

# Chapitre 1

## Méthodes de conception des convertisseurs statiques

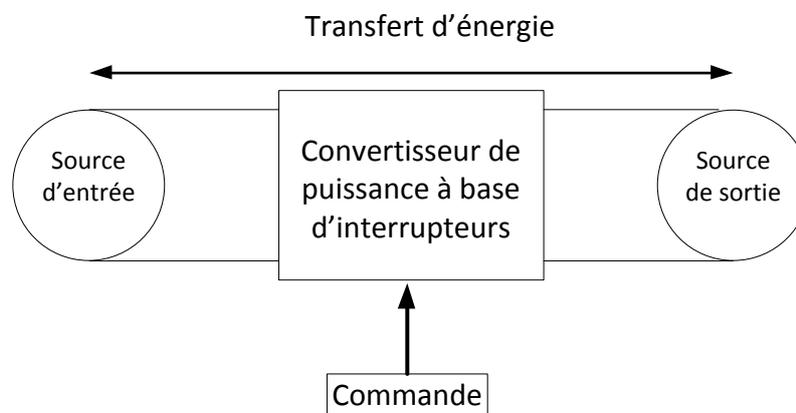
### Contenu

- 1- Notion de convertisseur statique
- 2- Eléments constitutifs d'un convertisseur statique : Les interrupteurs et les sources
- 3- Règles d'interconnexion des sources
- 4- Structures des convertisseurs : directe et indirecte
- 5- Cellule de commutation
- 6- Règles de commutation
- 7- Etapes de synthèse des convertisseurs statiques
- 8- Calcul des pertes de puissance

---

### 1- Notion de convertisseur statique

Un convertisseur est un montage à base d'interrupteurs permettant par une commande convenable de contrôler l'échange d'énergie entre deux sources.



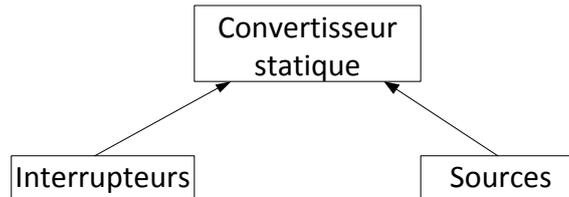
### Problématique :

Le problème de la synthèse d'un convertisseur consiste à choisir:

- La structure du convertisseur : nombre et place des interrupteurs ainsi que la présence ou non des éléments réactifs ;
- Les caractéristiques statiques et les caractéristiques de commutation des interrupteurs.

## 2- Eléments constitutifs d'un convertisseur statique

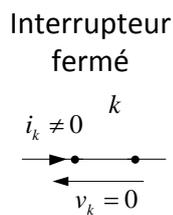
Un convertisseur statique est constitué principalement par des interrupteurs et des sources.



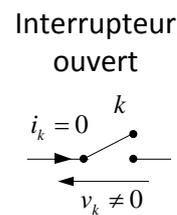
### 2.1 Notion d'interrupteur idéal

Un interrupteur idéal est un élément qui possède deux états stables :

- Un état passant



- un état bloqué



Un interrupteur peut être fermé par un seul semi-conducteur ou par un groupement en série ou en parallèle de plusieurs semi-conducteurs.

### 2.2 Caractéristique statique d'un interrupteur

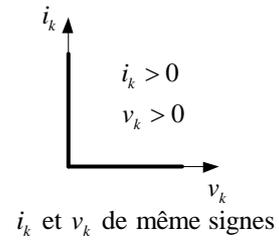
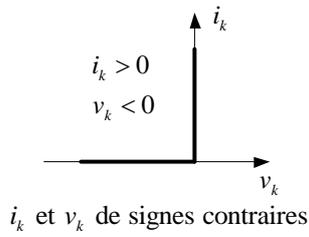
Une caractéristique statique est la courbe représentant la relation  $i_k(v_k)$  donnant l'ensemble des points de fonctionnement d'un interrupteur.

### 2.3 Classification des caractéristiques statiques idéales d'un interrupteur

On caractérise un interrupteur statique par l'ensemble des segments que comporte sa caractéristique statique ; on distingue ainsi les interrupteurs deux segments, trois segments et quatre segments.

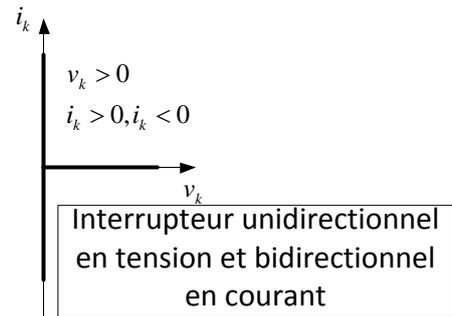
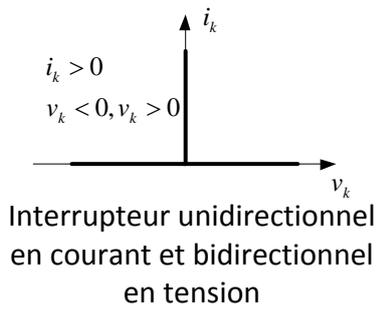
#### 2.3.1 Caractéristique statique à deux segments

Dans ce cas, l'interrupteur est unidirectionnel en tension et en courant.

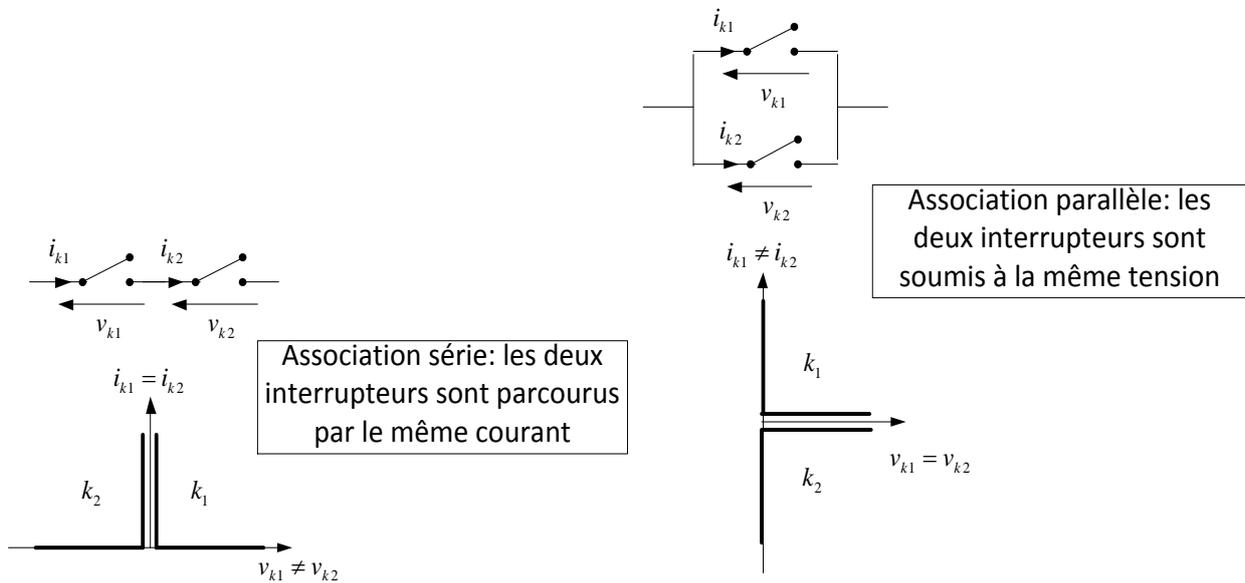


2.3.2 Caractéristique statique à trois segments

Pour cet interrupteur, l'une des grandeurs (tension ou courant) est bidirectionnelle et l'autre est unidirectionnelle.

