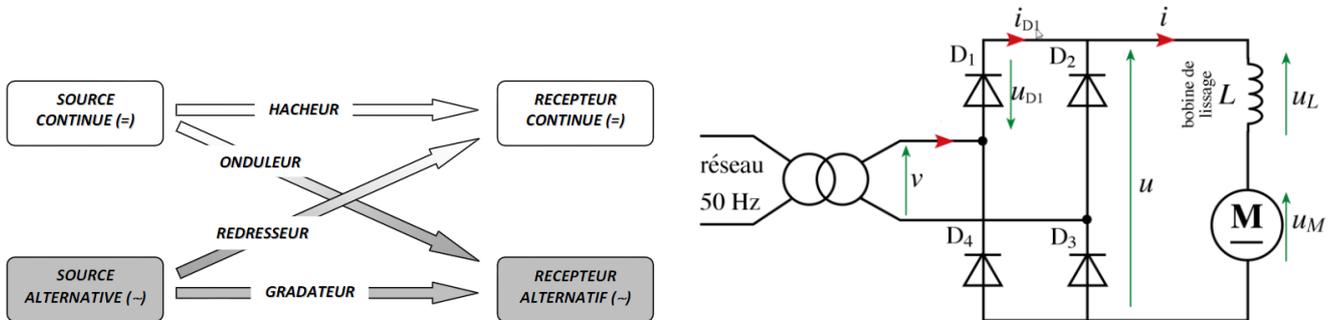


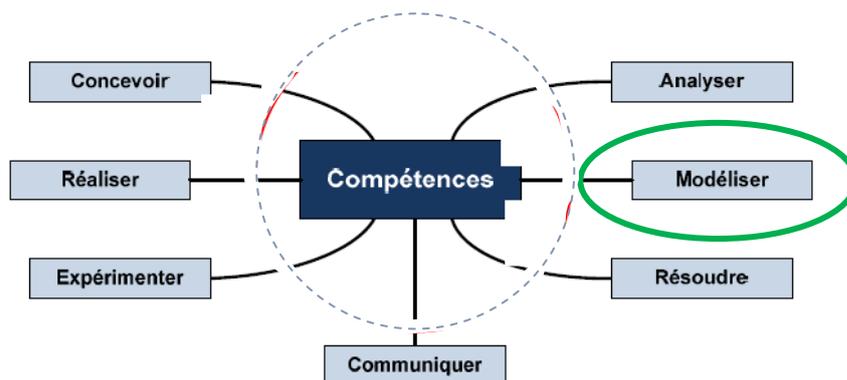
Cycle 9: Etude de la chaîne de conversion électromécanique

Chapitre 2 : Etude des convertisseurs statiques (hacheurs)



Compétences:

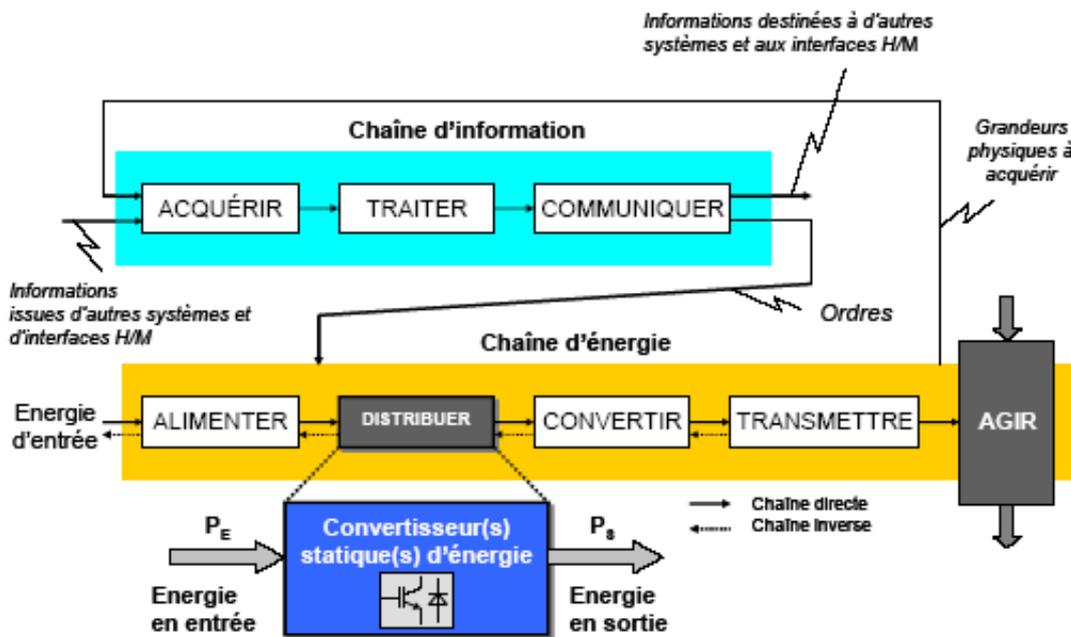
- Modéliser les sources et circuits
- Modéliser une chaîne de conversion électromécanique
- Modéliser les convertisseurs statiques (hacheur pour moteur CC)





1. La conversion statique d'énergie électrique

Dans l'architecture fonctionnelle générique d'un système pluritechnique, les **Convertisseurs Statiques (CVS) de puissance** assurent la fonction « **DISTRIBUER** » de la chaîne d'énergie. Ils convertissent l'énergie électrique (du réseau d'alimentation ou batterie...) en énergie électrique de forme différente.



1.1. L'électronique de puissance et le rôle des convertisseurs

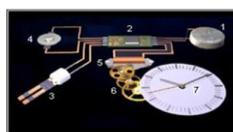
L'**électronique de puissance** est la branche de l'électrotechnique qui a pour objet l'étude de la **conversion statique d'énergie électrique** (notamment les structures, les composants, les commandes et les interactions avec l'environnement), c'est-à-dire l'échange d'énergie entre 2 systèmes électriques (réseaux ou actionneurs).

Cette énergie est disponible soit sous une forme :

- **alternative** (réseau de distribution, alternateur...)
- **continue** (batterie d'accumulateurs, génératrice CC, alimentation par caténaire...).

Il est donc nécessaire d'assurer, d'une part, une **fonction de conversion de l'énergie** en rendant compatible les différentes caractéristiques (tension, intensité, fréquence) des 2 systèmes et d'autre part, une **fonction de contrôle de cet échange d'énergie**. C'est le rôle des convertisseurs statiques CVS.

L'électronique de puissance est **indépendante de la puissance** et on la retrouve sur tout type de système :



Montre 10 μ W



Lampes fluorescentes 15W



Véhicule hybride 35kW



Locomotive FRET 4,2MW



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: convertisseurs statiques

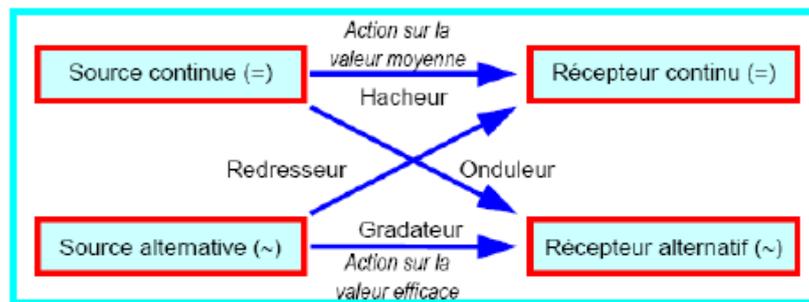
Les CVS utilisent des **semi-conducteurs** (*transistors, thyristors, diodes...*) travaillant en **commutation**, c'est-à-dire en **INTERRUPTEUR** (ouvert-fermé) et des **éléments réactifs** (*inductances, condensateurs*) pour assurer un **rendement de conversion proche de 100%**.

