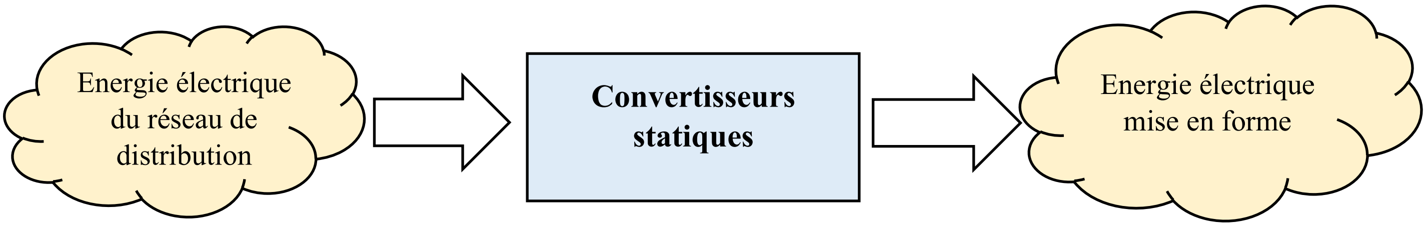
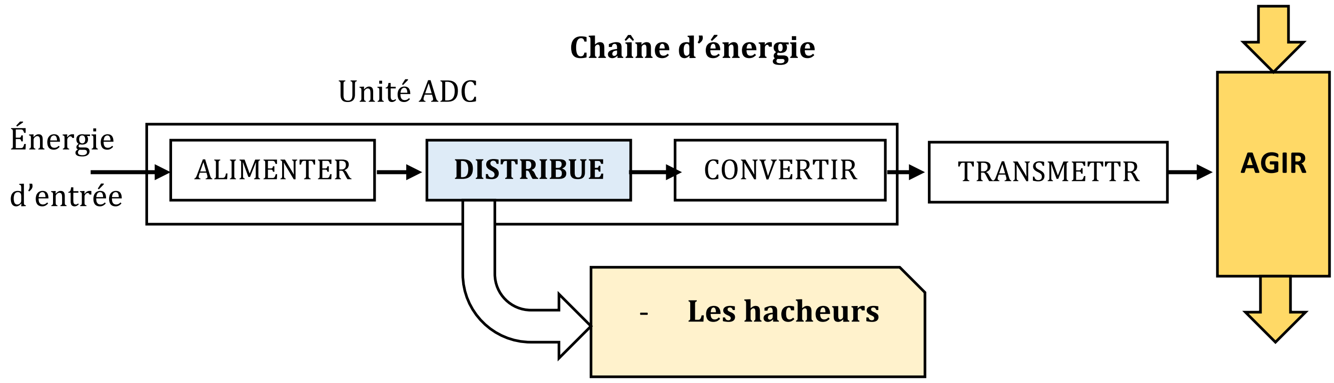
# CH6 : Les Hacheurs

Avec le développement des composants électroniques capables de tenir des courants et des tensions de plus en plus élevés, une nouvelle façon de gérer 1'énergie électrique s'est développée depuis quarante ans. On la dénomme « électronique industrielle » ou « **électronique de puissance** »

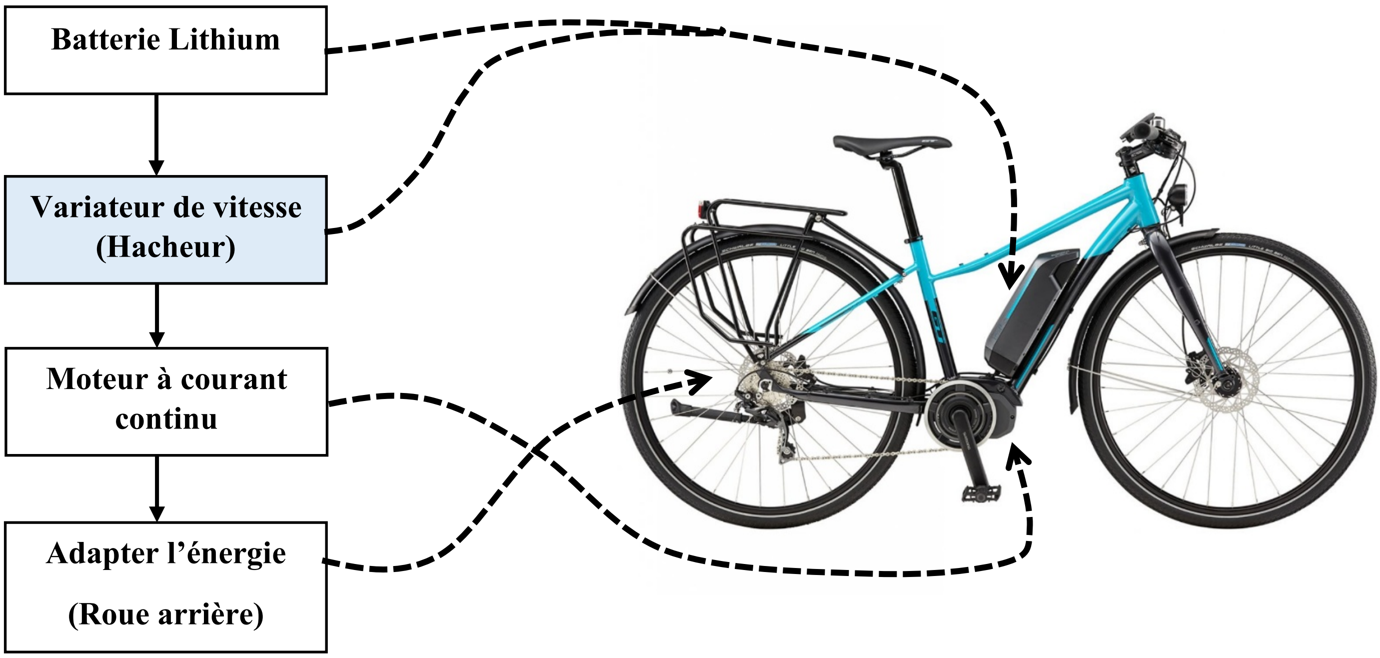
**L'électronique de puissance** est une branche de l'électricité qui traite de **la modification de la présentation de l'énergie électrique** pour l'adapter dans les meilleures conditions aux multiples utilisations. L'électronique de puissance est la base des variateurs de vitesses.




Dans l'architecture fonctionnelle générique d'un système pluritechnologique, les convertisseurs statiques assurent la fonction « **DISTRIBUER** » de la chaîne d'énergie.




Exemple : **Vélo à assistance électrique**



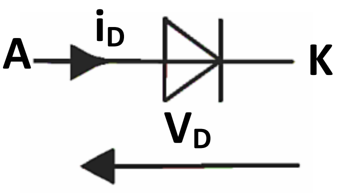
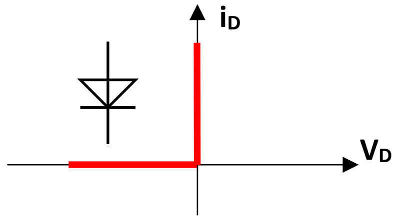
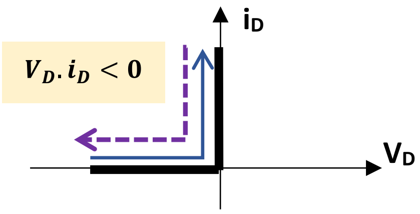
# I. Notion de base

## 1- Les interrupteurs de puissance utilisés dans les hacheurs

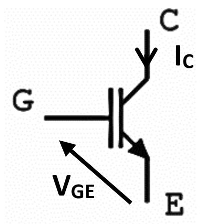
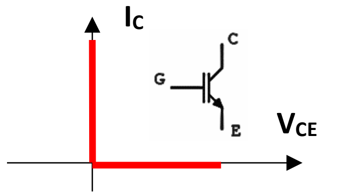
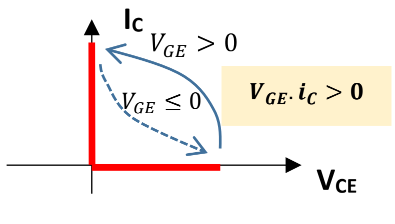
Dans les convertisseurs statiques, les composants électroniques travaillent en commutation. On se limite dans ce cours aux interrupteurs les plus utilisés dans les structures usuelles des hacheurs, à savoir l'**IGBT** et les **diodes de puissance**.

### 1.1. Interrupteur à un seul segment

#### a- Les diodes de puissance

| Symbole | Caractéristique statique | Caractéristique dynamique |
|---|---|---|
|  |  |  |
| **Commande** | **Condition** | **Choix** |
| Amorçage et blocage spontanés | La diode est **passante** si le **courant** et la **tension** à ses bornes sont positives et elle est bloquée si le courant est nul | • $V_{RRM} > Vd_{max}$<br>• $I_{F\,(AV)} > < i_D >$ |

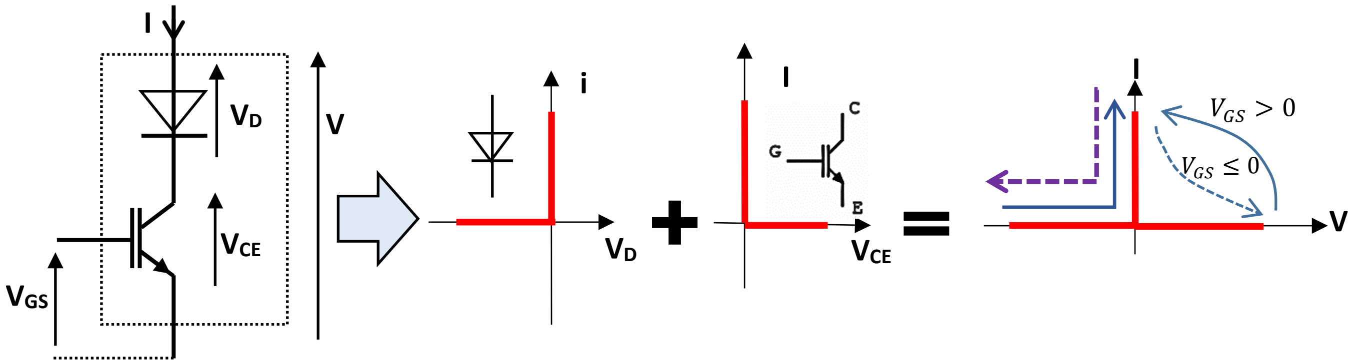
#### b- Transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

| Symbole | Caractéristique statique | Caractéristique dynamique |
|---|---|---|
|  |  |  |
| **Commande** | **Condition** | **Choix** |
| **Amorçage** et **blocage** commandés par VGE | IGBT est **saturé** si la tension $V_{GE} > 0$ et bloqué si elle est nulle ou inférieur à 0 ($V_{GE} \leq 0$) | • $V_{CES} > V_{CE\,max}$<br>• $I_{C\,(DC)} > I_{C\,eff}$ |

### 1.2. Interrupteur à deux segments

Les interrupteurs étudiés jusqu'à maintenant sont unidirectionnels en courant et unidirectionnels en tension. Parfois, nous avons besoin un composant bidirectionnel, comme le cas de la commande en vitesse et en freinage de la machine à courant continu, où le courant est positif cas moteur et négatif cas générateur (**un composant bidirectionnel en courant est nécessaire**).