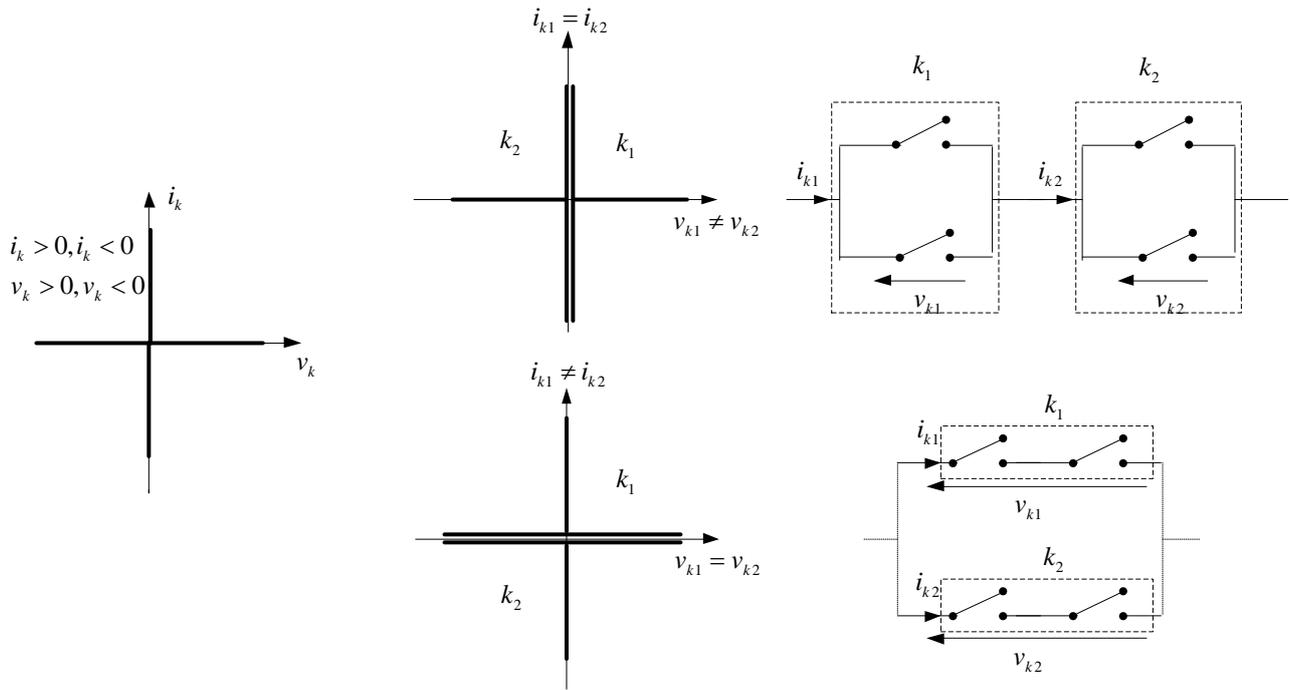


Un interrupteur trois segments peut être réalisé par l'association de deux interrupteurs à deux segments.



2.3.3 Caractéristique statique à quatre segments

Pour ce type d'interrupteur, la tension et le courant sont bidirectionnels. Il peut être réalisé par association de deux interrupteurs trois segments ou quatre interrupteurs deux segments.



### 2.4 Caractéristique dynamique d'un interrupteur

Elle représente la trajectoire suivie par le point de fonctionnement d'interrupteur dans le plan  $i_k(v_k)$  pour passer d'un point situé sur un segment à un point situé sur un autre segment.

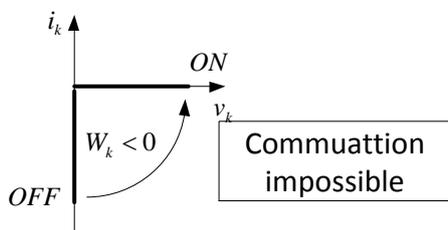
### 2.5 Notion de commutation

Pour un interrupteur, la commutation signifie le passage de l'état bloqué à l'état passant et inversement.

### 2.6 Types des commutations d'un interrupteur

Lors d'une commutation l'énergie dissipée est :

$$W_k = \int_{\text{commutation}} v_k(t) i_k(t) dt$$



Si cette commutation est possible ceci signifie que l'interrupteur peut fournir de la puissance ce qu'est en contradiction avec la nature d'un interrupteur

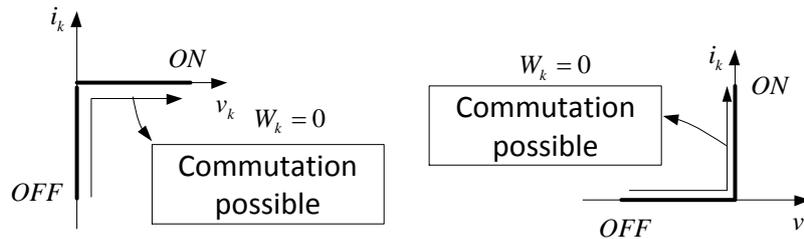
Conséquence  
La caractéristique dynamique ne peut être incluse que dans les quadrants tels que  $v_k i_k > 0$

Cette énergie ne peut être que positive ou nulle (un interrupteur réel et nécessairement dissipatif), ce qui a pour conséquences que :

- Soit le point de fonctionnement se déplace le long des axes des quadrants où les segments sont de signes opposés (quadrants 2 et 4)  $W_k=0$ ; ce type de commutation est nommée : commutation spontanée ou naturelle.
- Soit il se déplace dans un quart du plan où les segments sont de même signes (quadrants 1 et 3),  $W_k \Rightarrow 0$ ; on parle alors de commutation commandée à l'amorçage ou au blocage.