Commande - symbole	La diode	Le transistor MOS
	Amorçage et blocage spontanés	Amorçage et blocage commandés par V_{GS}

1.2. Fonctions de base des CVS

Un convertisseur statique est un dispositif qui **transforme de l'énergie** électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'un récepteur (= une charge), comme un moteur par exemple.

Les différentes possibilités apparaissent ci-dessous :



Remarque : la notion de **REVERSIBILITE** est très importante. Un CVS est dit réversible lorsqu'il permet un **transit de l'énergie dans les 2 sens**.

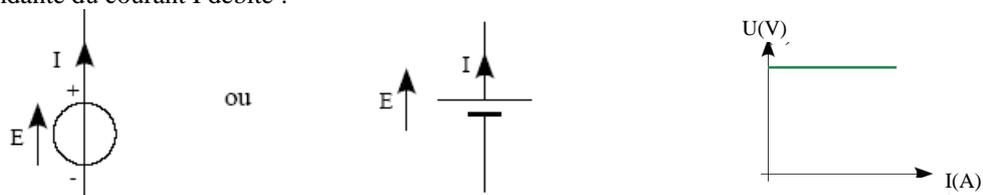
Ex : fonctionnement en 4 quadrants MCC.

2. Les sources

La **source d'entrée** peut être un générateur ou un récepteur (idem pour la source de sortie). A chaque source est associé un **type de CVS** (direct, indirect, multiple) avec des **caractéristiques** (réversibilité U et I, mécanisme de commutation...). Il faut donc savoir caractériser les sources d'entrée et de sortie et **bien connaître le fonctionnement des interrupteurs** pour déterminer la constitution d'un CVS.

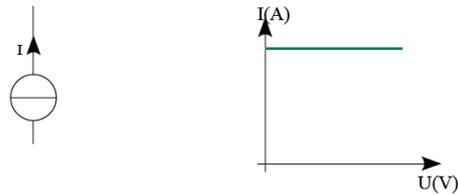
2.1. Les sources tension et courant

Nous avons vu dans les lois de l'électrocinétique qu'une source de tension parfaite est un dipôle actif qui présente une tension U indépendante du courant I débité :





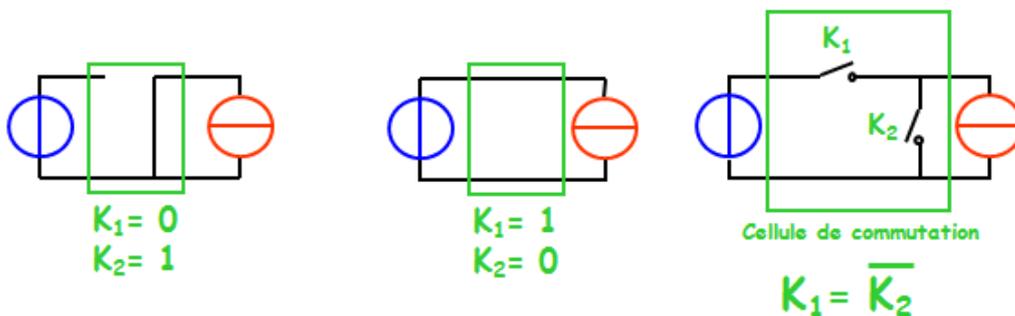
Une source de courant parfaite est un dipôle actif débitant un courant I indépendant de la tension U à ses bornes :



2.2. Règles d'associations des sources

- Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée mais elle peut être ouverte,
- Le circuit d'une source de courant ne doit jamais être ouvert mais il peut être court-circuité,
- Il ne faut jamais connecter entre elles 2 sources identiques

⇒ On peut connecter 2 sources différentes avec 2 interrupteurs complémentaires = cellule de commutation.



3. Les interrupteurs

Un **interrupteur de puissance** se caractérise par :

- sa tenue en tension à l'état ouvert ou bloqué ;
- le courant qu'il peut supporter à l'état passant ou en conduction ;
- le courant qu'il peut couper ;
- son mode de commande.

Les **changements d'état** sont appelés **commutations**.

Le passage de l'état ouvert (ou bloqué) à l'état fermé (ou passant) est appelé allumage (ou mise en conduction); dans l'autre sens, le passage est appelé extinction (ou blocage).

Les CVS sont constitués de semi-conducteurs de puissance qui **travaillent en interrupteur** :

- diodes
- transistor bipolaires
- thyristor
- transistor IGBT

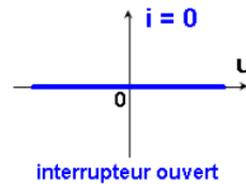
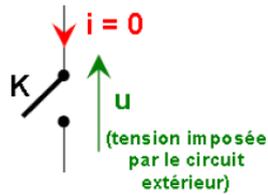




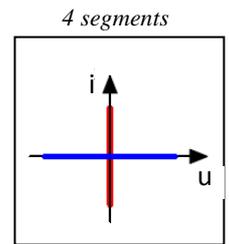
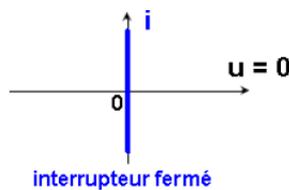
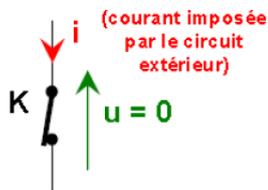
3.1. Les interrupteurs parfaits

Un interrupteur parfait possède **2 états** : « ouvert ou OFF », « fermé ou ON ». Les interrupteurs parfaits sont formés de **4 segments**.

⇒ Interrupteur ouvert (position OFF : $i = 0$)



⇒ Interrupteur fermé (position ON : $u = 0$)



3.2. Les interrupteurs utilisés dans les CVS

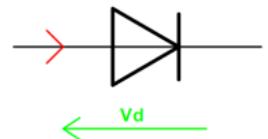
3.2.1. La diode

C'est un semi-conducteur **non contrôlé** qui ne laisse **passer le courant que dans un sens**. Elle est **unidirectionnelle** en courant et en tension.

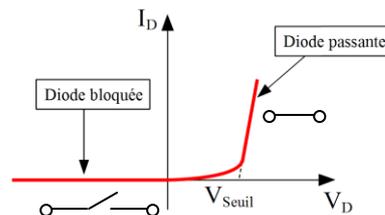
C'est la source qui imposera généralement la valeur de la tension de blocage et la charge qui imposera généralement la valeur du courant de conduction : il ne faudra pas que ces valeurs sortent de la plage autorisée pour le type de diode choisie.

La diode est **passante** en sens **Direct** (interrupteur **FERME**, $i \neq 0$, $V = 0$)

La diode est bloquée en sens Indirect (interrupteur **OUVERT**, $i = 0$, $V \neq 0$)

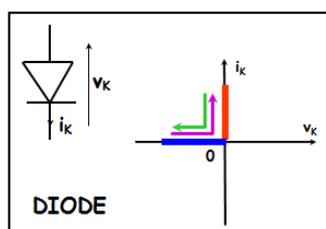


Caractéristiques diode réelle:



tension seuil = 0.6V
tant que $V_d < 0.6V$ alors $i = 0$

Caractéristiques diode parfaite



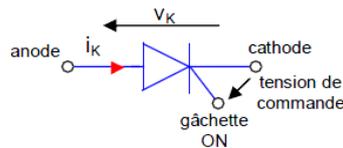
2 segments



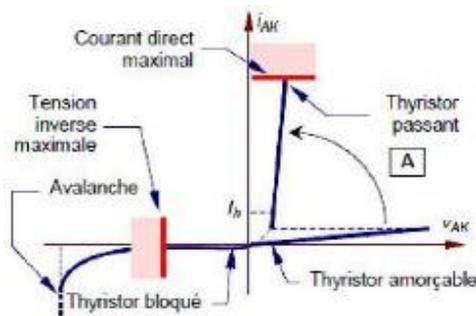
3.2.2. Le thyristor

C'est un semi-conducteur **contrôlé à l'amorçage**, ne laissant **passer le courant que dans un seul sens**. Il peut être **commandé à l'amorçage** mais pas au blocage, par une **impulsion de courant (train) sur la gâchette** avec un **retard δ_0** à l'amorçage **réglable** (utile pour régler la valeur moyenne de tension en variation de vitesse).