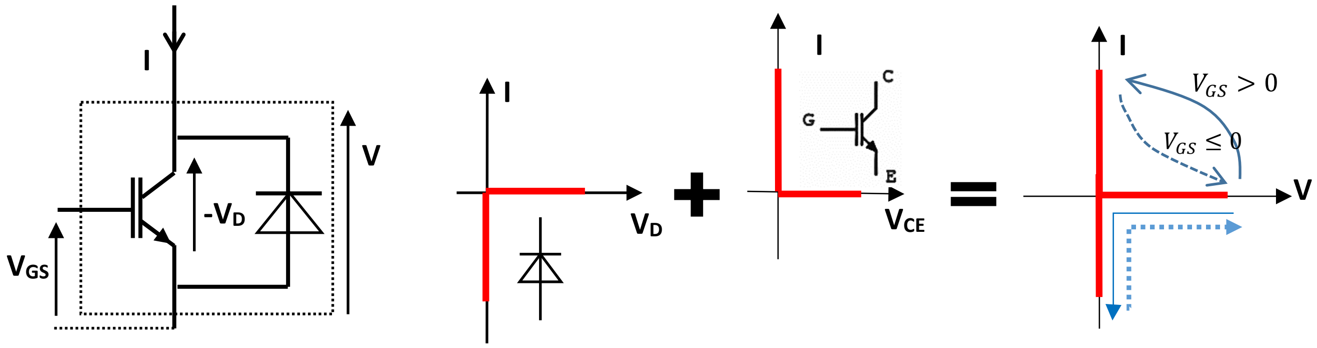
### a- Association en série d'une diode et d'un IGBT




- La tension est la somme des tensions aux bornes de chaque interrupteur
- Le courant est identique pour les deux

On obtient alors un interrupteur **unidirectionnel** en courant et **bidirectionnel** en tension

### b- Association en anti-parallèle d'une diode et d'un IGBT



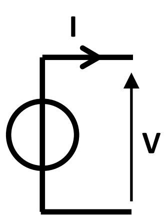

- La tension est identique pour les deux
- Le courant est la somme des courant dans chaque interrupteur

On obtient alors un interrupteur **unidirectionnel** en tension et **bidirectionnel** en courant

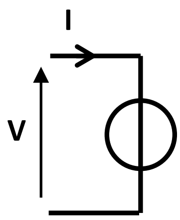
## 2- Les sources électriques

### 3.1. Source de tension

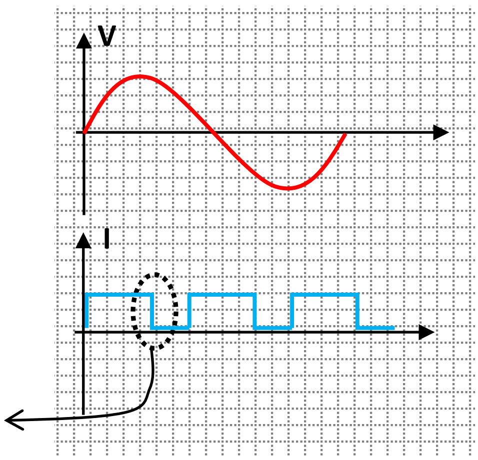
Une source de tension est un dipôle pour lequel la valeur instantanée de la tension **ne subit pas de discontinuité** lors des commutations.




Convention générateur

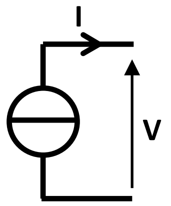



Convention récepteur

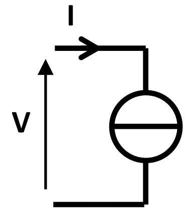


### 3.2. Source de courant

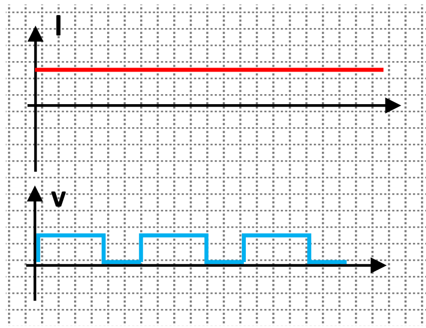
Une source de courant est un dipôle pour lequel la valeur instantanée du courant **ne subit pas de discontinuité** lors des commutations.




Convention générateur



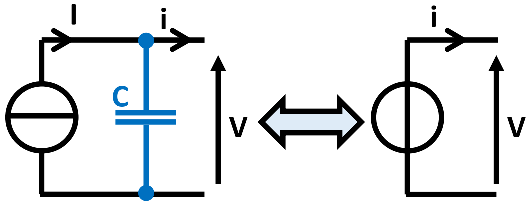

Convention récepteur



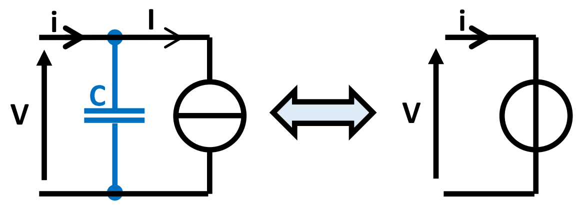

### 3.3. Transformation de sources

- **Source de tension**

  Un **condensateur C** en parallèle sur une source de courant continu I la transforme en **source de tension en régime commuté**.



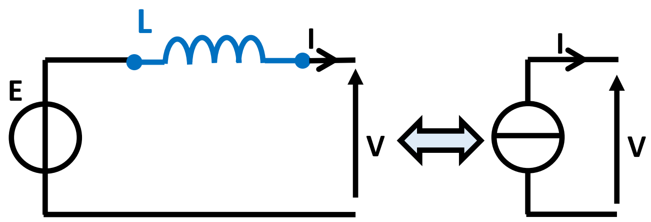

Convention générateur



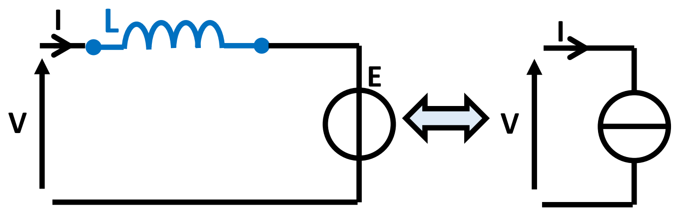

Convention récepteur

- **Source de courant**

  Une **inductance L** en série sur une source de tension continue V la transforme en **source de courant en régime commuté.**



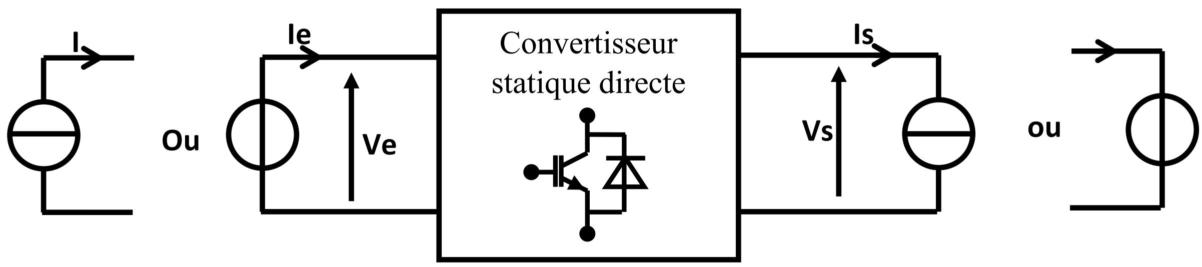

Convention générateur



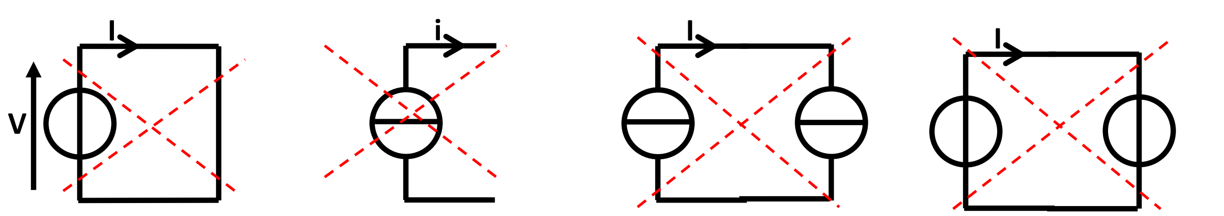

Convention récepteur

### 3.4. Les règles d'association des sources

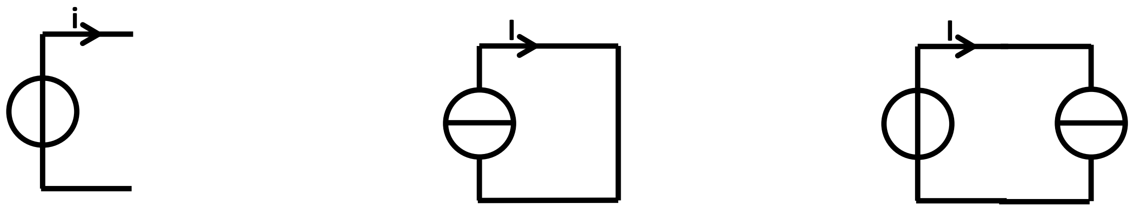
Un convertisseur statique direct est donc constitué d'interrupteurs qui vont interconnecter périodiquement un source d'entrée et une charge, encore dénommée source de sortie compte tenu de sa réversibilité potentielle.