**2.6.1 Commutation spontanée**

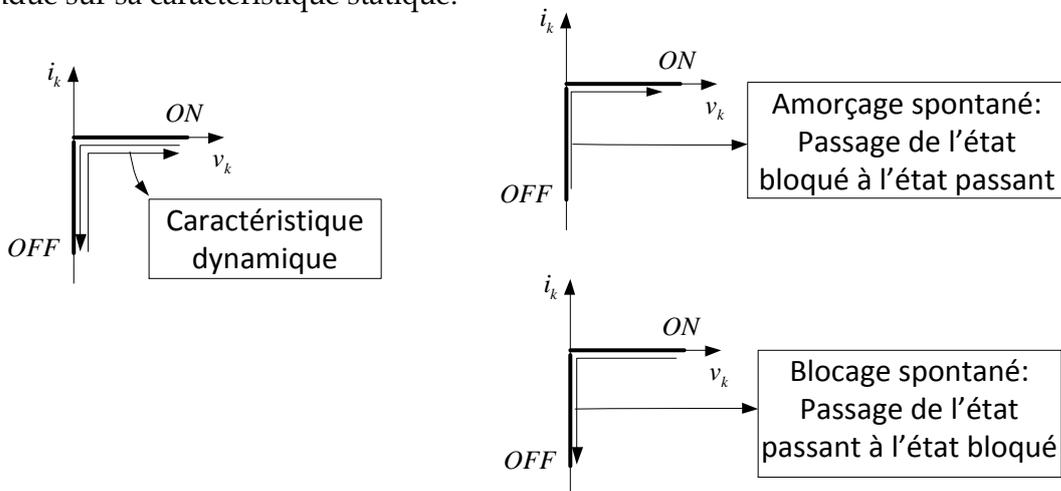
La commutation est dite spontanée<sup>1</sup> si le passage d'un état à l'autre d'un interrupteur est provoqué par l'évolution naturelle des grandeurs électriques du circuit extérieur.



Le passage de l'état passant à l'état bloqué et inversement se fait sur les axes  $v_k = 0$ , et  $i_k = 0$ .

**Caractéristique dynamique de la commutation spontanée**

Dans le cas d'une commutation spontanée, la caractéristique dynamique de l'interrupteur est confondue sur sa caractéristique statique.



**2.6.2 Commutation commandée**

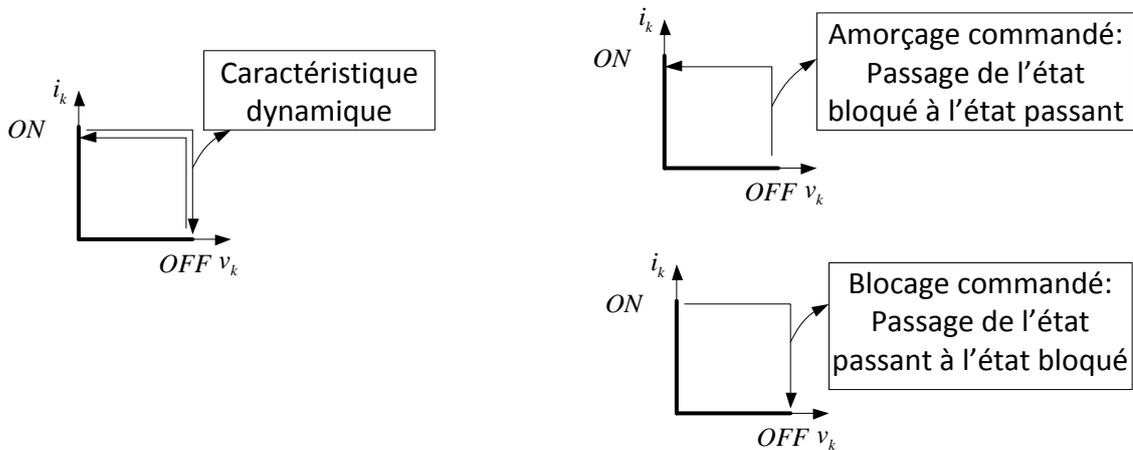
La commutation est dite commandée car elle provoquée par un signal de commande.

<sup>1</sup> Un phénomène spontané c'est un phénomène qui se produit sans avoir été provoqué.



Le passage de l'état ON à l'état OFF et vice versa se fait directement au travers les quadrants où  $v_k i_k > 0$ .

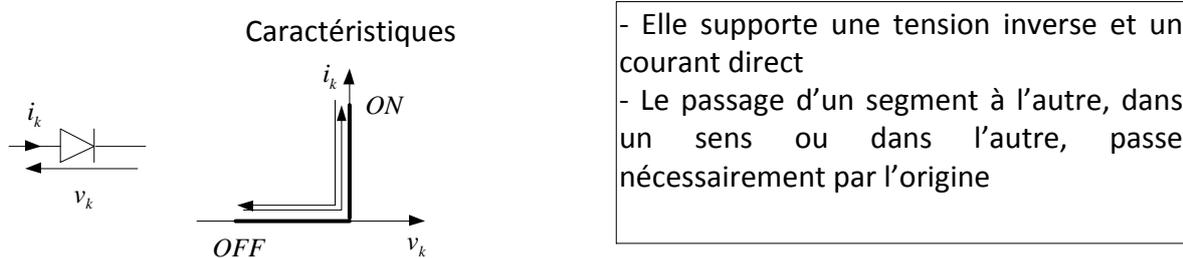
**Caractéristique dynamique de commutation commandée**



**2.7 Exemples d'interrupteurs**

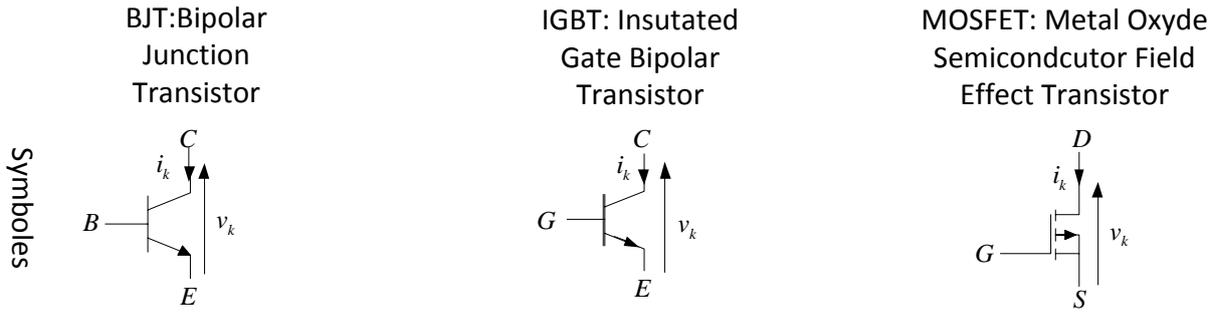
**2.7.1 Diode**

La diode est un interrupteur à deux segments de signes opposés à amorçage et blocage spontanés.