Nota: tant qu'il y a le courant de commande, le thyristor est fermé



Caractéristiques du thyristor réel:

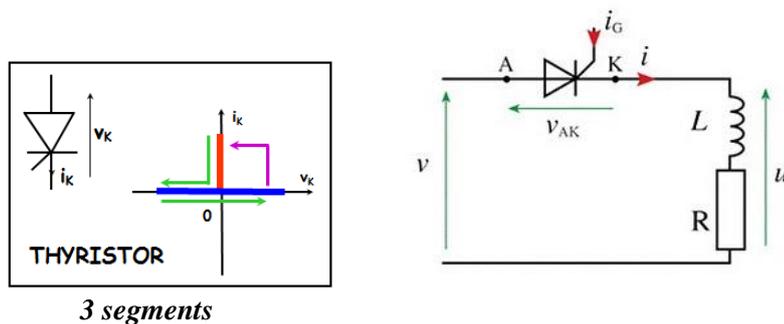


Nota: tant que pas d'impulsion, le thyristor reste bloqué (même si $V_k > 0$)

Ce n'est que lorsqu'il y aura l'impulsion que le thyristor **deviendra passant**.

Une tension V_K positive peut donc se développer à ses bornes (alors qu'il est toujours bloqué), contrairement à ce qui était observé avec une diode. On a donc un 3ème segment.

Caractéristiques du thyristor parfait:

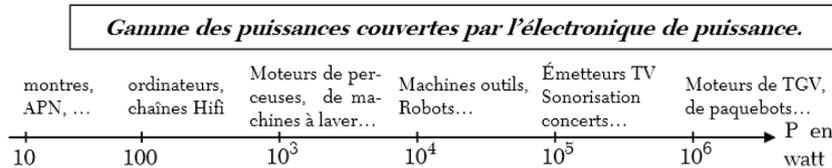


3 segments



4. Conversion continu-continu HACHEUR

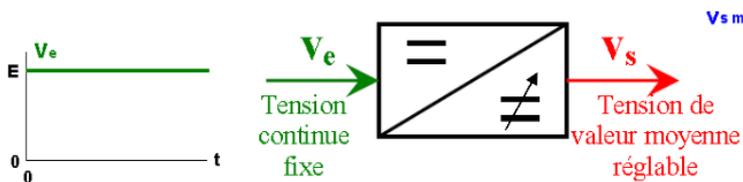
- Pour information:



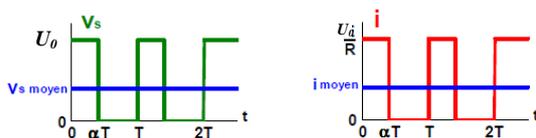
Le hacheur permet d'alimenter une charge sous une **tension continue réglable à partir d'une source continue fixe**. Cette source peut être par exemple une batterie d'accumulateurs ou provenir d'une autre conversion préalable comme un redresseur à diodes (*bloc alimentation stabilisée*).



On obtient une tension de valeur moyenne variable en **établissant et interrompant périodiquement l'alimentation** de la charge par la source grâce à des **interrupteurs électroniques**.



Le hacheur s'intercale entre un générateur de courant continu (batterie, alimentation stabilisée, redresseur, ...) et un récepteur de courant continu (moteur, accumulateur en charge, ...).



4.1. Le hacheur SERIE (abaisseur de tension) sur charge RESISTIVE

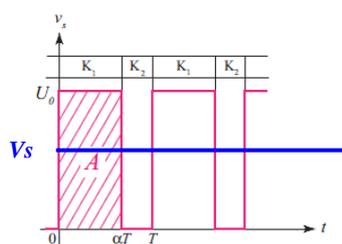
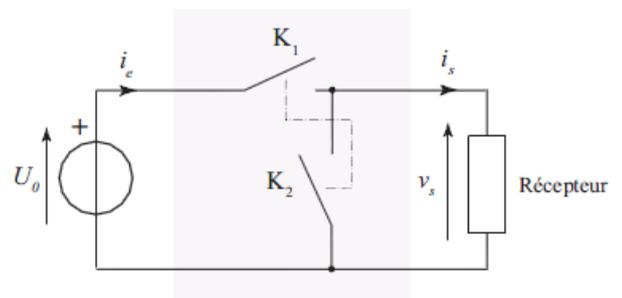
Pour faire **varier la valeur moyenne de la tension Vs** aux bornes du récepteur, on réalise l'équivalent du montage simplifié suivant.

* Schéma:

Les interrupteurs K_1 et K_2 sont complémentaires:

- K_1 fermé, K_2 ouvert: $V_s = U_0$
- K_1 ouvert, K_2 fermé: $V_s = 0$

et sont actionnés périodiquement (période T de fonctionnement du hacheur). K_1 est fermé durant $\alpha \cdot T$



Nota : le rapport cyclique α est proportionnel à la tension de commande u_c de K .



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: convertisseurs statiques

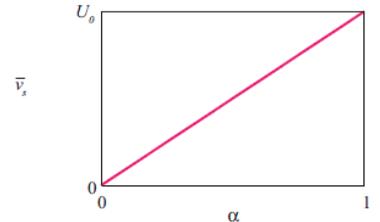
La quantité sans unité α constitue le **rapport cyclique** de la tension V_s (compris entre 0 et 1). La valeur moyenne de V_s est donnée par: $V_s = A/T$, A étant l'aire comprise entre V_s et l'axe des abscisses $V_s=0$. Avec $A = \alpha.T.U_0$, il vient:

$$\langle V_s \rangle = 1/T * \int v_s(t) dt = 1/T [V_{st}]$$

d'où:

$$\langle V_s \rangle = \alpha . U_0$$

$$i_s = \alpha (\langle V_s \rangle / R)$$



Quand on fait varier α de 0 à 1, V_s varie linéairement de 0 à U_0 .

<http://petitjeand.free.fr/fonctionnement%20hacheur.html>

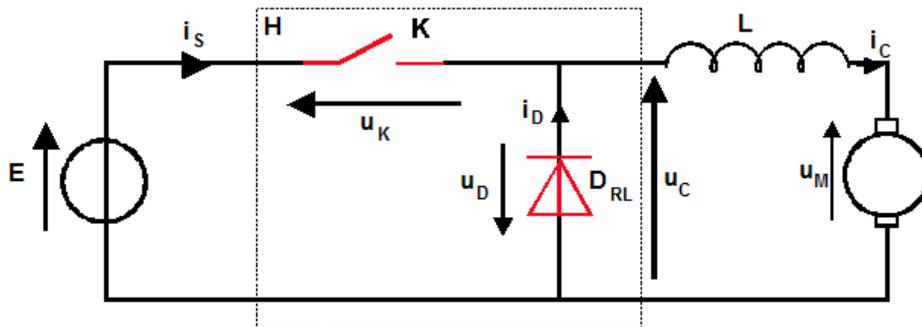
4.2. **Le hacheur SERIE** sur charge **INDUCTIVE** (ex: **MCC**)

Pour faire varier la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu, il faut faire **varier la valeur de sa tension d'alimentation**. Une solution pour réaliser cela consiste à alimenter le moteur par l'intermédiaire d'un **hacheur série**, puisque le hacheur permet la variation de la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge.

Comme son nom l'indique, un moteur à courant continu doit être alimenté par un courant continu. En effet, le couple électromagnétique est proportionnel au courant ($T_{em} = K . \Phi . I$), si le courant est haché, le couple électromagnétique aussi ce qui est inacceptable car cela cause des vibrations au moteur et une usure prématurée. Pour éviter cela, il convient de « **lisser** » le **courant** dans le moteur : on rajoute en série avec le moteur une **inductance dites de « lissage »**.

On supposera par la suite, que la valeur de l'inductance est telle que le courant est parfaitement continu dans la charge : l'ondulation du courant est négligeable.