Toutes les associations de sources ne sont pas permises, en particulier




**les configurations permises**



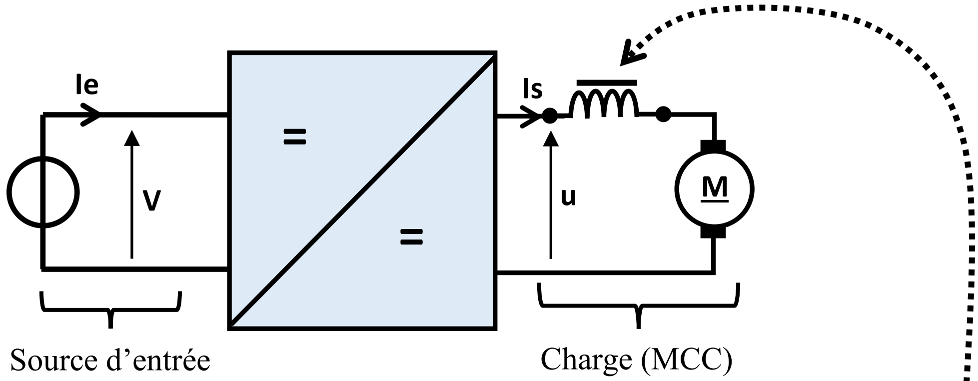

!

- Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée mais elle peut être ouverte.
- Une source de courant ne doit jamais être ouverte mais elle peut être court-circuité.
- Il ne faut jamais connecter entre elles deux sources de même nature.

# II. Hacheur

## 1. Généralité

Les hacheurs réalisent une conversion **continu–continu**. Leur principal domaine d'application est l'alimentation des **machines à courant continu** (MCC), en vue d'obtenir une **vitesse variable**.




Dans ce cours, on se limite :

- Transfert de l'énergie dans les **deux sens** ou **non**.
- La **source d'entrée** est une **source de tension** (Batterie ou un redresseur).
- La charge est de type courant (induit de MCC avec une **bobine de lissage** → charge R ,L ,E)
- La conduction dans la charge est supposée continue (charge purement **inductive**)

- Le convertisseur est un convertisseur à liaison direct
  - Les composants de puissances sont supposés idéaux
  - Les pertes de commutation sont supposées nulles.

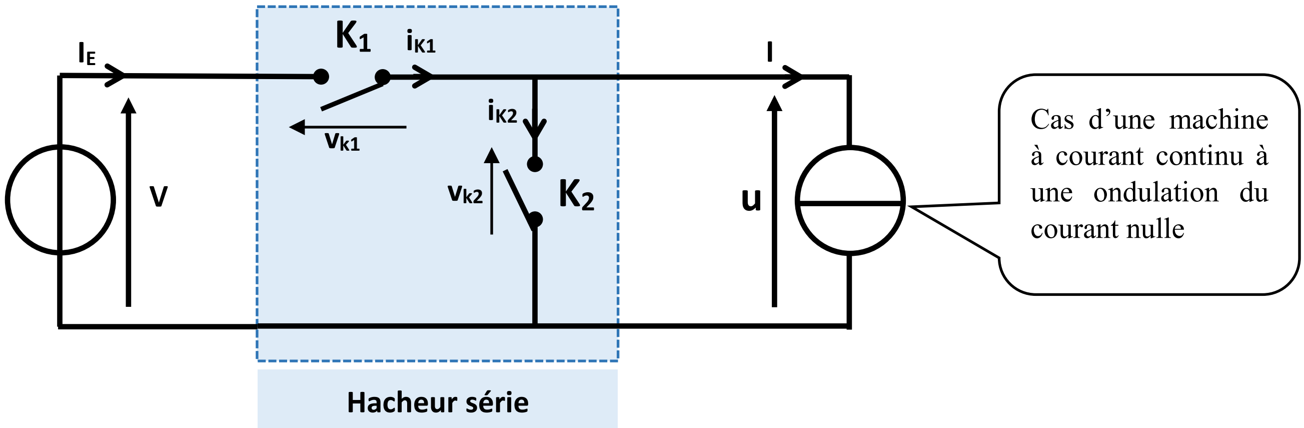
## 2. Hacheur série

### 2.1. Structure

Un **hacheur série** permet d'associer **une source de tension** dont la tension est toujours positive avec **une source de courant**, dans un premier temps le **courant ne peut devient négative** ($\boldsymbol{i(t) > 0}$).

**Hypothèses :**

- La charge est une machine à courant continu ➔ **source de courant**
- Les ondulations de courant sont négligeables ➔ $\boldsymbol{i(t) = I = C^{ste}}$




Contenu des règles d'association des sources ➔ K1 et K2 fonctionnant de manière complémentaire et périodique : $\boldsymbol{K1 = \overline{K2}}$ ( pour éviter le court-circuit de la source d'entrée)

### 2.2. Mise en équations

Les interrupteurs K1 et K2 fonctionnant de manière périodique suivant :

- K1 est fermé et K2 est ouvert de **0** à $\alpha T$ **:** $(\boldsymbol{K1 = 1}$ et $\boldsymbol{K2 = 0})$ ➔ $\boldsymbol{t \in [0\,, \alpha T]}$
- K2 est fermé et K1 est ouvert de $\alpha T$ à $T$ **:** $(\boldsymbol{K1 = 0}$ et $\boldsymbol{K2 = 1})$ ➔ $\boldsymbol{t \in [\alpha T, T]}$

- ***La tension de sortie u***

- $\boldsymbol{u = V}$: $si\ t \in [0\,, \alpha T]$ $car$ $(K1 = 1$ et $K2 = 0)$
- $\boldsymbol{u = 0}$ : $si\ t \in [\alpha T, T]$ $car$ $(K1 = 0$ et $K2 = 1)$

- ***La tension au borne de l'interrupteur K1***

N.B : la tension au borne d'un interrupteur est nulle, s'il est fermé.

On a : $V = v_{k1} + v_{k2}$

- $\boldsymbol{v_{k1} = 0}$ **:** $si\ t \in [0\,, \alpha T]$ car *K1 est fermé*
- $\boldsymbol{v_{k1} = V}$ *si* $t \in [\alpha T, T]$ *car K2 est fermé, donc* $\boldsymbol{v_{k2} = 0}$

- ***La tension au borne de l'interrupteur K2***

  On a : $V = v_{k1} + v_{k2}$

- $\boldsymbol{v_{k2} = V}$ **:** *si* $t \in [0\,, \alpha T]$ car *K1 est fermé, donc* $v_{k1} = 0$
- $\boldsymbol{v_{k2} = 0}$ *si* $t \in [\alpha T, T]$ *car K2 est fermé*

- ***Le courant dans l'interrupteur K1***

  N.B : Le courant dans un interrupteur est nul, s'il est ouvert.

  On a : $I = i_{k1} - i_{k2}$

- $\boldsymbol{i_{k1} = I}$ **:** *si* $t \in [0\,, \alpha T]$ car *K2 est ouvert, donc* $i_{k2} = 0$
- $\boldsymbol{i_{k1} = 0}$ *si* $t \in [\alpha T, T]$ *car K1 est ouvert.*

- ***Le courant dans l'interrupteur K2***

  On a : $I = i_{k1} - i_{k2}$

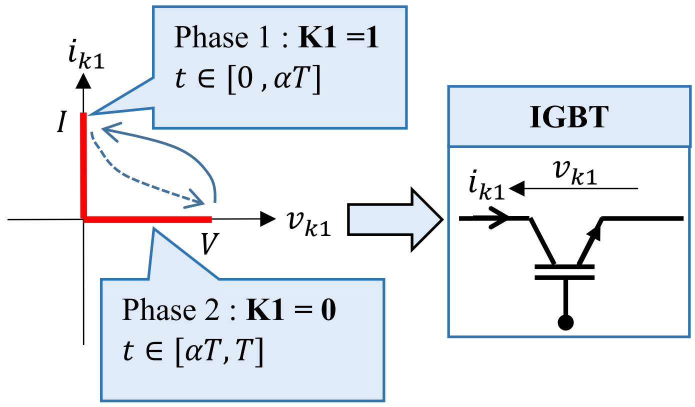
- $\boldsymbol{i_{k2} = 0}$ **:** *si* $t \in [0\,, \alpha T]$ car *K2 est ouvert,*
- $\boldsymbol{i_{k2} = -I}$: *si* $t \in [\alpha T, T]$ *car K1 est ouvert, donc* $i_{k1} = 0$.
-

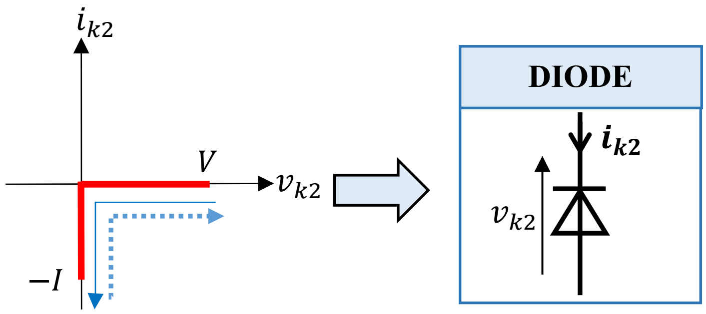
## 2.3. Formes d'ondes et choix des interrupteurs

Pour choisir un interrupteur électronique, il vient d'évaluer les formes d'onde de courant et de tension de chaque interrupteur.