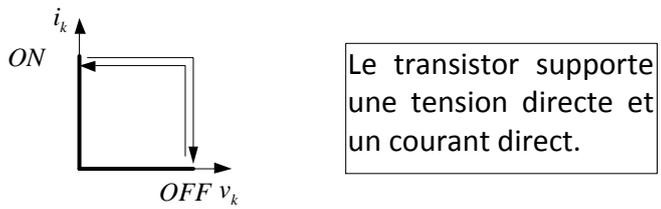


**2.7.2 Transistor**

Le transistor est un interrupteur à deux segments à amorçage et blocage commandés.



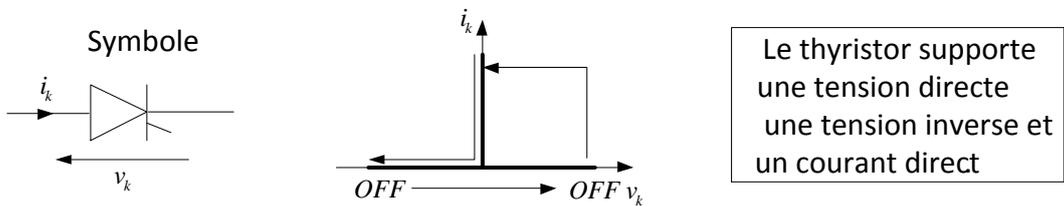
**Caractéristiques**



**2.7.3 Thyristor**

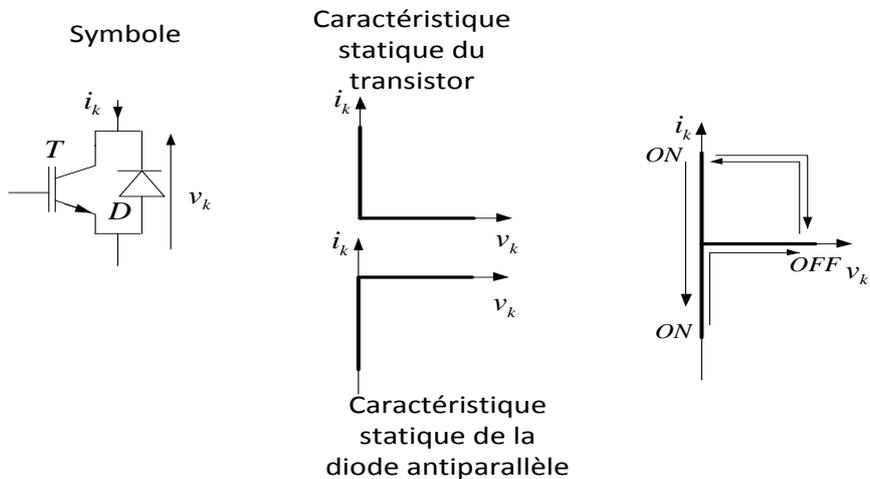
Le thyristor est un élément à trois segments à amorçage commandé et à blocage spontané.

**Caractéristiques**



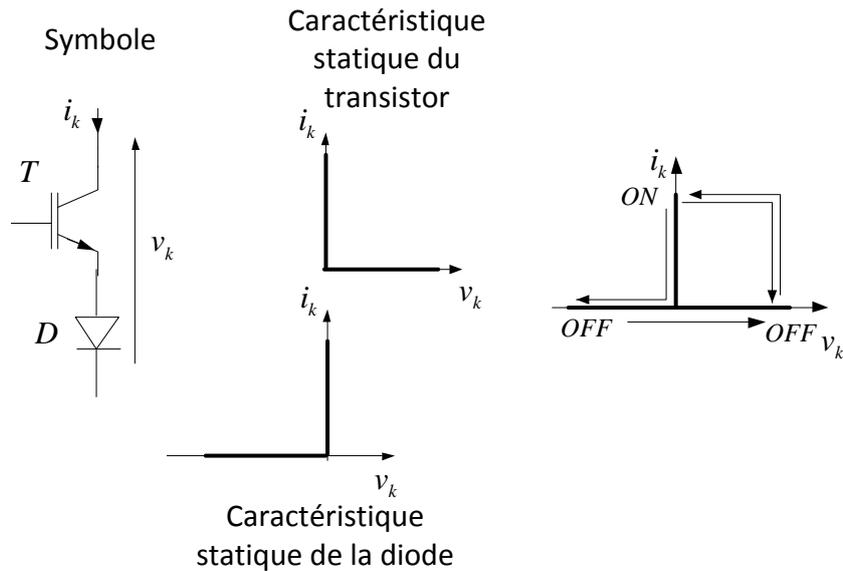
**2.7.4 Transistor en antiparallèle avec une diode**

C'est un interrupteur à trois segments réversible en courant.



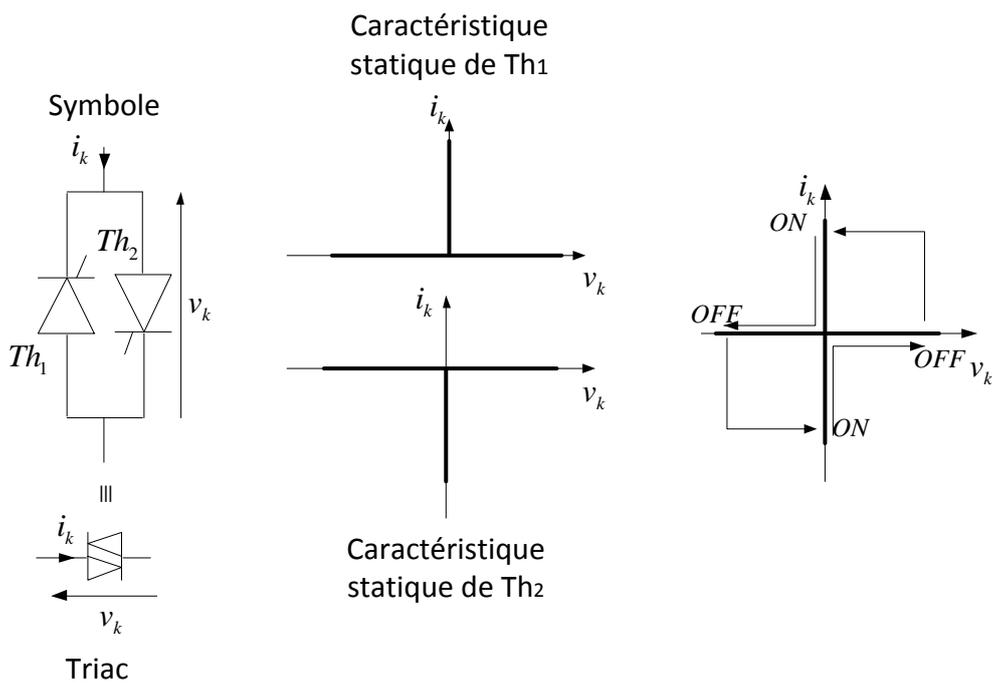
**2.7.5 Transistor en série avec une diode**

C'est un interrupteur à trois segments réversible en tension.



**2.7.6 Deux thyristors placés en tête-bêche**

C'est un interrupteur à quatre segments réversible en tension et en courant.