Schéma du montage :



La charge est constituée d'un moteur à courant continu et de son inductance de lissage. Afin d'assurer la continuité de conduction du courant à travers la charge, il convient d'assurer la circulation de celui-ci même quand l'interrupteur K est ouvert : c'est le rôle de la diode **D_{RL}**, appelée « **diode de roue libre** ».

Le hacheur est maintenant constitué d'un interrupteur K commandable à l'ouverture et à la fermeture, comme un **thyristor** ou transistor, son circuit de commande et de la diode de roue libre D_{RL}.

E est une source de tension continu idéale.

Le courant dans la charge est nommé i_C ; le courant délivré par la source de tension est nommé i_s ; le courant circulant dans la diode de roue libre est nommé i_D .



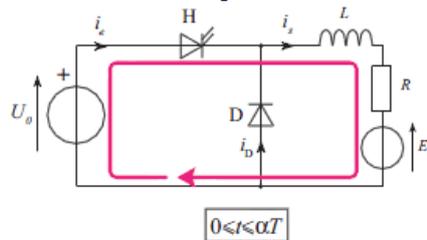
Etude de la chaîne de conversion électromécanique: convertisseurs statiques

Fonctionnement :

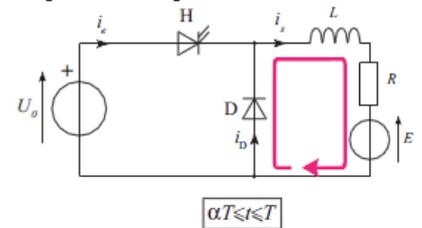
Quelle que soit l'état de la commande, on a fait l'hypothèse du lissage parfait du courant. Donc le courant dans la charge est continu : $i_c(t) = I_c$. Ce qui signifie qu'il faut toujours un interrupteur conducteur pour assurer la conduction du courant, soit K, soit la diode de roue libre.

- K est fermé, $u_{K(t)} = 0$
Alors, d'après la loi des mailles, $u_C(t) = E$
La tension aux bornes de la diode, $u_{D(t)} = -u_C(t) = -E$. La diode est polarisée en inverse, elle est donc bloquée : $i_D(t) = 0$
Le courant circule par K : $i_S(t) = I_c$
- K est ouvert, $i_S(t) = 0$:
Le courant circule par la diode : $i_D(t) = I_c$. La diode est donc passante : $u_D(t) = 0$
Tension aux bornes de la charge : $u_C(t) = -u_D(t) = 0$
Loi des mailles : $u_K(t) = E$

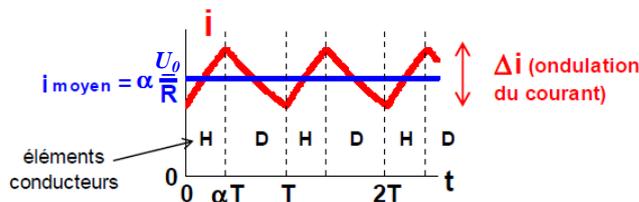
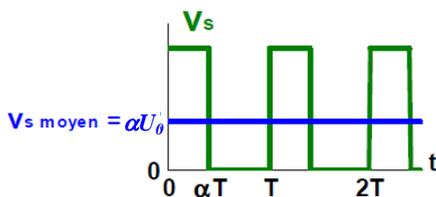
• De 0 à αT , H est passant et D est bloquée.



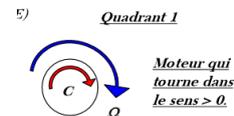
• De αT à T , H est bloqué et D est passante.



* Chronogrammes:



Nota: On voit donc que l'ondulation du courant dans le récepteur est d'autant plus faible que la période T de fonctionnement du hacheur est petite devant la constante de temps $\tau=L/r$ du récepteur, d'où l'intérêt pratique d'utiliser une fréquence de hachage élevée. L'inductance n'a pas d'influence sur la valeur moyenne du courant, mais plus elle est importante, plus elle "lisse" le courant d'où son nom: lissage (cf MCC)



On analyse:

- . de 0 à αT : H se ferme et le courant augmente (exponentielle) à travers H, donc, l'énergie provient de la source de tension U_0 ,
- . de αT à t : H s'ouvre et le courant décroît à travers la diode de roue libre D, donc l'énergie provient de l'inductance.

<http://petitjeand.free.fr/fonctionnement%20hacheur.html>

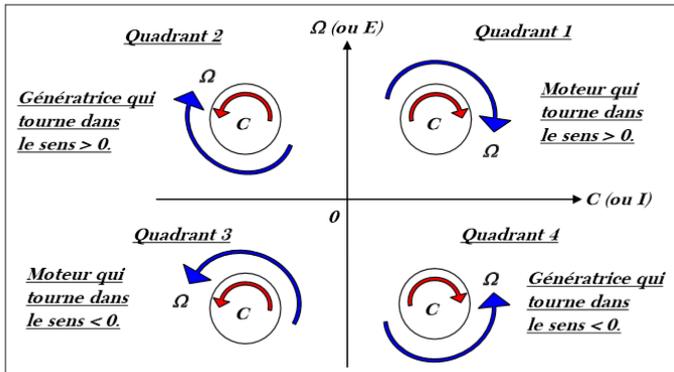
Conclusion : avec un hacheur SERIE on peut faire varier la vitesse de rotation d'une MCC mais que dans 1 seul sens \Rightarrow 1 quadrant de fonctionnement



4.3. **Le hacheur en pont (2 ou 4 QUADRANTS)**

Les convertisseurs que l'on vient d'étudier présentent, en pratique, un inconvénient notable lorsqu'ils sont destinés à **contrôler le fonctionnement d'une MCC**. En effet, ils ne permettent pas le **fonctionnement à la fois en moteur et en génératrice**, ce qui est très contraignant.

Dans la plupart des cas, il faut permettre à la MCC de fonctionner au moins dans deux quadrants, selon que l'on a $I > 0$ et $E > 0$ (moteur), ou $I < 0$ et $E > 0$ (génératrice). Différents types de hacheurs répondent à cette exigence.



Exemples :

- Quadrant 1 :** moteur perceuse , aspirateur...
- Quadrant 4 :** éolienne
- Quadrants 1-3 non réversibles :** lève vitre, viss-dévis
- Quadrants 1-2 réversibles courant :** treuil
- Quadrants 1-4 réversibles tension :** scooter électrique

4.3.1. Hacheur REVERSIBLE en COURANT (quadrants 1-2)

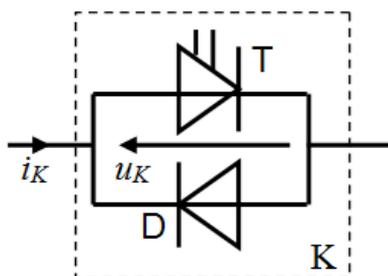
Problème : Lorsque le moteur à courant continu est **entraîné par une charge mécanique (éolienne)**, il fonctionne alors en **génératrice** : il convertit l'énergie mécanique qui l'entraîne en énergie électrique.

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 antiparallèle 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).*

Dans ce système, le changement du sens de parcours de l'énergie est lié au **changement de signe du courant alors que la tension reste de signe constant**.