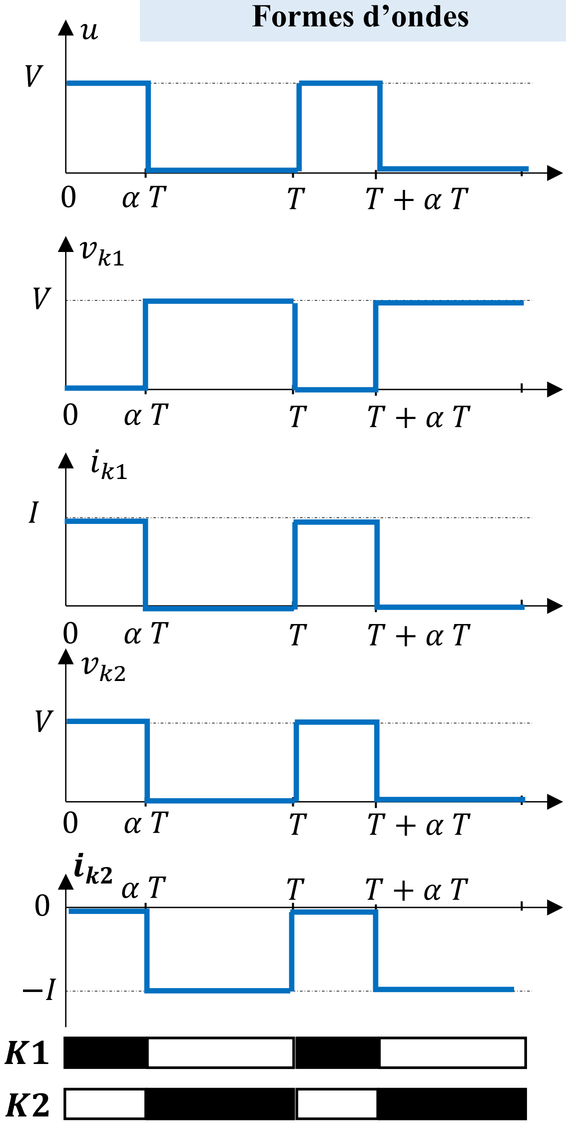
- Interrupteur K1 ➔ $v_{k1}$ et $i_{k1}$
- Interrupteur K2 ➔ $v_{k2}$ et $i_{k2}$

- **Choix de l'interrupteur K1 et K2**



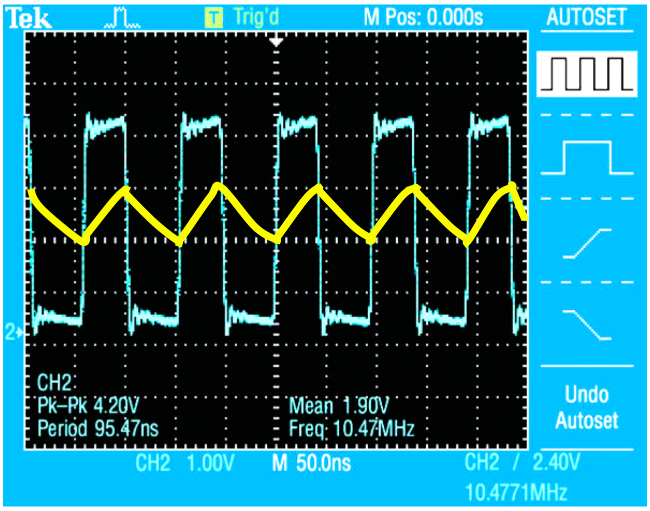

**Formes d'ondes**



## 2.4. Imperfection de la charge

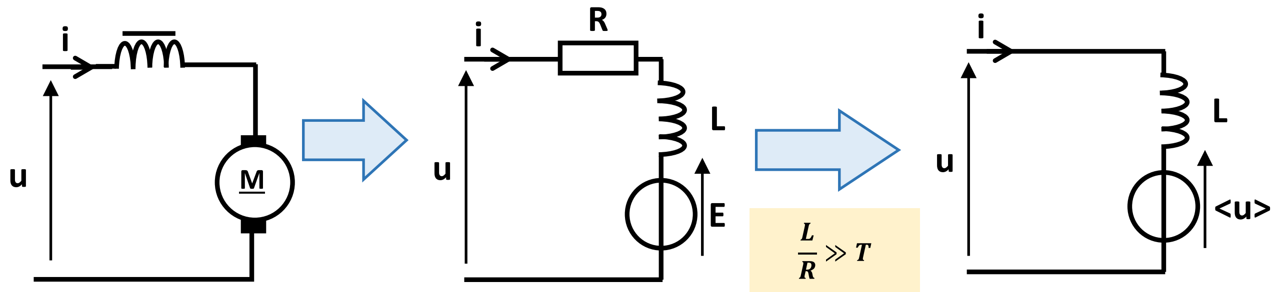
- ***Problématique***

La charge du hacheur est une MCC en série avec une bobine de lissage, en pratique, l'**ondulation** du courant n'est pas nul, sa revient à dire que la bobine de lissage à une valeur finie sa d'une part, d'autre part, la forme en créneaux de la tension a ses bornes font apparaitre sur le courant.




- ***Le modèle de la charge***

Une MCC est modélisée par une source de tension E (fcém) en série avec une résistance R et une inductance L (inductance totale de l'induit et l'inductance de lissage).

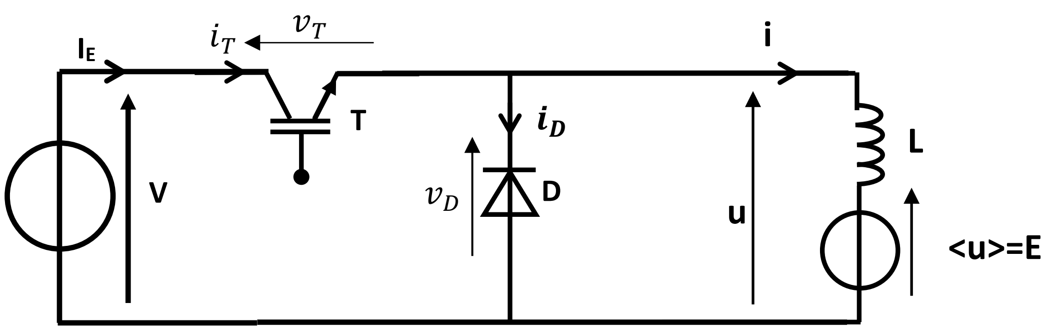



Charge du hacheur | Modèle **1** | Modèle **2**

**Hypothèse de linéarité** :

> Une MCC **s'accommode** fort bien d'une tension présentant **des variations instantanées importantes** : l'induit ne voit que **la valeur moyenne de la tension**. Un lissage de courant est nécessaire pour respecter le fonctionnement de la machine.
>
> Il est donc légitime de faire l'hypothèse simplificatrice suivante : $\frac{L}{R} \gg T$ ( T est la période de hachage)

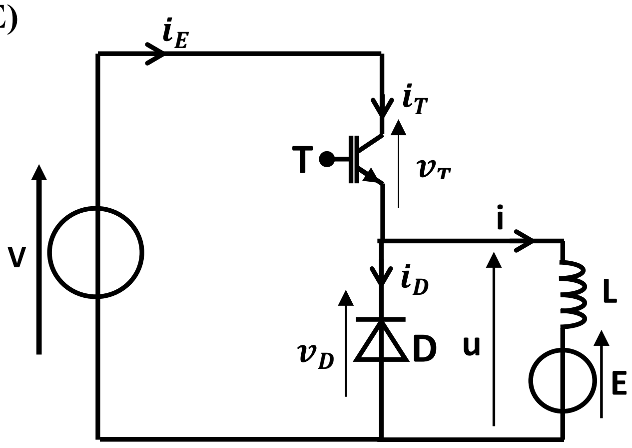
Le schéma final d'un hacheur couplé à un modèle de la machine à courant continu :



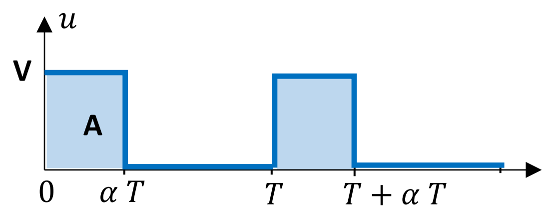
### 2.5. Etude du hacheur alimente une charge (L – E)

On peut distinguer deux phases :

| Phase motrice active | Phase motrice en roue libre |
|---|---|
| $t \in [0\,,\alpha T]$ | $t \in [\alpha T, T]$ |
| • **T** est passant<br>• **D** est bloquée | • **T** est bloqué<br>• **D** est passante |




**a. La valeur moyenne de la tension u(t)**




Par définition : $< \boldsymbol{u} >= \frac{1}{T}\int_0^T \boldsymbol{u(t)\,dt}$

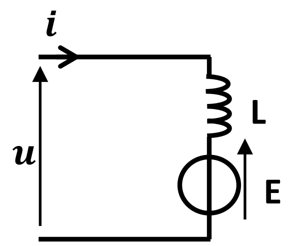
Une autre méthode : $< \boldsymbol{u} >= \frac{\boldsymbol{Aire}}{\boldsymbol{T}}$

D'où : $< u >= \frac{A}{T} = \frac{V.\ \alpha\, T}{T} \quad \Rightarrow \quad \boxed{< \boldsymbol{u} >= \boldsymbol{\alpha.V}}$

**b. La relation liée entre $< u >$ et la source de tension E**

**N.B :** *une inductance L, la valeur moyenne de la tension est nulle*

D'après la loi des mailles appliquée à ce schéma ci-contre :

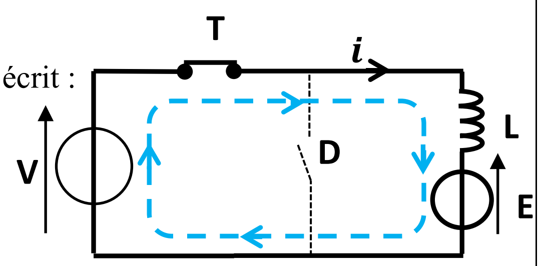



$u(t) = E + L\,\frac{d\,i(t)}{dt}$

$< u(t) >=< E > + \underbrace{< L\,\frac{d\,i(t)}{dt} >}_{=\,0} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\boldsymbol{E} =< \boldsymbol{u} > = \boldsymbol{\alpha.V}}$

**c. Expression du courant i(t)**

- **Pour $\boldsymbol{t} \in [\mathbf{0}\,,\boldsymbol{\alpha T}]$ : Phase motrice active**




- L'équation différentielle régissant l'évolution de i(t) s'écrit :

  $L\,\frac{d\,i}{dt} = V - E = V - < u > = (1 - \alpha\,).V$

- La solution générale de l'équation différentielle :

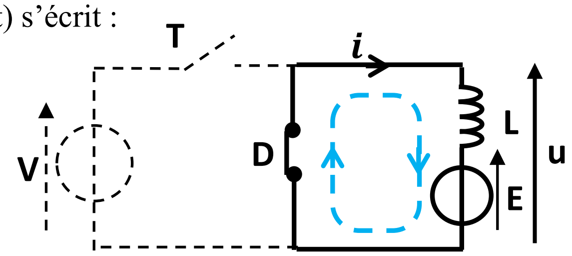
  $i(t) = \frac{(1-\alpha\,).\,V}{L}\,t + C^{ste}$

- Les conditions initiales s'écrivent :

  A $t = 0 \Rightarrow i(0) = I_{min}$

  Donc la solution finale de i(t) est : $\boxed{\boldsymbol{i(t)} = \frac{\boldsymbol{(1-\,\alpha\,).\,V}}{\boldsymbol{L}}\,\boldsymbol{t} + \boldsymbol{I_{min}} \quad \text{avec } t \in [0\,,\alpha T]}$

- **Pour $\boldsymbol{t} \in [\boldsymbol{\alpha T}\,,\boldsymbol{T}\,]$ : Phase motrice à roue libre**




