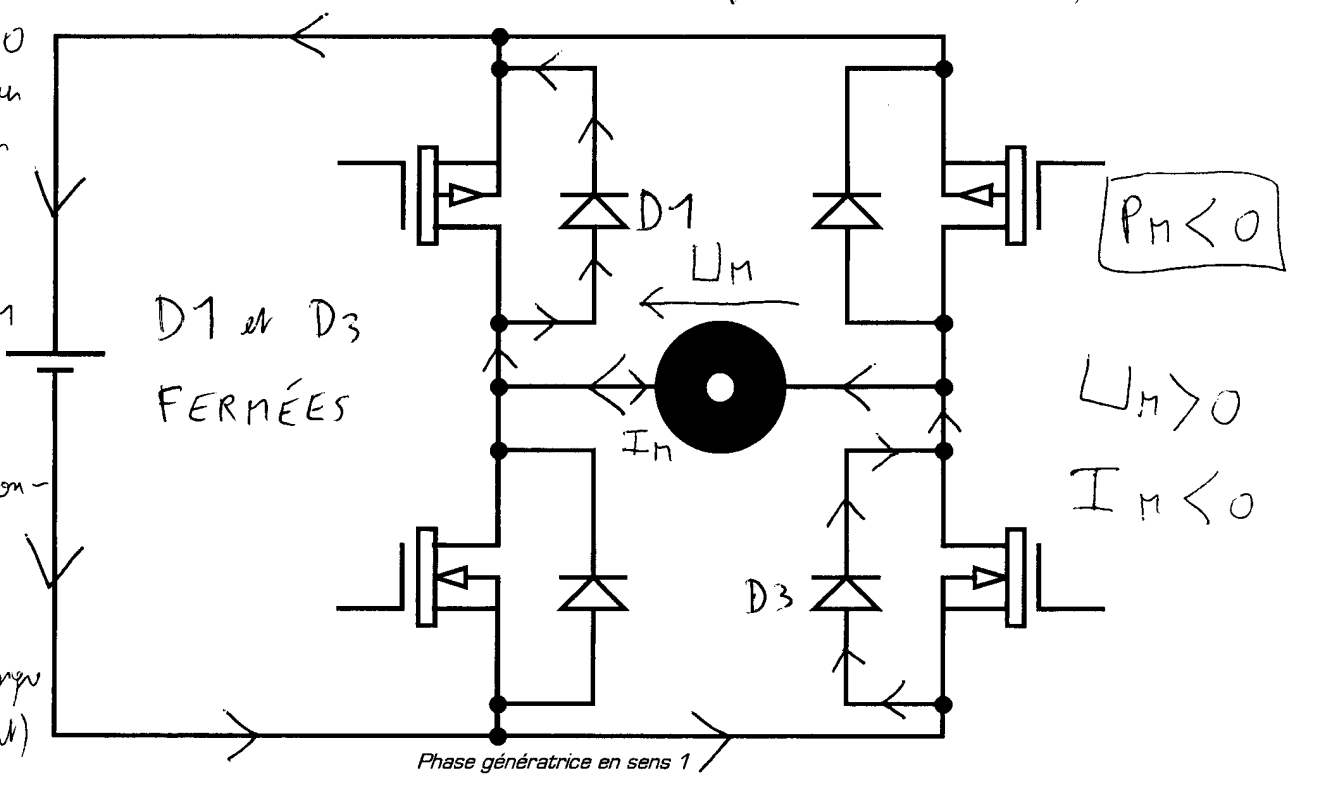
⚠  $U_M < 0$  ne veut pas dire inversion du sens de rotation!  $U_M = E + L \frac{di(t)}{dt}$

$U_M$  et  $I_M$  sont fléchés en fonction du sens de rotation du moteur en convention récepteur  
 Si  $U_M \cdot I_M > 0$  alors le moteur est en récepteur



Si  $U_M \cdot I_M < 0$  alors le moteur est en générateur

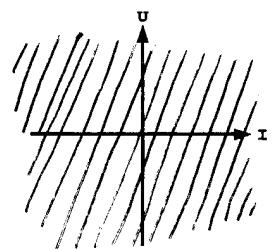
Pour connaître le signe de  $U_M$  et  $I_M$  il faut comparer les flèches conventionnelles à la circulation réelle des grandeurs physiques (tension et courant)



Ce hacheur est un hacheur 4 quadrants.

Il permet de moduler la vitesse du moteur dans les deux sens de rotation : il est donc **réversible en tension**.

Et si le moteur fonctionne en générateur, ce hacheur permet de récupérer l'énergie électrique produite par le moteur : il est donc **réversible en courant**.