Ainsi l'interrupteur sera formé de deux composants, un interrupteur commandable à l'amorçage et au blocage (un transistor ou un thyristor) associé à une **diode montée en antiparallèle**. La structure de l'interrupteur ainsi formé sera la suivante :

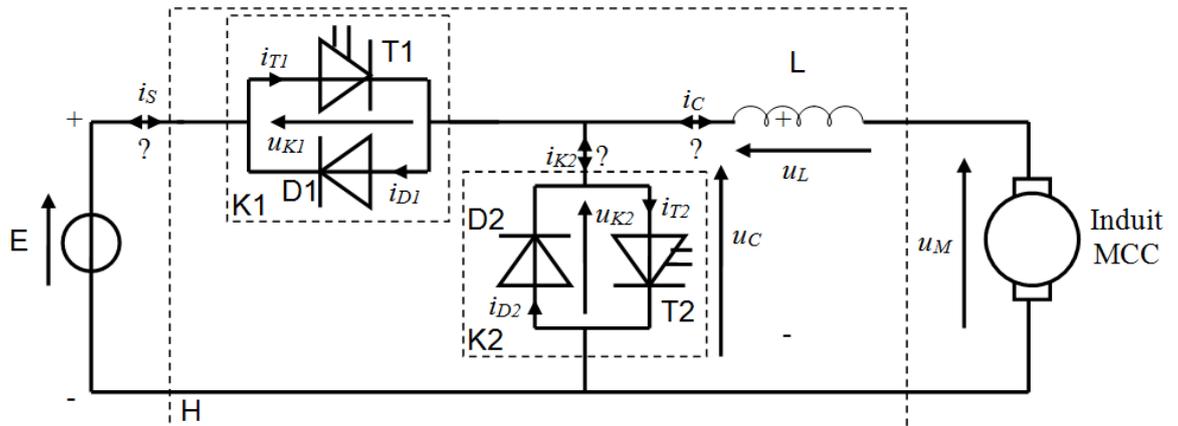


Cette fois, i_K peut être positif ou négatif.
 Si i_K est positif, le courant circule par le transistor T.
 Si i_K est négatif, le courant circule par la diode D.

Le schéma complet du hacheur réversible en courant est le suivant :



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: convertisseurs statiques



E est une source de tension continue idéale.

T1 et T2 sont des interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture. D1 et D2 sont des diodes. Les ensembles K1 et K2 forment des interrupteurs électroniques commandables à l'ouverture et à la fermeture et bidirectionnels en courant.

La charge voit son courant lissé par l'inductance L.

Le courant dans la charge est nommé i_c ; le courant délivré par la source de tension est nommé i_s .

Les sens de parcours des différents courants du dispositif dépendent du sens de transfert de l'énergie.

Fonctionnement :

Il existe **deux modes de fonctionnements** :

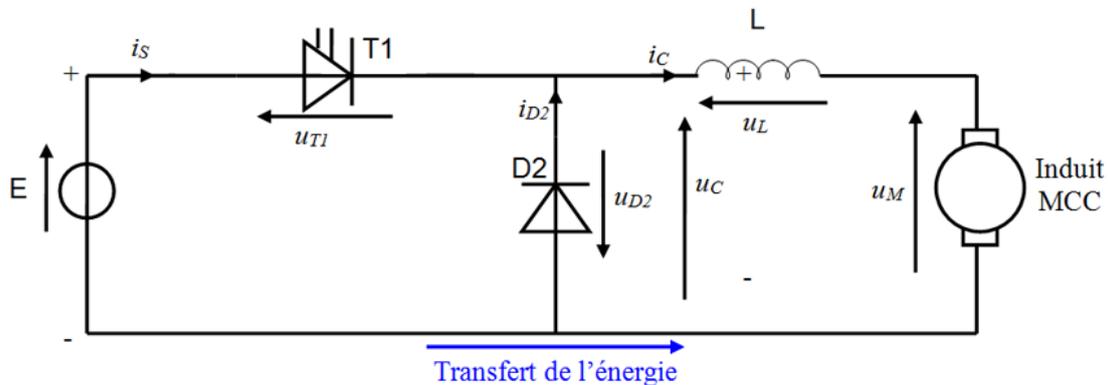
- soit le transfert de l'énergie s'effectue **de la source vers la charge** alors la machine à courant continu fonctionne en **moteur**,
- soit le transfert de l'énergie s'effectue **de la charge vers la source** alors la machine à courant continu fonctionne en **génératrice**. Il s'agit d'une phase de freinage de la MCC.

On effectue l'analyse du fonctionnement en distinguant les deux cas précédents.



1er cas : le transfert de l'énergie s'effectue de la source vers la charge. **Fonctionnement moteur.**

La conduction du courant est assurée par les interrupteurs T1 et D2. Le montage fonctionne alors selon le schéma suivant



On reconnaît le montage du **hacheur série**. Il suffit donc de se ramener à l'étude du hacheur série pour décrire le fonctionnement du montage

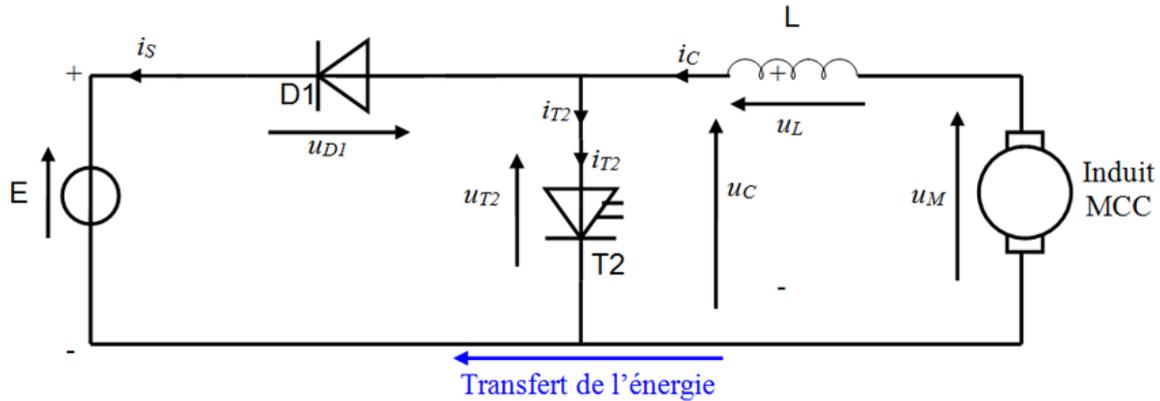


2ème cas : le transfert de l'énergie s'effectue de la charge vers la source. **Fonctionnement génératrice.**



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: convertisseurs statiques

La conduction du courant est assurée par les interrupteurs D1 et T2. Le montage fonctionne alors selon le schéma suivant :

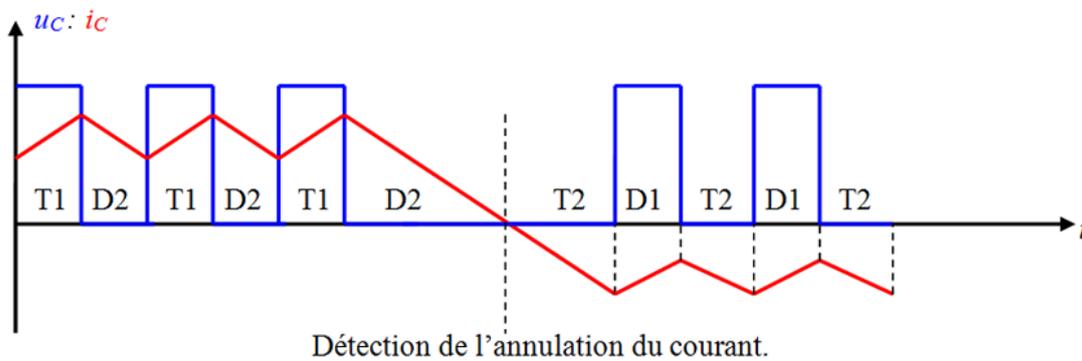


Passage d'un mode de fonctionnement à l'autre.

Il existe deux modes de commandes : commande symétrique et commande alternée :

En commande alternée, tant que le courant i_c est positif, T1 et D2 assurent le fonctionnement du hacheur en conduisant à tour de rôle comme nous l'avons expliqué précédemment.