- L'équation différentielle régissant l'évolution de i(t) s'écrit :

  $L\,\frac{d\,i}{dt} = -E = -< u > = -\,\alpha\,.V$

- La solution générale de l'équation différentielle :

  $i(t) = -\,\frac{\alpha\,.V}{L}\,t + C'^{ste}$

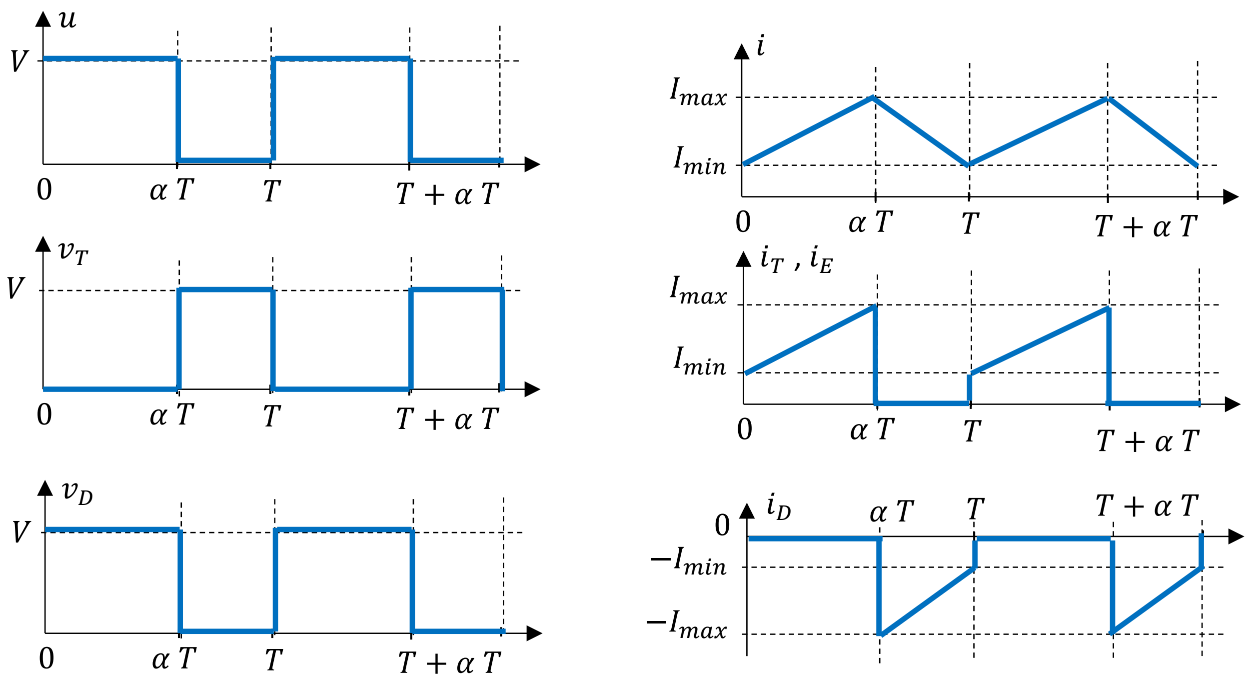
- Les conditions initiales s'écrivent :

  A $t = \boldsymbol{\alpha\, T} \Rightarrow i(\alpha\, T) = I_{max}$

  Donc la solution finale de i(t) est : $i(t) = -\frac{\alpha . V}{L}\,(t - \alpha\, T) + I_{max}$ avec $t \in [\alpha T, T]$

### d. Les formes d'ondes

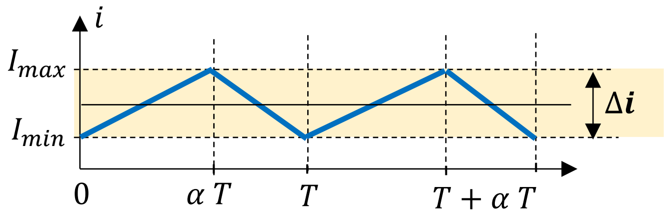
Les formes d'ondes des différentes grandeurs sont les suivants :




### e. Calcul de l'ondulation du courant $\Delta \boldsymbol{i}$

L'ondulation crête à crête du courant i(t) a pour expression : $\Delta \boldsymbol{i} = I_{max} - I_{min}$

Son expression peut être déterminer a partir de l'une des deux relations précedentes de i(t).

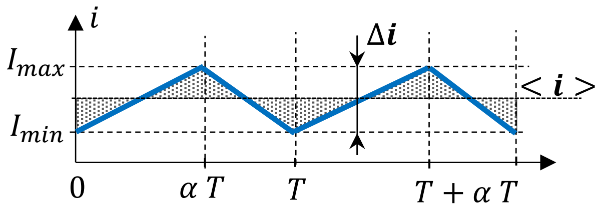



On a : $\boldsymbol{i(t)} = \frac{(\mathbf{1} - \boldsymbol{\alpha}).\,\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{L}}\,\boldsymbol{t} + \boldsymbol{I_{min}}$ et à $\boldsymbol{t} = \boldsymbol{\alpha\, T} \Rightarrow i(\alpha\, T) = \boldsymbol{I_{max}}$

Donc : $I_{max} = \frac{(\mathbf{1} - \boldsymbol{\alpha}).\,\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{L}}\,\boldsymbol{\alpha\, T} + \boldsymbol{I_{min}} \Rightarrow$ $\Delta \boldsymbol{i} = \frac{\boldsymbol{\alpha}\,(\mathbf{1} - \boldsymbol{\alpha}).\,\boldsymbol{V}.\,\boldsymbol{T}}{\boldsymbol{L}}$ ou $\Delta \boldsymbol{i} = \frac{\boldsymbol{\alpha}\,(\mathbf{1} - \boldsymbol{\alpha}).\,\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{L}.\,\boldsymbol{F}}$

### f. Expression de la valeur moyenne et efficace du courant

- La valeur moyenne : $< i >= \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$
- La valeur efficace : $I_{eff} = \sqrt{< i >^2 + \, I_{ond}{}^2}$
- Courant maximum et minimum :
  - $\boldsymbol{I_{min}} = < \boldsymbol{i} > - \frac{\Delta \boldsymbol{i}}{\mathbf{2}}$
  - $\boldsymbol{I_{max}} = < \boldsymbol{i} > + \frac{\Delta \boldsymbol{i}}{\mathbf{2}}$



### g. L'ondulation du courant et ses conséquences

Une augmentation de l'ondulation $\Delta i$, entrainra :

- Augmentation du courant efficace $I_{eff}$ $\left(I_{eff} = \sqrt{< i >^2 + \; {I_{ond}}^2}\right)$
- Les pertes joule de l'induit augmentent
- Les pertes de commutation augmentent
- Echauffement de la machine
- La vibration de la machine (création d'un contre couple)
- Le rendement de la machine est plus faible qu'avec le courant continu

On a intérêt à réduire l'ondulation crête à crête $\Delta i$ du courant pour se rapprocher d'un facteur forme $F = \frac{I_{eff}}{<i>}$ égal à l'unité. ***Comment peut-on alors réduire l'ondulation du courant ?***

**L'expression de l'ondulation maximale $\Delta i_{max}$.**

L'ondulation du courant est maximale pour $\boldsymbol{\alpha = 0.5}$ $\left(\frac{d\Delta i}{d\alpha} = 0 \Rightarrow 1 - 2\alpha = 0\right)$, donc l'ondulation maximale du courant est :

$$\boxed{\Delta i_{max} = \frac{V \,.\, T}{4\,.L} = \frac{V}{4\,.L.F}}$$

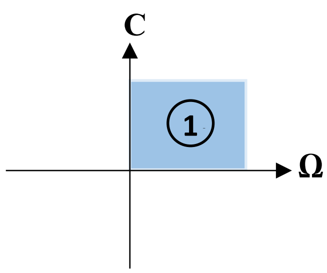
**Solutions**

Pour réduire l'ondulation de courant, on doit agir sur :

- Augmentation de la valeur de la **bobine de lissage** (solution limitée par **l'encombrement** et au **coût**)
- Augmentation de la **fréquence de hachage** (solution limitée par les **performances des interrupteurs de puissances**)

**!**

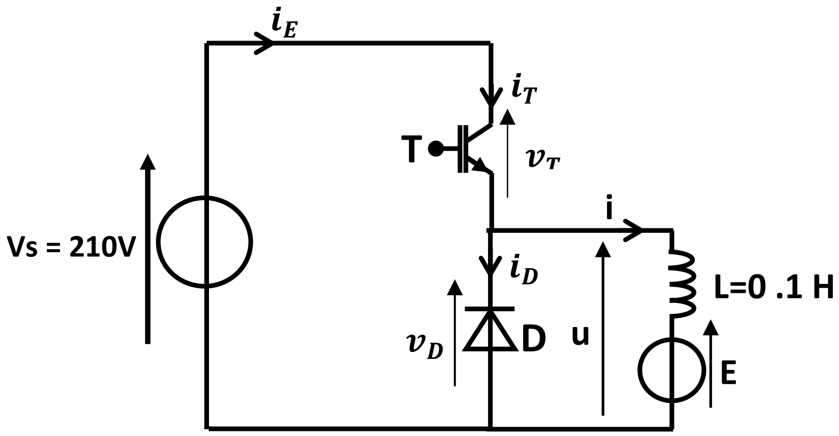
Cet hacheur n'est ni réversible en tension ($< u >> 0$), ni réversible en courant ($< i >> 0$),
Il convient pour piloter la MCC dans le quadrant 1 du plan couple-vitesse C(Ω).



Exercice 1 :

On considère un montage avec un IGBT, une diode parfaite et l'induit d'une machine à courant continu à aimants permanents équivalent à une source de tension E et une inductance pure L. T est commandé à la fermeture de 0 à αT et à l'ouverture de αT à T. La fréquence de découpage est de 10 Hz.