**2.7.7 Connexion en parallèle ou en série de deux interrupteurs à trois segments**

Il s'agit d'un interrupteur à quatre segments formé soit par la mise parallèle de deux interrupteurs à trois segments réversible en tension ou par la mise en série de deux interrupteurs à trois segments réversible en courant.



2.8.2.5 Source alternative

La source alternative impose une tension ou un courant dont la polarité ou le sens de circulation fluctue périodiquement.

2.8.2.6 Définition généralisée d'une source

- Une source est dite de tension quand la tension à ses bornes ne peut subir de discontinuité du fait de la variation de la charge
- Une source est dite de courant quand le courant qui la traverse ne peut subir de discontinuité du fait de la variation de la charge

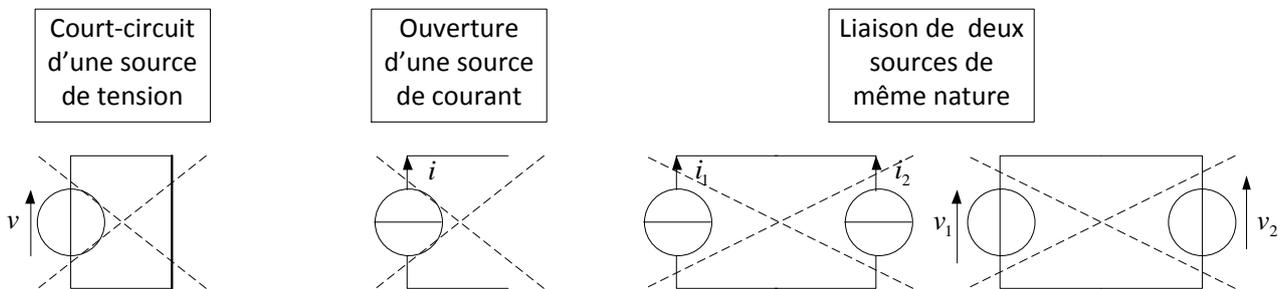
2.8.2.7 Réversibilité d'une source continue

- Une source est dite réversible en tension si la tension à ses bornes peut changer de signe.
- Une source est dite réversible en courant si le courant qui la traverse peut s'inverser.

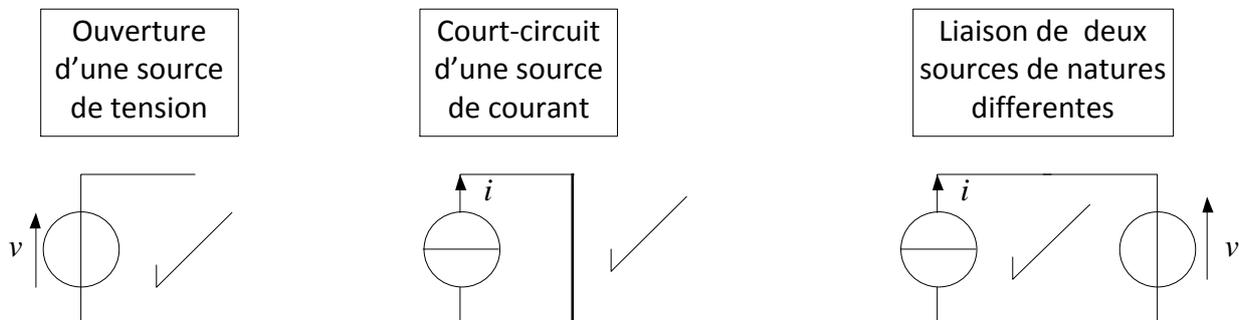
3 Règles d'interconnexion (d'association) des sources

Ces règles doivent assurer la continuité d'énergie.

3.1 Configurations interdites



3.2 Configuration possibles



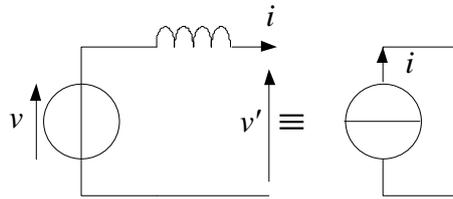
## Résumé

- 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-circuitée;
- Il ne faut jamais connecter deux sources de même nature. Cela revient à dire qu'il est possible de connecter deux sources de natures différentes.

### 3.3 Changement de la nature d'une source

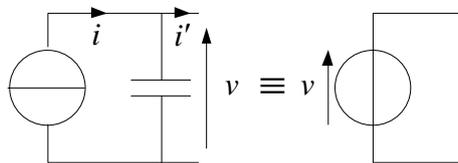
#### 3.3.1 Changement d'une source de tension en une source de courant

Une source de courant est obtenue en connectant une inductance suffisante en série avec une source de tension.

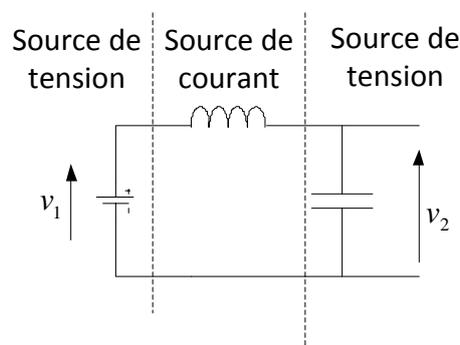


#### 3.3.2 Changement d'une source de courant en une source de tension

Une source de tension est obtenue en connectant une capacité suffisante en parallèle avec une source de courant.