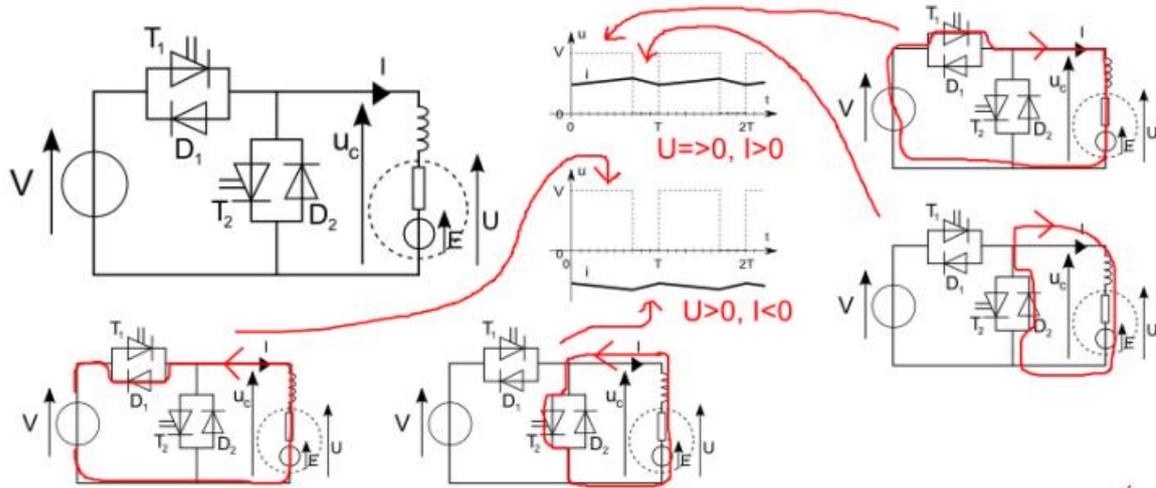
Si i_c vient à s'annuler puis changer de signe, alors, dès que l'on détecte le passage par 0, on lance la commande de T2. C'est alors T2 et D1 qui assurent à tour de rôle la conduction.



Le passage d'un mode de fonctionnement à l'autre implique un basculement de la commande d'un transistor à l'autre. Ce basculement impose à la commande de réaliser une détection de l'annulation du courant dans la charge.

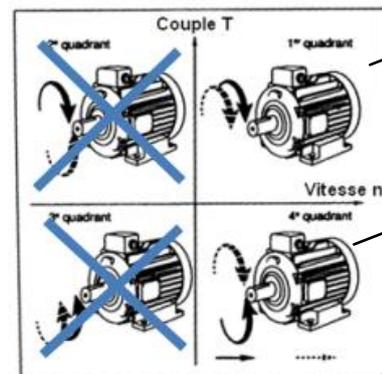
En commande symétrique, le transistor T1 est commandé de 0 à αT et T2 est commandé de αT à T. On passe alors d'un mode de fonctionnement à l'autre de façon automatique. Si la source fournit plus d'énergie électrique que la charge n'a accumulée d'énergie cinétique alors le montage fonctionne en hacheur série et T1 et D2 assure la conduction du courant. Si la source fournit moins d'énergie électrique que la charge n'a accumulée d'énergie cinétique alors le montage fonctionne en hacheur parallèle et T2 et D1 assure la conduction du courant.

Synthèse :



On a alors $\langle u_c \rangle = \alpha \times V$

Ce montage permet un fonctionnement en moteur et freinage avant.



Perceuse

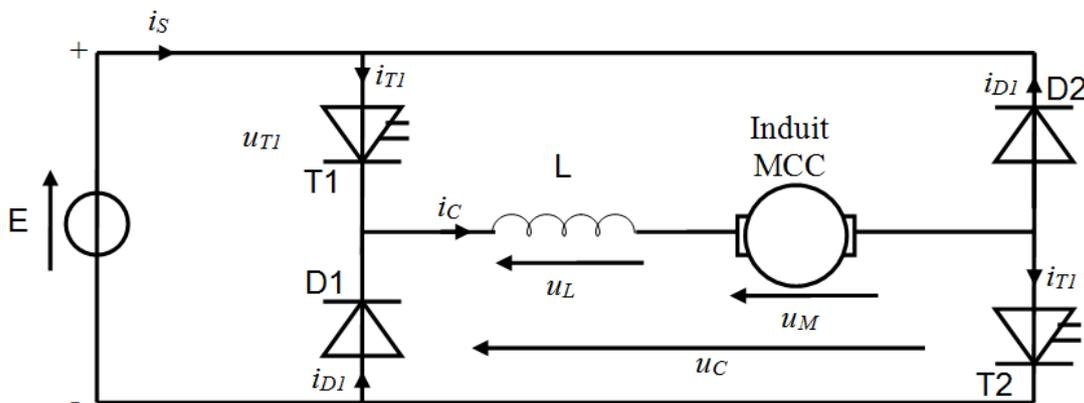
Eolienne

Alternateur

4.3.2. Hacheur REVERSIBLE en TENSION (quadrants 1 et 4)

La tension appliquée à la charge peut prendre les valeurs +E ou -E, ce qui permet, suivant la valeur du rapport cyclique de donner une valeur moyenne de tension de sortie positive ou négative. En revanche, le courant doit rester de signe constant dans la charge, car les interrupteurs ne sont pas réversibles.

Le schéma complet du hacheur réversible en tension est le suivant :





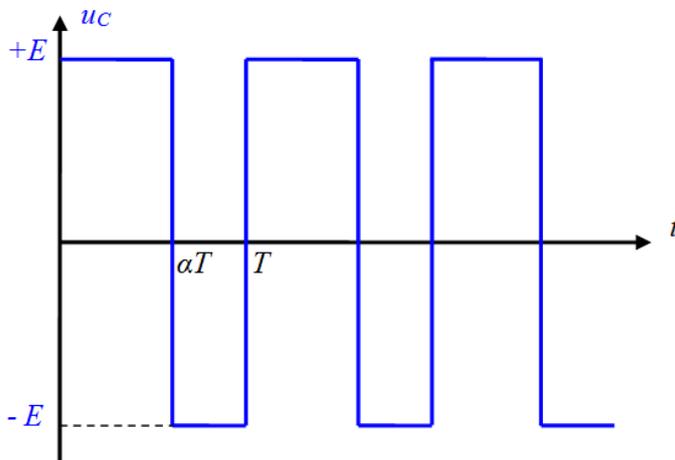
Fonctionnement :

Lors de la première phase de fonctionnement, dans l'intervalle de temps $[0, \alpha T]$ les deux interrupteurs commandés **T1 et T2 sont fermés** et les **diodes D1 et D2 ouvertes**. La charge est sous **tension $+E$** .

Lors de la seconde phase de fonctionnement, sur l'intervalle de temps $[\alpha T, T]$, les interrupteurs commandés sont ouverts et les diodes passantes. La charge est sous **tension $-E$**

Tension aux bornes de la charge :

La forme de la tension de sortie est donc la suivante :



On calcule la valeur moyenne de la tension de sortie par la méthode des aires :

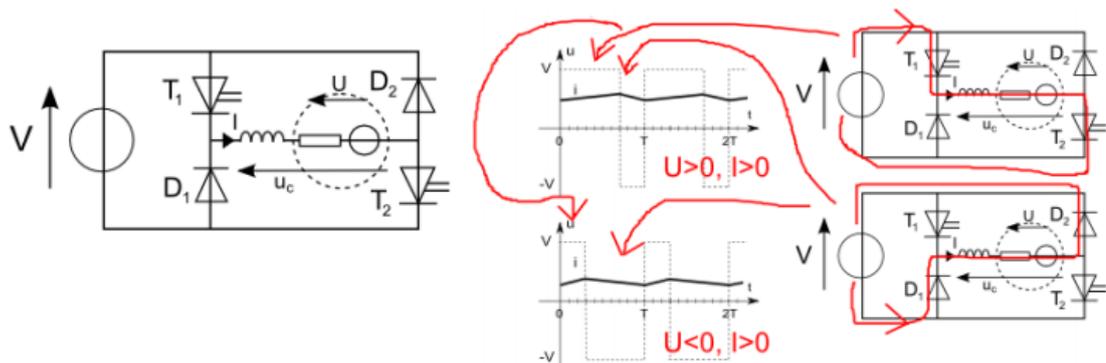
$$A_+ = E.\alpha.T \quad \text{et} \quad A_- = E.(1 - \alpha).T$$

Donc : $\langle u_c \rangle = [E.\alpha.T - (E.(1 - \alpha).T)] / T$ soit $\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1).E$

Si $\alpha > 0,5$, alors, la **tension moyenne de sortie est positive** et le transfert d'énergie s'effectue de la source vers la charge (la machine à courant continu fonctionne en **moteur**).