On considère que E est proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur : $E = K.N$
avec $K = 5.25\ 10^{-2}\ V/(tr/min)$




On suppose que le courant ne s'annule jamais et varie entre les valeurs minimale et maximale Imin et Imax

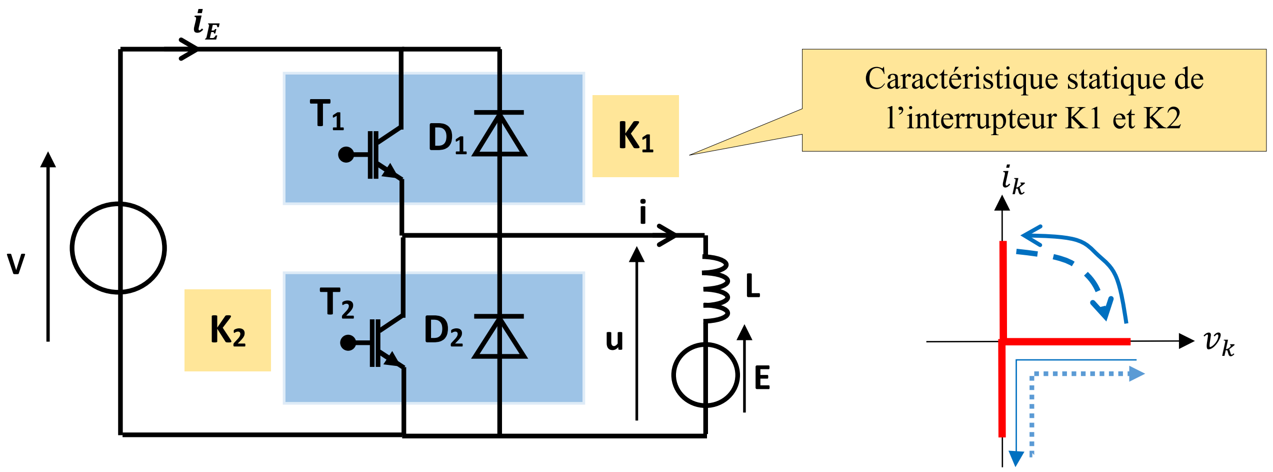
1- Rappeler le fonctionnement du hacheur et les règles d'associations des source.
2- Quel est le rôle de la diode D ainsi la bobine de lissage.
3- Déterminer l'expression de i(t) pour $t \in [0\ , \alpha\ T\ ]$ puis pour $t \in [\alpha\ T\ , T]$
4- Représenter les allures de $V_D$(t) et i(t)
5- Exprimer la valeur moyenne de la tension $V_D$(t) en fonction de $\alpha$ et Vs
   En déduire la relation entre E , $\alpha$ et Vs
6- Exprimer l'ondulation de courant $\Delta \boldsymbol{i} = I_{max} - I_{min}$ en fonction $\alpha$ , Vs, L et F
7- Représenter l'allure de $\Delta i$ en fonction de $\alpha$
8- Pour quelle valeur de $\alpha$ l'ondulation de courant est-elle maximale ? calculer $\Delta imax$
9- Comment peut-on réduire l'ondulation du courant

### 3. Hacheur réversible en courant

#### 3.1. La structure

La machine à courant continu peut être fonctionner en moteur ($i > 0$) et comme elle peut fonctionner en génératrice ($i < 0$), un convertisseur réversible en courant est donc nécessaire pour la commandée.

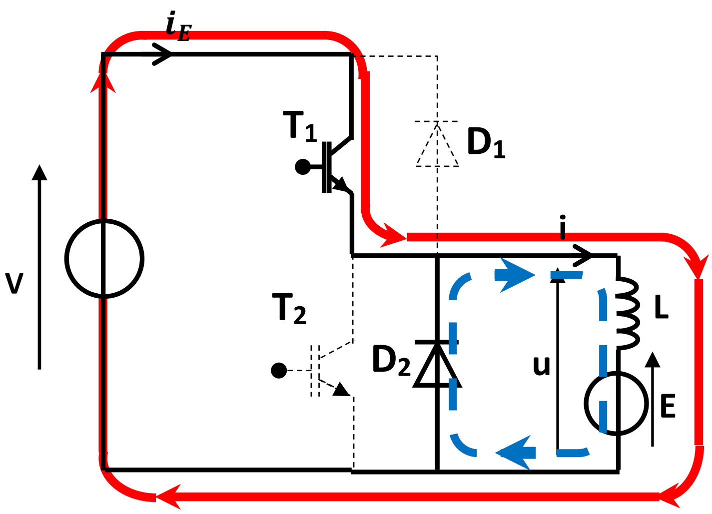
La structure suivant permet de réaliser un hacheur réversible en courant, donc celle-ci fonctionnera dans deux quadrant.




On a toujours K1 et K2 fonctionnant de manière complémentaire: $K1 = \overline{K2}$ ( pour éviter le court-circuit de la source d'entrée).

#### 3.2. Différentes modes de fonctionnement

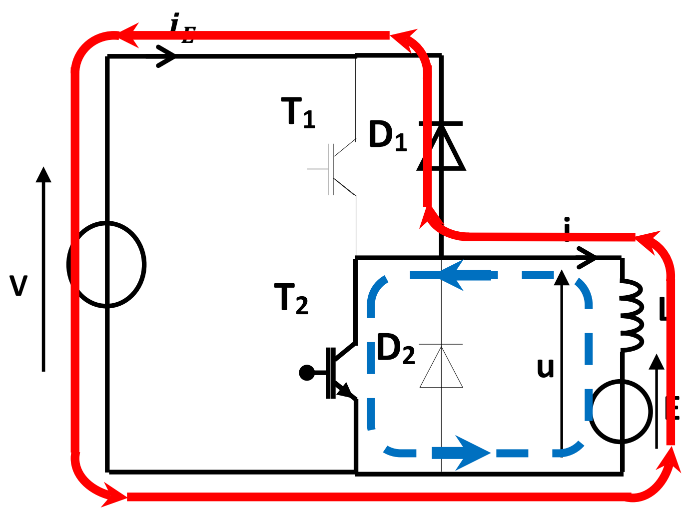
Fonctionnement si le courant $i > 0$




Phase motrice active $t \in [0\ ,\alpha T]$

Phase motrice en roue libre $t \in [\alpha T, T]$

Fonctionnement si le courant $i < 0$




Ce fonctionnement s'apparente à celui du **hacheur parallèle** (ou **survolteur**)

Phase génératrice active $t \in [0\ ,\alpha T]$

Phase génératrice en roue libre $t \in [\alpha T, T]$

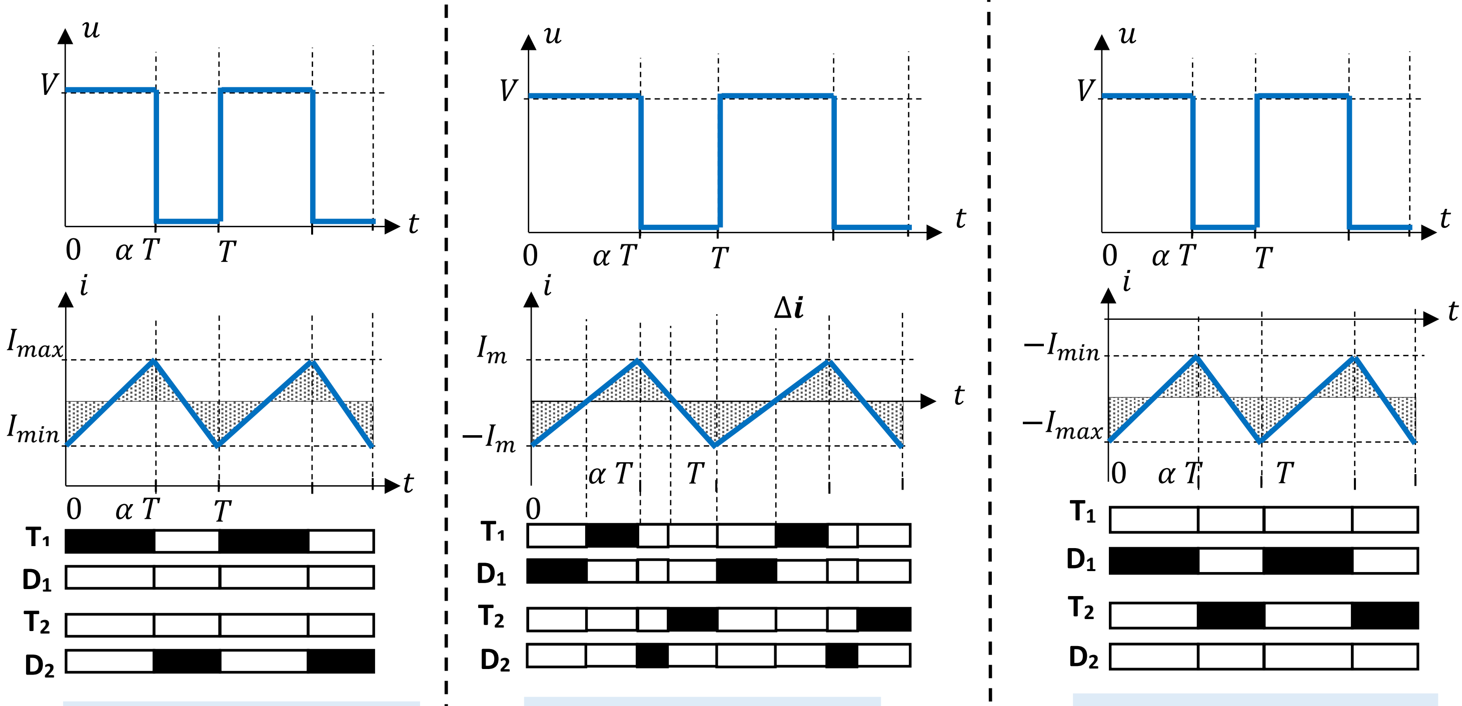
### 3.3. Formes d'ondes du courant et de la tension

L'IGBT commandé à l'amorçage, ne devient passant que si le courant d'induit prend la polarité correcte : **il faut $i > 0$ pour $T_1$ et $i < 0$ pour T**

**N.B :** si **Ki** est fermé alors l'un des semi-conducteur **Di** ou **Ti** le constituant conduit.

On distingue les trois (3) suivants

$< i >> 0$ | $< i >= 0$ | $< i >< 0$




Marche en MOTEUR

Dans le **quadrant 1**

Marche à vide :

**C=0**

Marche en FREINAGE

Dans le **quadrant 2**

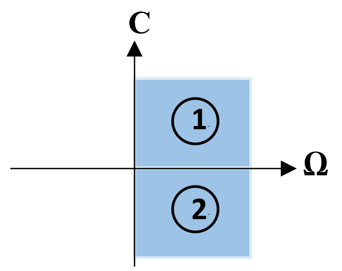
Comme le hacheur à un seul quadrant (hacheur série), on démontrait que :

- La valeur moyenne de tension : $< \boldsymbol{u} >= \boldsymbol{\alpha}.\boldsymbol{V}$
- L'ondulation du courant : $\Delta \boldsymbol{i} = \frac{\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{1} - \boldsymbol{\alpha}).\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{L}.\boldsymbol{F}}$