### Exemple



## 4. Structure des convertisseurs statiques

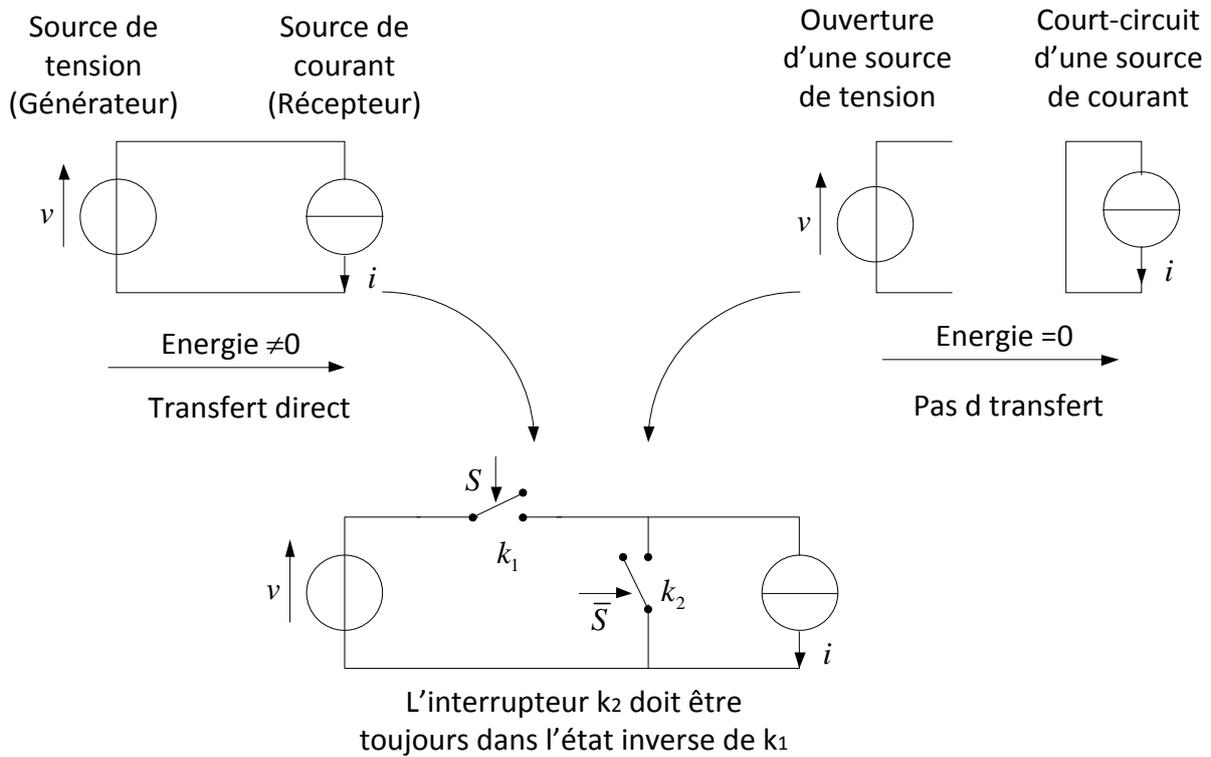
Les convertisseurs peuvent être soit directs ou indirects.

## 4.1 Convertisseur direct

Le convertisseur direct est un convertisseur à liaison directe entre deux sources de natures différentes.

### Conception

Pour contrôler le transfert d'énergie, la liaison entre les deux sources doit être périodique.

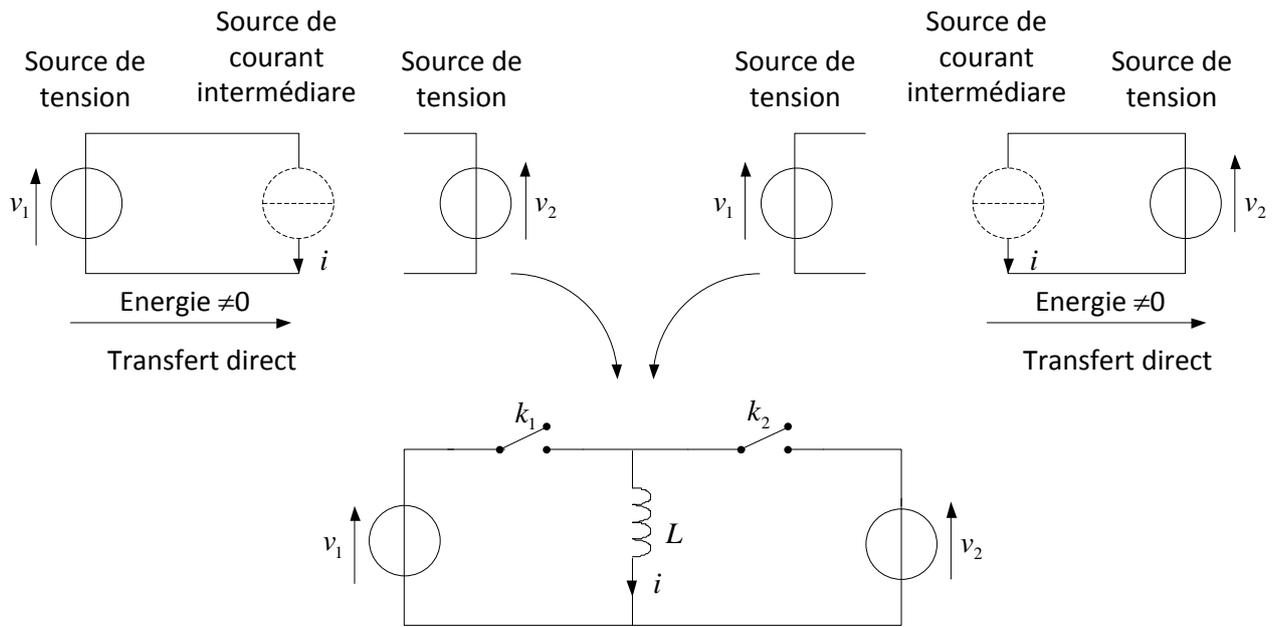


Le convertisseur direct est constitué uniquement d'interrupteurs et il est donc complètement inapte à stocker de l'énergie.

## 4.2 Convertisseur indirect

Le convertisseur indirect est un convertisseur à liaison indirecte entre deux sources de même nature.

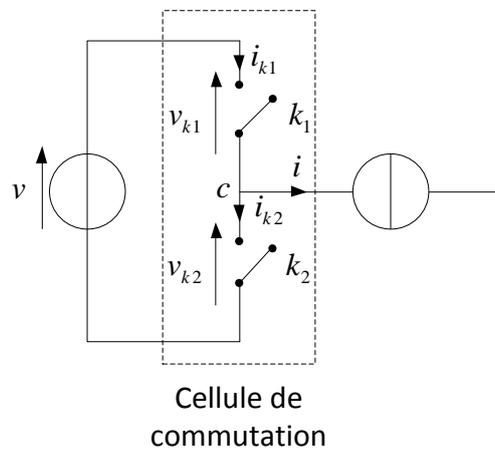
### Conception



Le convertisseur indirect comporte un élément de stockage de l'énergie qui joue le rôle de source intermédiaire.

### 5. Cellule de commutation

Une cellule de commutation est constituée de deux interrupteurs reliés au même pôle d'une source de courant et commandés de façon complémentaire. La cellule de commutation permet l'échange d'énergie entre une source de tension et une source de courant.



#### 5.1 Lois d'une cellule de commutation

- Les deux interrupteurs et la source de tension forme une maille

$$v_{k1} + v_{k2} = v$$

- Les deux interrupteurs et la source de courant forme un nœud

$$i_{k1} - i_{k2} = i$$

Dans une cellule de commutation, les deux interrupteurs ne doivent pas être ouverts en même temps (ouverture de la source de courant), ni fermés en même temps (court-circuit de la source de tension). Les deux interrupteurs fonctionnent donc de manière complémentaire.

## 5.2 Contraintes sur les interrupteurs

- Les contraintes en tension sont définies par la source de tension.
- Les contraintes en courant sont définies par la source de courant.

## 5.3 Commutation dans une cellule

### 5.3.1 Commutation positive

Si la commutation d'un interrupteur à l'autre entraîne la croissance du potentiel au nœud de la cellule (point c), la commutation est dite positive.