En revanche, dans le cas où $\alpha < 0,5$, la **tension moyenne de sortie est négative** et le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source (la machine à courant continu fonctionne en **génératrice**).

Synthèse :

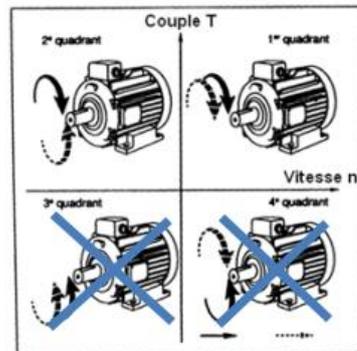




Etude de la chaîne de conversion électromécanique: convertisseurs statiques

On a alors $\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1) \times V$

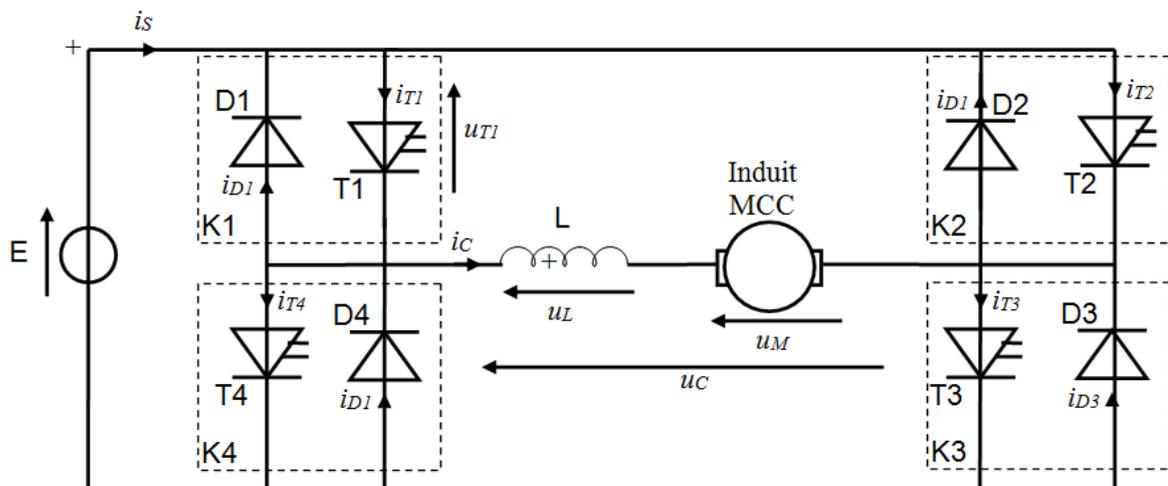
Ce montage permet un fonctionnement en moteur avant et freinage arrière.



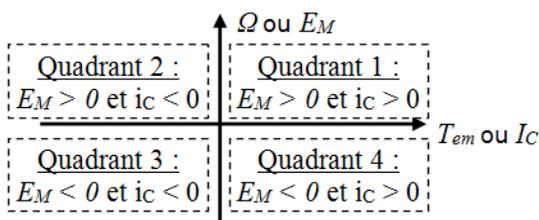
4.3.3. Hacheur REVERSIBLE en pont (4 quadrants)

Le montage est constitué d'une source de **tension continue E réversible en courant**, de l'induit d'une machine à courant continu (MCC) + son inductance de lissage L et de **4 interrupteurs électroniques K1, K2, K3, K4 commandés à l'ouverture et à la fermeture et bidirectionnels en courant**.

La machine à courant continu est susceptible de fonctionner en moteur, le transfert d'énergie s'effectue alors de la source E vers la MCC, ou en génératrice, le transfert d'énergie s'effectue alors de la MCC vers la source E. Les interrupteurs sont constitués d'un transistor ou d'un thyristor + son circuit de commande, et d'une diode branché en antiparallèle qui permet d'assurer la possibilité du retour du courant.



Les 4 quadrants :



Les 4 quadrants de fonctionnement de la machine à courant continu dans le plan $\Omega = f(T_{em})$ ou $E_M = f(I_c)$ sont donnés sur la figure ci-contre.

Quadrant 1 : la machine tourne en marche avant et fonctionne en moteur.

Quadrant 2 : la machine tourne en marche avant et fonctionne en génératrice.

Quadrant 3 : la machine tourne en marche arrière et fonctionne en moteur.

Quadrant 4 : la machine tourne en marche arrière et fonctionne en génératrice.



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: convertisseurs statiques

Commande séquentielle :

On ne fait travailler que deux interrupteurs :

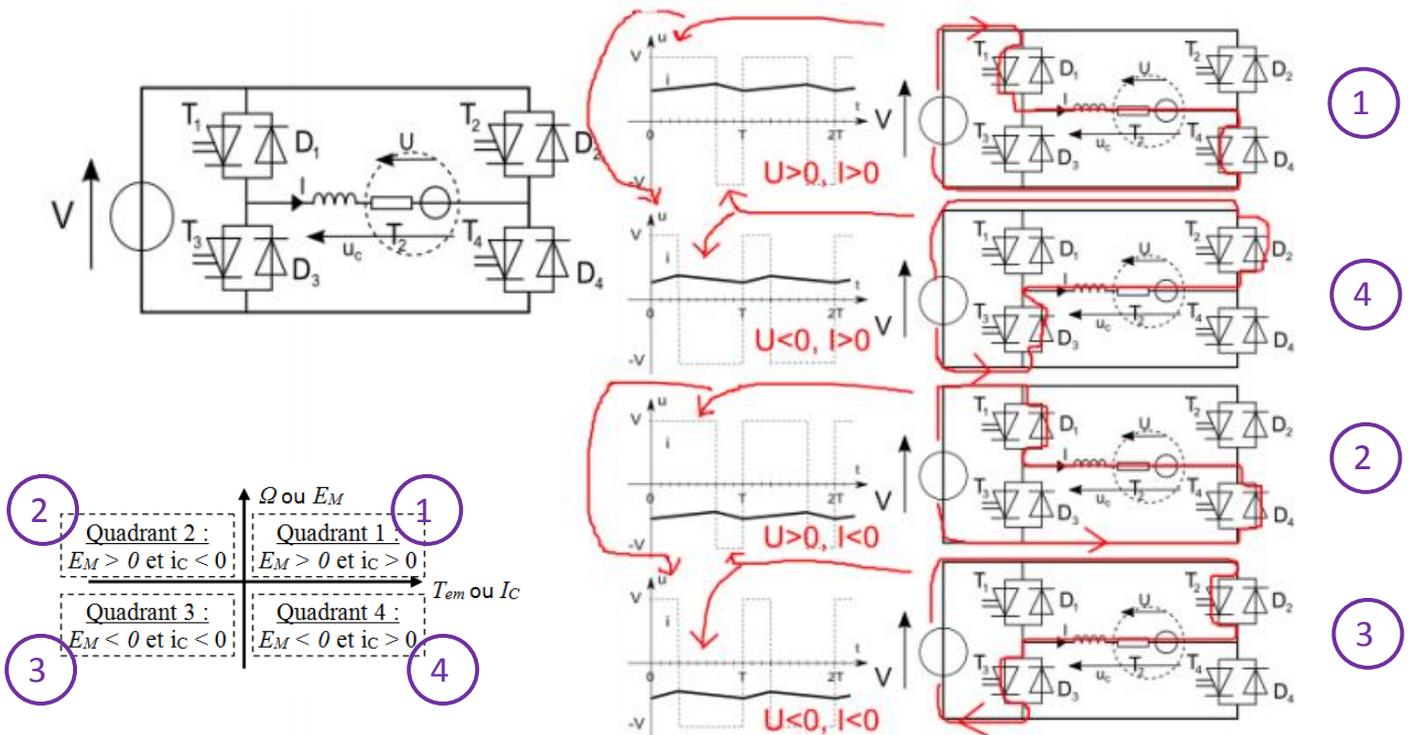
- L'un, fermé en permanence joue le rôle d'interrupteur d'aiguillage ;
- L'autre, fermé et ouvert à la période de fonctionnement du hacheur assure le hachage.