**!**

Cet hacheur n'est pas réversible en tension ( $< u >> 0$), mais **réversible en courant** ,

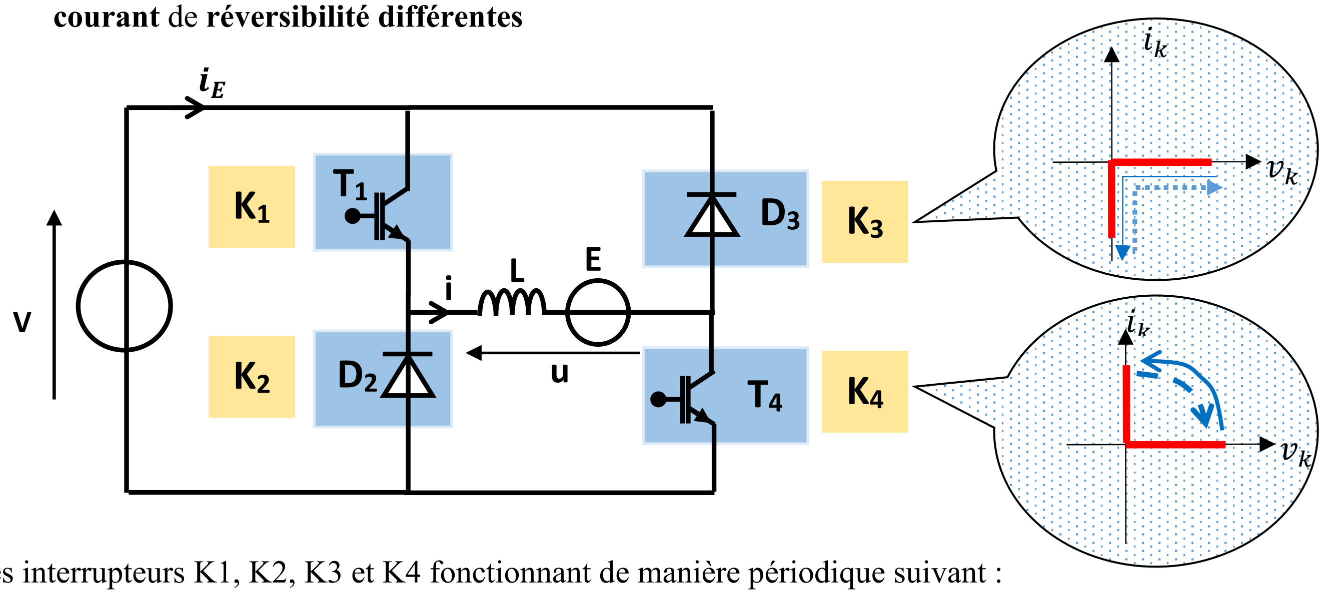
Il convient pour piloter la MCC dans le **quadrant 1 et 2** du plan couple-vitesse C(Ω).



## 4. Hacheur réversible en tension

### 4.1. Structure

La structure à quatre interrupteurs offre plus de possibilités que celle à deux interrupteur car elle permet le transfert de l'énergie dans les deux sens entre une **source de tension** et une **source de courant** de **réversibilité différentes**

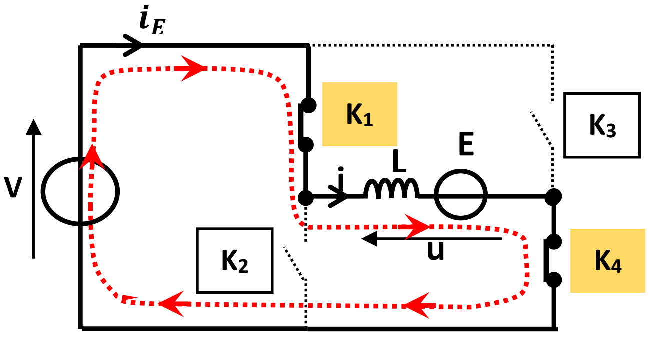



Les interrupteurs K1, K2, K3 et K4 fonctionnant de manière périodique suivant :

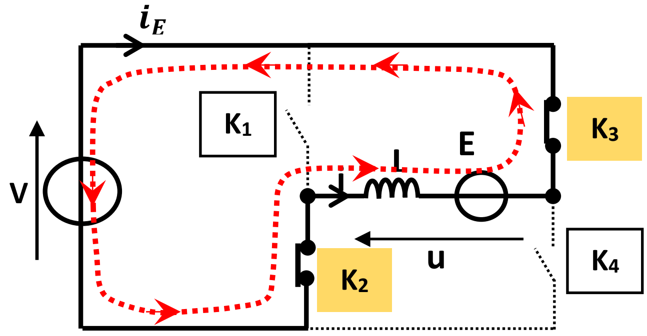
- **K1,K4** sont fermés et **K2 ,K3** sont ouverts de **0** à $\alpha T$ **:** $(\boldsymbol{K1} = \mathbf{1}$ et $\boldsymbol{K2} = \mathbf{0})$ ➔ $\boldsymbol{t} \in [\mathbf{0}, \boldsymbol{\alpha T}]$
- **K2 ,K3** sont fermés et **K1,K4** sont ouverts de $\alpha T$ à $T$ **:** $(\boldsymbol{K1} = \mathbf{0}$ et $\boldsymbol{K2} = \mathbf{1})$ ➔ $\boldsymbol{t} \in [\boldsymbol{\alpha T}, \boldsymbol{T}]$

### 4.2. Mise en équation

Phase motrice active



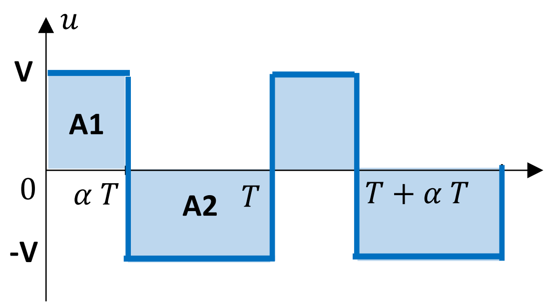

Phase génératrice active




- **La valeur moyenne de la tension u(t)**

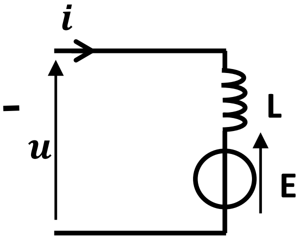
Par définition : $< \boldsymbol{u} >= \frac{\boldsymbol{Aire}}{\boldsymbol{T}}$

D'où : $< u >= \frac{A1+A2}{T} \Rightarrow$ $\boldsymbol{< u >= (2\alpha - 1).V}$




Et on a : $u(t) = E + L\,\frac{d\,i(t)}{dt}$

$$< u(t) >=< E > + \underbrace{< L\,\frac{d\,i(t)}{dt} >}_{= \mathbf{0}} \quad \Rightarrow$$




$\boldsymbol{E =< u > = (2\alpha - 1).V}$

- **L'expression du courant i(t)**
  - **Pour $t \in [0\,,\alpha T]$ : Phase motrice active**
    - L'équation différentielle régissant l'évolution de i(t) s'écrit :

      $L\,\frac{d\,i}{dt} = V - E = V - < u > = 2(1-\alpha\,).V$
    - La solution générale de l'équation différentielle :

      $i(t) = \frac{2\,(1-\alpha\,)\,.\,V}{L}\;t + C^{ste}$
    - Les conditions initiales s'écrivent :

      A $t = 0$ ➔ $i(0) = I_{min}$

      Donc la solution finale de i(t) est : $\boldsymbol{i(t) = \frac{2(1-\alpha\,)\,.\,V}{L}\,t + I_{min}}$ avec $t \in [0\,,\alpha T]$
  - **Pour $t \in [\alpha T\,, T\,]$ : Phase génératrice active**
    - L'équation différentielle régissant l'évolution de i(t) s'écrit :

      $L\,\frac{d\,i}{dt} = -\mathrm{V} - E = -\mathrm{V} - < u > = -\,2\alpha\,.V$
    - La solution générale de l'équation différentielle :

      $i(t) = -\,\frac{2\,\alpha\,.V}{L}\;t + C'^{ste}$
    - Les conditions initiales s'écrivent :

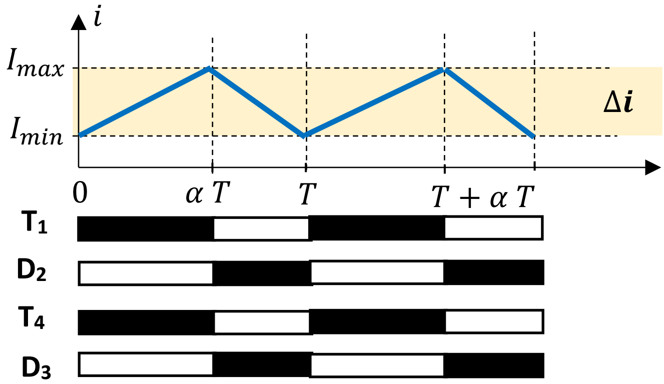
      A $t = \boldsymbol{\alpha\,T}$ ➔ $i(\alpha\,T) = I_{max}$

      Donc la solution finale de i(t) est : $i(t) = -\,\frac{2\,\alpha\,.V}{L}\,(t-\alpha\,T) + I_{max}$ avec $t \in [\alpha T, T]$

**4.3. L'ondulation de courant**

L'ondulation crête à crête du courant i(t) a pour expression : $\Delta \boldsymbol{i} = I_{max} - I_{min}$

Son expression peut être déterminer a partir de l'une des deux relations précedentes de i(t).




On a : $\boldsymbol{i(t) = \frac{2\,(1-\alpha\,)\,.\,V}{L}\,t + I_{min}}$ et à $\boldsymbol{t = \alpha\,T}$ ➔ $i(\alpha\,T) = \boldsymbol{I_{max}}$

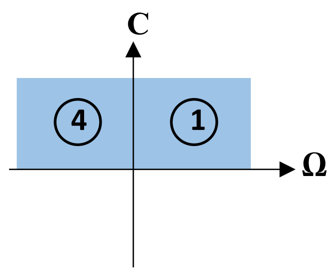
Donc : $I_{max} = \frac{\boldsymbol{(1-\alpha\,)\,.\,V}}{\boldsymbol{L}}\,\boldsymbol{\alpha\,T + I_{min}}$ ➔ $\boldsymbol{\Delta i = \frac{2\,\alpha\,(1-\alpha\,)\,.\,V\,.\,T}{L}}$ ou $\boldsymbol{\Delta i = \frac{2\alpha\,(1-\alpha\,)\,.\,V}{L\,.\,F}}$

!