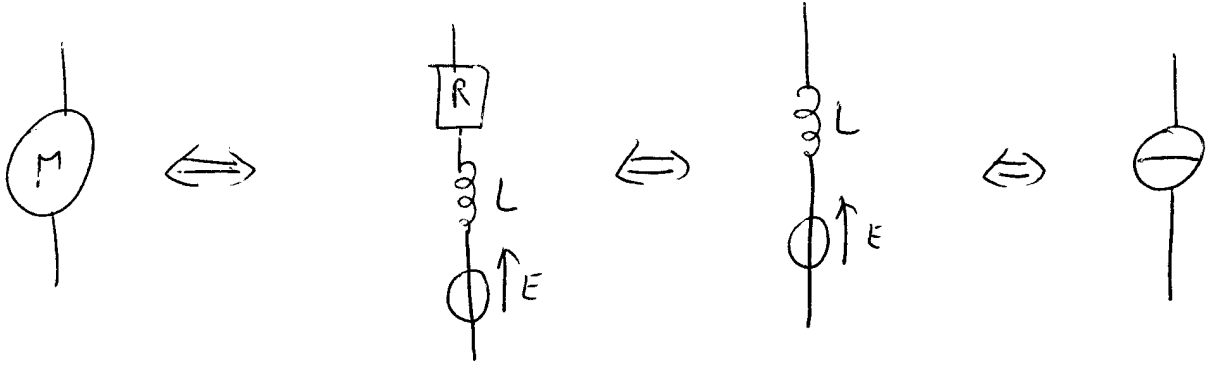


**A retenir :** pour convertir un pont en H en hacheur 4 quadrants il faut connecter une diode en anti-parallèle sur chacun des 4 transistors du pont en H. Ces diodes, appelées diodes de récupération, permettent d'assurer à la fois :

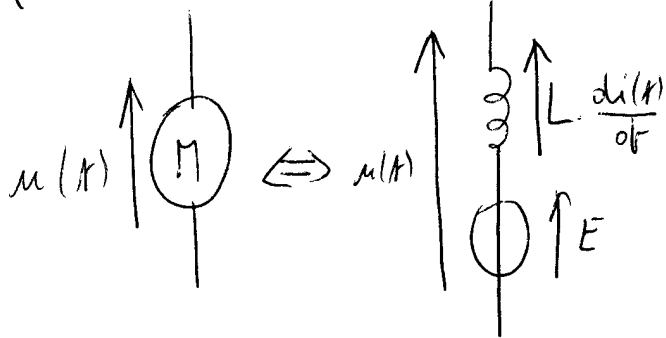
- \* La continuité du courant dans le moteur lors de la phase de **roue libre**
- \* La **réversibilité en courant** afin de récupérer l'énergie dans la batterie lors de la phase génératrice

Précisions concernant les phases de roue libre:

Il faut voir le moteur comme une charge RLE (avec R négligeable en un premier temps, ça suffit):



Le Moteur est un "générateur de courant réversible"  
 (le Lutteris est un "générateur de tension réversible")



$$u(t) = E + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

Phase motrice:  $u(t) > 0$      $E > 0$      $i(t)$  augmente     $L \cdot \frac{di(t)}{dt} > 0$

Phase de roue libre:  $u(t) = 0$      $E > 0$  (le moteur tourne toujours dans le même sens)  
 moteur court-circuité par la diode de roue libre

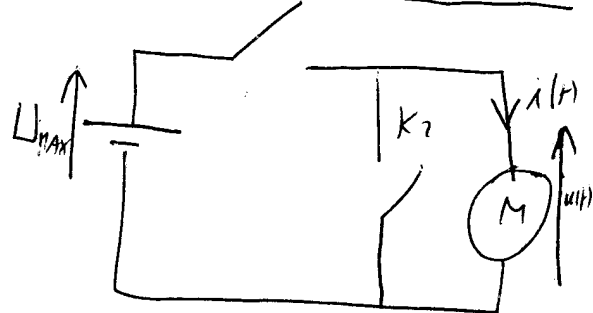
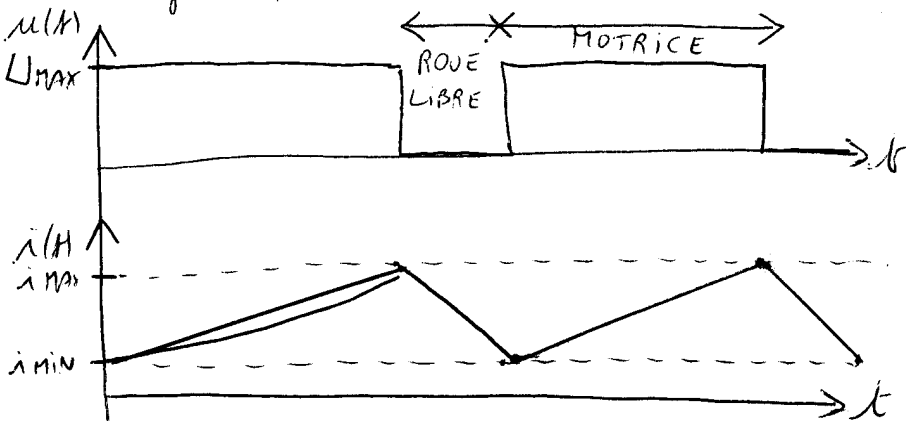
$$E = -L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

$i(t)$  diminue (le moteur ralentit,  $C \searrow$ )

$$L \frac{di(t)}{dt} < 0$$

En phase de roue libre le moteur est un générateur de courant court-circuité ( $u(t) = 0$ , pas de récepteur, mais  $K_1$  moteur en générateur)

Chronogramme du hachage série:





**Retrouvez d'autres cours sur le site ressource**

**[www.gecif.net](http://www.gecif.net)**

**Téléchargez librement sur Gecif.net :**

- ✍ **des cours et des TP de Génie Electrique**
- ✍ **des exercices et des évaluations avec corrections**
- ✍ **des ressources Automgen, ISIS Proteus et Flowcode**
- ✍ **des QCM pour réviser les cours et vous entraîner**
- ✍ **des logiciels d'électronique pour les installer chez vous**
- ✍ **des dossiers techniques de systèmes originaux**
- ✍ **des fiches pratiques sur tous les domaines des sciences de l'ingénieur**
- ✍ **des sujets de BAC**
- ✍ **et bien plus encore sur Gecif.net !**