Les interrupteurs T_1 et T_4 sont commandés simultanément avec la période T . Ils sont commandés à la fermeture pour $t \in [0; \alpha T]$ et ouverts le reste de la période.

Les interrupteurs T_2 et T_3 sont commandés simultanément avec la période T . Ils sont commandés à la fermeture pour $t \in [\alpha T; T]$ et ouverts le reste de la période.

- lorsque i est positive, la machine fonctionne en **moteur** si $E > 0$, soit $\alpha > 0.5$ et en **génératrice** si $E < 0$, soit pour $\alpha < 0.5$
- lorsque i est négative, la machine fonctionne en **génératrice** si $E > 0$ et en **moteur** si $E < 0$

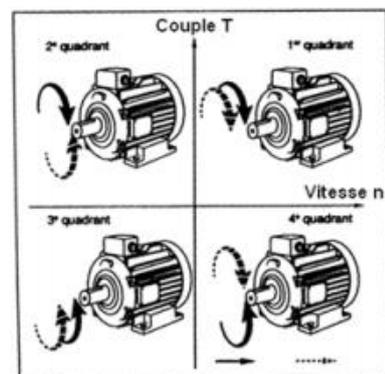
Un tel hacheur permet un fonctionnement de la MCC dans les 4 quadrants.



On a alors $\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1) \times V$

Ce montage permet un fonctionnement dans les 4 quadrants

voir lien: http://sitelec.org/flash/hacheur_transistors.htm

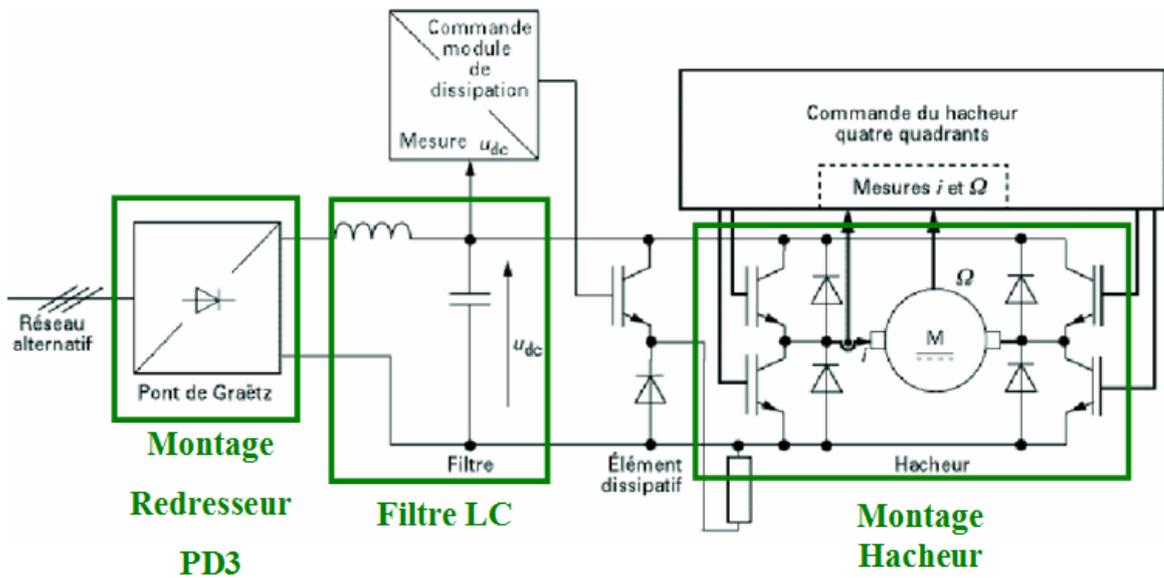
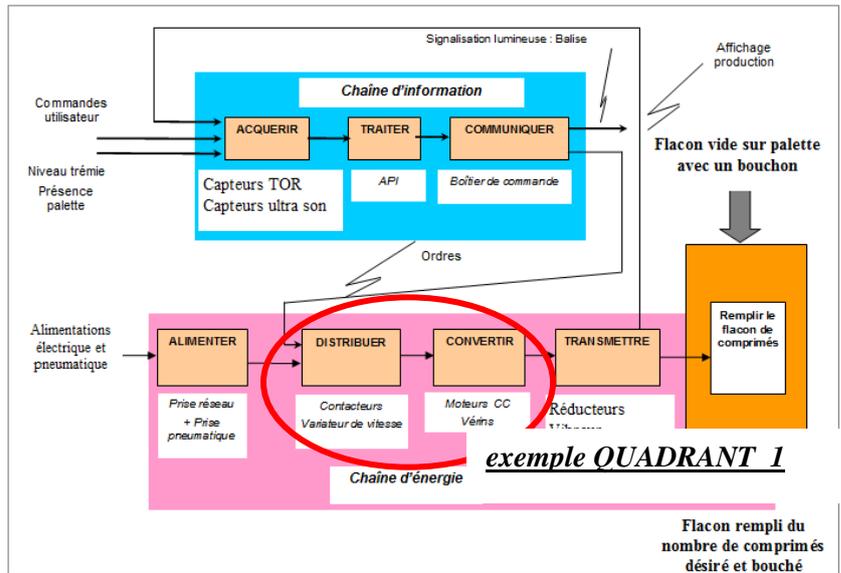




Etude de la chaîne de conversion électromécanique: convertisseurs statiques

4.3.4. Exemples d'application

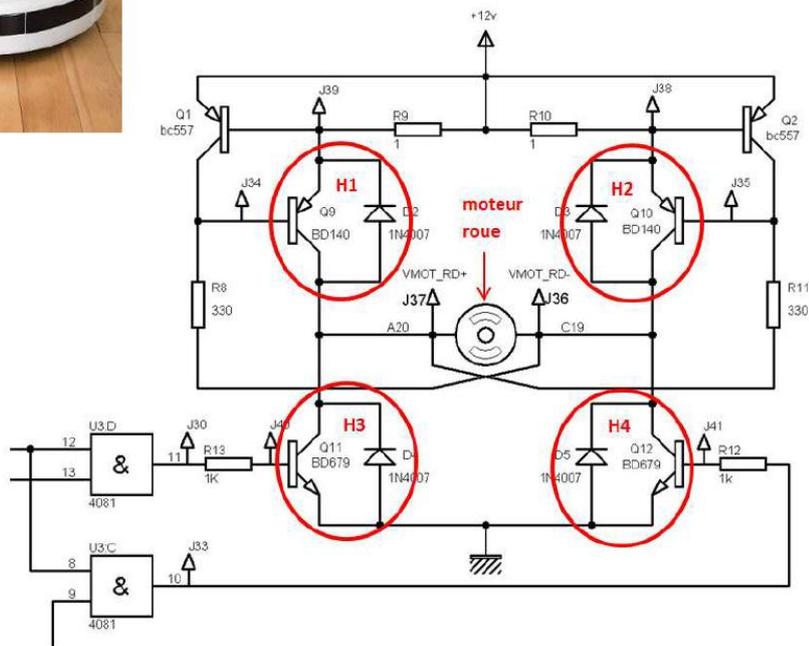
Machine de conditionnement





Etude de la chaîne de conversion électromécanique: convertisseurs statiques

Aspirateur ROOMA:



MAXPID:

Exemple du Maxpid