Cet hacheur n'est pas réversible en courant ( $< i > > 0$), mais **réversible en tension** ,

Il convient pour piloter la MCC dans le **quadrant 1 et 4** du plan couple-vitesse C(Ω).

**La source de tension doit être réversible en courant**



## 5. Hacheur réversible en courant et en tension

### 5.1. Structure

Parmi les nombreuses possibilités offertes par la structure à quatre interrupteur ou **structure en pont**, l'une des plus utilisées correspond au hacheur reliant :

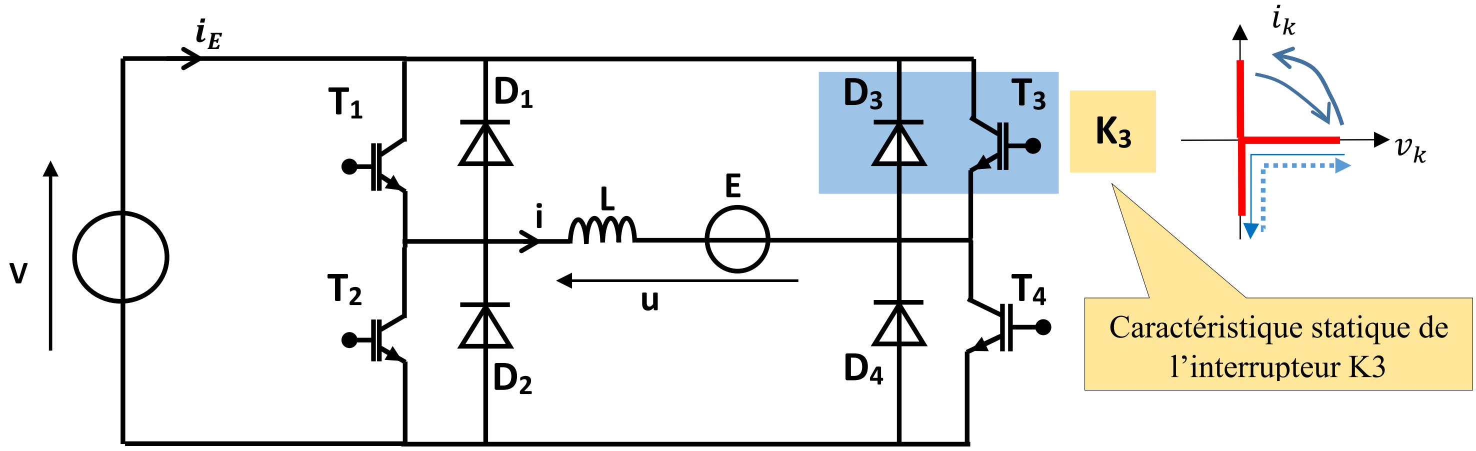
- Une source de tension réversible en **courant** :

  $\boldsymbol{V > 0}$ et $\boldsymbol{I_E > 0}$ ou $\boldsymbol{I_E < 0}$

- Et une source de courant réversible **en courant** et **en tension** :

  $\boldsymbol{< u >> 0}$ ou $\boldsymbol{< u >< 0}$ et $\boldsymbol{I > 0}$ ou $\boldsymbol{I < 0}$

La structure d'un **hacheur 4 quadrants** est la suivante :

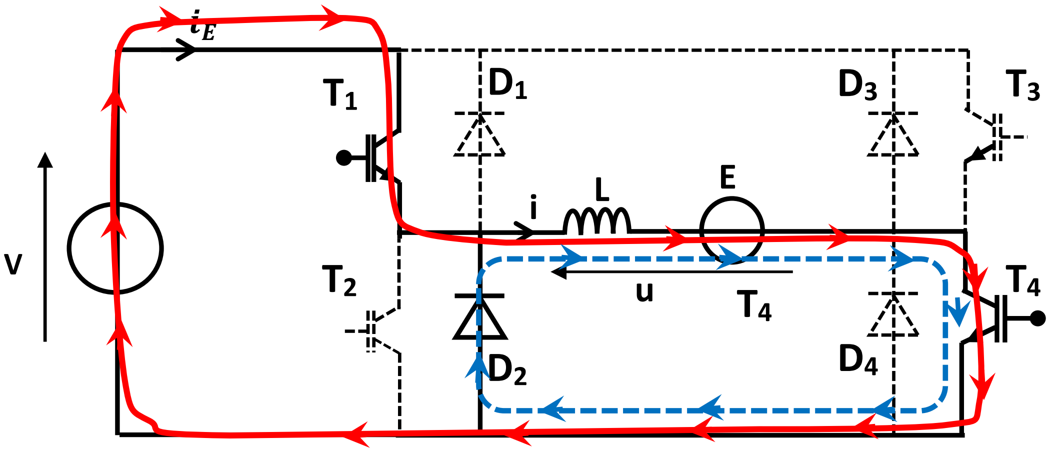



### 5.2. Modes de fonctionnement

On peut envisager sur cette structure différents modes de fonctionnement :

Pour obtenir $< u >> 0$ par exemple, on peut commander constamment la fermeture de T4

- Si $I > 0$, on hache par T1
- Si $I < 0$, on hache par T2




Phase motrice active $\boldsymbol{t} \in [\boldsymbol{0}\ , \boldsymbol{\alpha T}]$

Phase motrice en roue libre $\boldsymbol{t} \in [\boldsymbol{0}\ , \boldsymbol{\alpha T}]$

**5.3. Forme d'onde du courant et de tension**

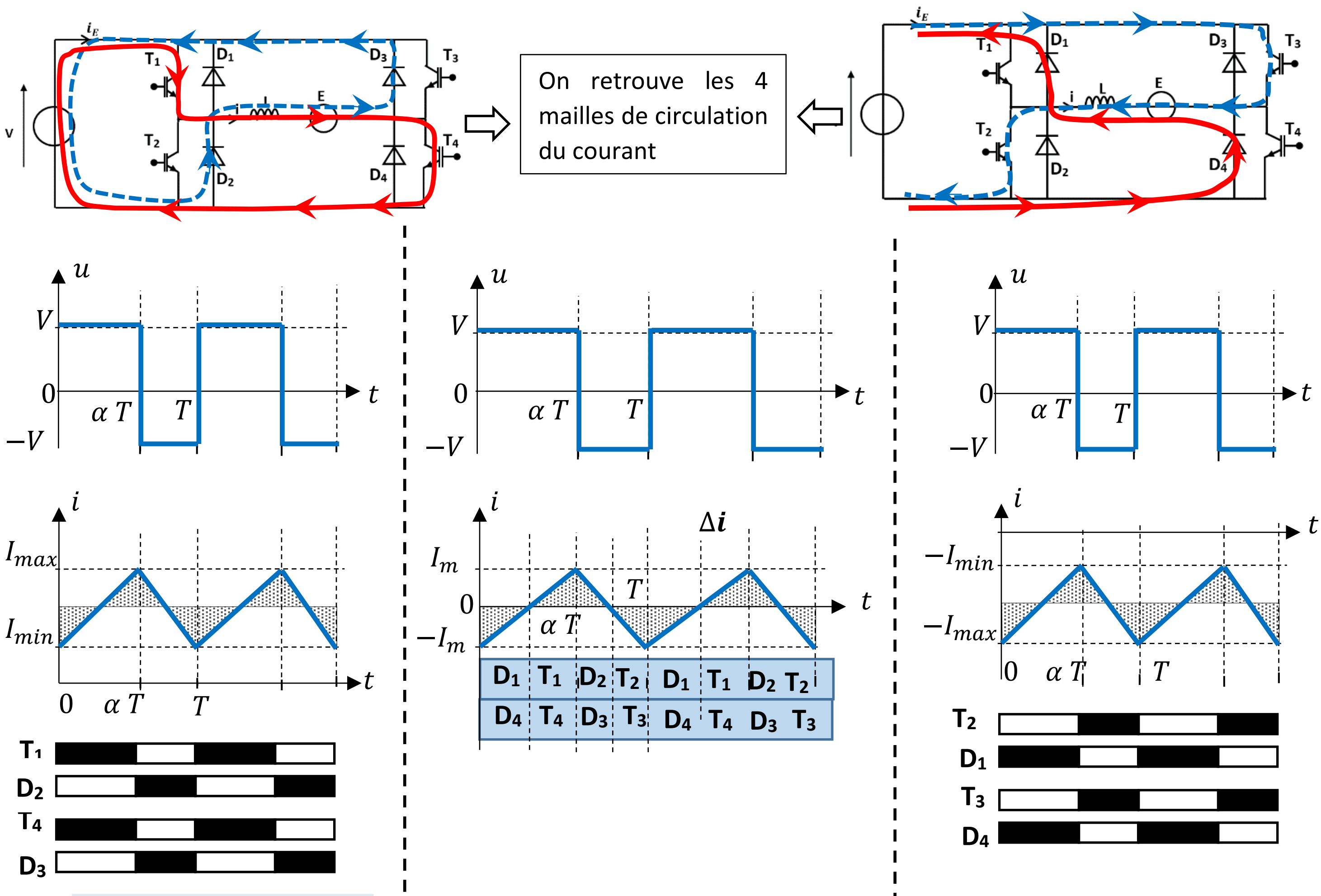
L'IGBT commandé à l'amorçage, ne devient passant que si le courant d'induit prend la polarité correcte : **il faut $i > 0$ pour $T_1$ et $i < 0$ pour T**

**N.B :** si **Ki** est fermé alors l'un des semi-conducteur **Di** ou **Ti** le constituant conduit.

On traitera que le cas , $\boldsymbol{\alpha > 0.5}$, c'est-à-dire $< u >> 0$, les formes d'ondes et les intervalles de conduction étant les mêmes pour , $\boldsymbol{\alpha < 0.5}$.

On distingue les trois (3) suivants

| $< i >> 0$ | $< i >= 0$ | $< i >< 0$ |
|---|---|---|




| Marche en MOTEUR<br>Dans le **quadrant 1** | Marche à vide :<br>**C=0** | Marche en FREINAGE<br>Dans le **quadrant 2** |
|---|---|---|

**!**

Cet hacheur est réversible en **courant** et en **tension.**

Il convient pour piloter la MCC dans le **quadrant 1 à 4** du plan couple-vitesse C(Ω).

**La source de tension doit être réversible en courant**