Accroissement du potentiel du point c  $\Rightarrow$  commutation positive

### 5.3.2 Commutation négative

Si la commutation d'un interrupteur à l'autre provoque la décroissance du potentiel au nœud de la cellule (point c), la commutation est dite négative.

Diminution du potentiel du point c  $\Rightarrow$  commutation négative

### 5.3.3 Convention de courant

Le courant  $i$  dans la source de courant est dit positif s'il quitte le point c, et négatif s'il entre par le point c.

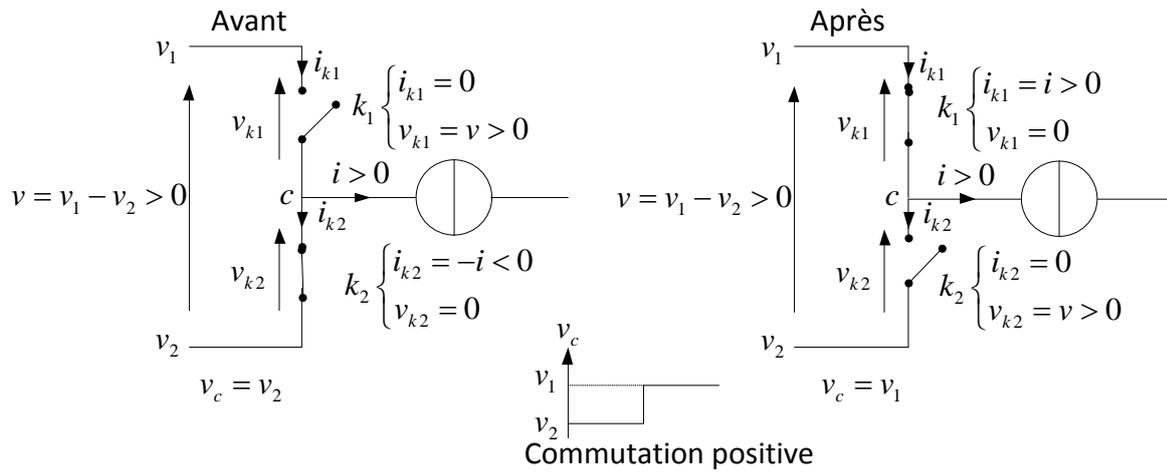
## 6 Règles de commutation

La recherche des topologies des convertisseurs statiques est basée sur les règles suivantes :

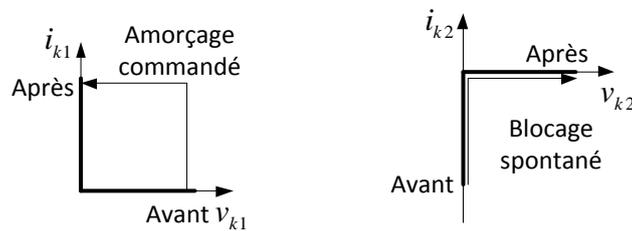
### 6.1 Règle 1

Si la commutation et le courant  $i$  sont de même signes, on doit procéder à un amorçage commandé de l'interrupteur bloqué.

*Démo*



Caractéristiques statiques et dynamiques



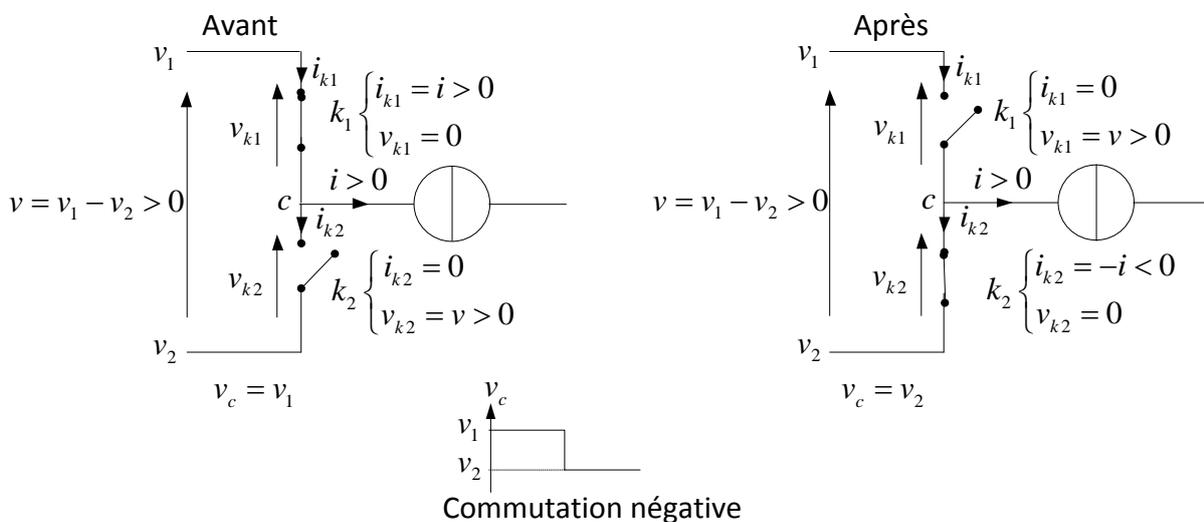
Résultat :

$Com > 0 + i > 0 \Rightarrow$  Amorçage commandé de  $k_1$  + Blocage spontané de  $k_2$

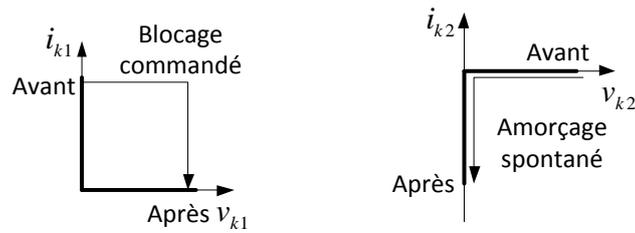
6.2 Règle 2

Si la commutation et le courant  $i$  sont de signes contraires, on doit procéder au blocage commandé de l'interrupteur passant.

Démo



Caractéristiques statiques et dynamiques



Résultat :

$\text{Com} < 0 + i > 0 \Rightarrow$  Blocage commandé de  $k_1$  + Amorçage spontané de  $k_2$

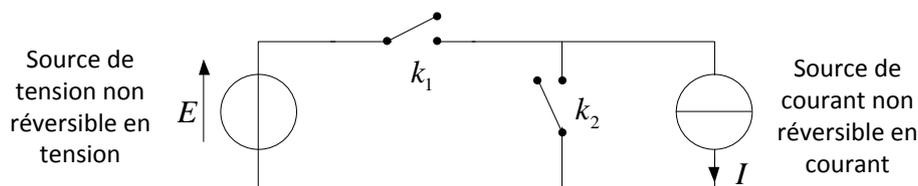
### Remarque

Dans une cellule élémentaire de commutation, la commutation commandée d'un interrupteur provoque la commutation spontanée de l'autre.

### 7 Etapes de la synthèse d'un convertisseur statique

- 1°) Déterminer la nature des sources d'entrée et de sortie : sources de tension ou source de courant.
- 2°) Analyser la réversibilité des sources : Réversibilité en tension ou en courant.
- 3°) Choisir la configuration de base suivant la nature des sources et leurs réversibilités.
- 4°) Identifier les séquences de fonctionnement compte tenu des réversibilités en tension et en courant des sources.
- 5°) Déterminer la caractéristique statique de chaque interrupteur pour les différentes séquences de fonctionnement.
- 6°) Déterminer les types de commutation de chaque interrupteur pour les différentes séquences de fonctionnement.
- 7°) Connaissant les caractéristiques statiques et le type de commutation de chaque interrupteur, déduire la nature des interrupteurs à utiliser.

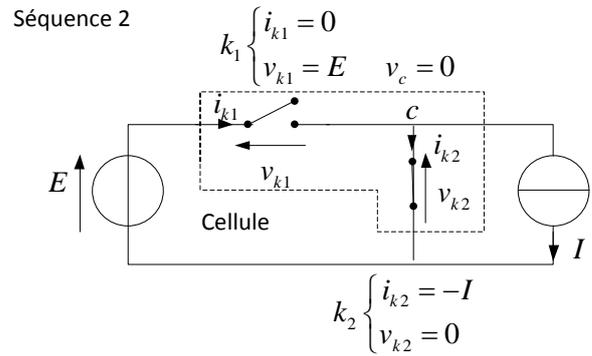
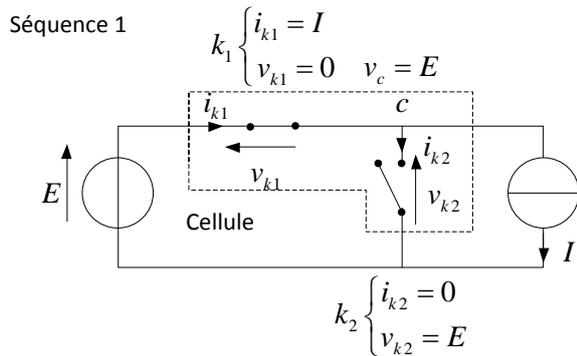
### Exemple



- Séquences de fonctionnement

$k_1$	$k_2$	Observations	
0	0	×	Configuration interdite
1	0	√	Configuration possible
0	1	√	Configuration possible
1	1	×	Configuration interdite

- Configurations possibles



- Caractéristiques statiques des interrupteurs



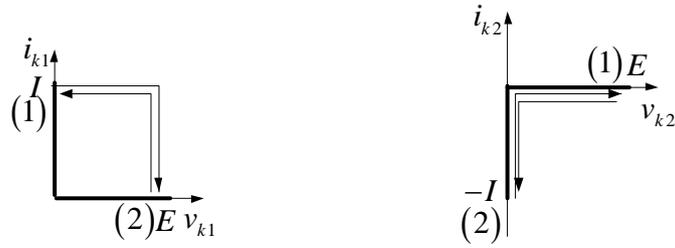
- Caractéristiques dynamiques des interrupteurs

- Commutation de la séquence 1 à la séquence 2

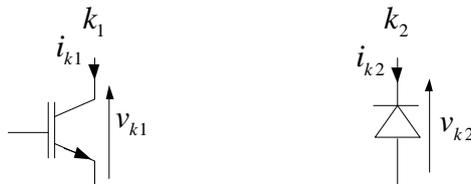
Com < 0 + I > 0 ⇒ Blocage commandé de  $k_1$  + Amorçage spontané de  $k_2$

- Commutation de la séquence 2 à la séquence 1

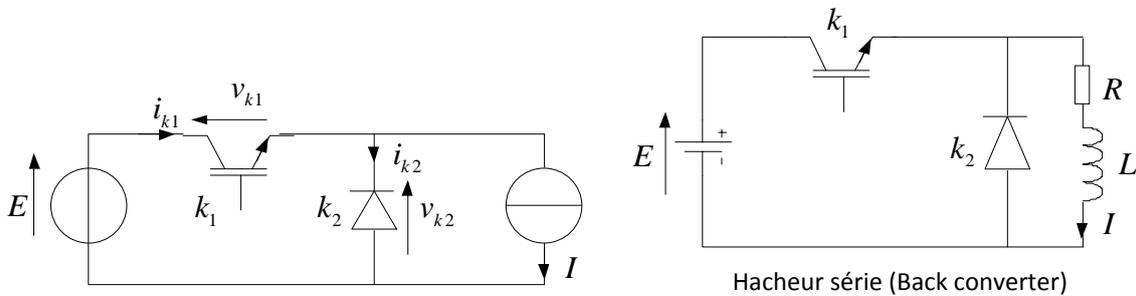
Com > 0 + I > 0 ⇒ Amorçage commandé de  $k_1$  + Blocage spontané de  $k_2$



- Identification des interrupteurs



- Structure du convertisseur étudié



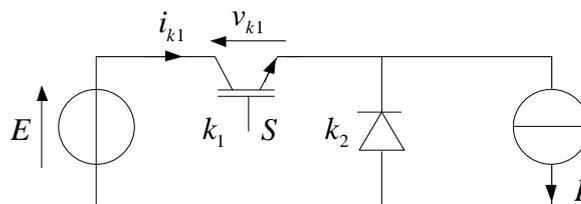
### 8 Calcul des pertes de puissance

On distingue trois types de pertes, chacune correspondant à un état de l'interrupteur :

- Les pertes par conduction, associées à l'état passant de l'interrupteur.
- Les pertes au blocage, liées à l'état bloqué de l'interrupteur.
- Les pertes en commutation, associées au passage de l'interrupteur de l'état passant à l'état bloqué et vice versa.

#### 8.1 Formes d'ondes idéalisées dans un SC de puissance lors d'une période de découpage et pertes associées

Pour calculer les pertes du transistor du montage ci-dessous, la diode est supposée parfaite.



En notant  $v_{k1}(t)$  et  $i_{k1}(t)$  les ondes respectivement de tension aux bornes de l'interrupteur, et de courant dans l'interrupteur, et  $T_s$  la période de ces signaux, l'énergie totale dissipée dans le composant est donnée par:

$$W_{k1} = \int_0^{T_s} v_{k1}(t) i_{k1}(t) dt$$

La figure ci-dessous montre les formes idéalisées de tension et de courant durant la commutation. Dans figure on pose :

$t_{don}$  : Temps de retard à la fermeture (turn-on delay time)

$t_{ri}$  : Temps de montée du courant (current rise time)

$t_{fi}$  : Temps de décente du courant (current fall time)

$t_{con}$  : Intervalle de temps de croissance de fermeture (turn-on corssover interval)

$t_{doff}$  : Temps de retard à l'ouverture (turn-off delay time)

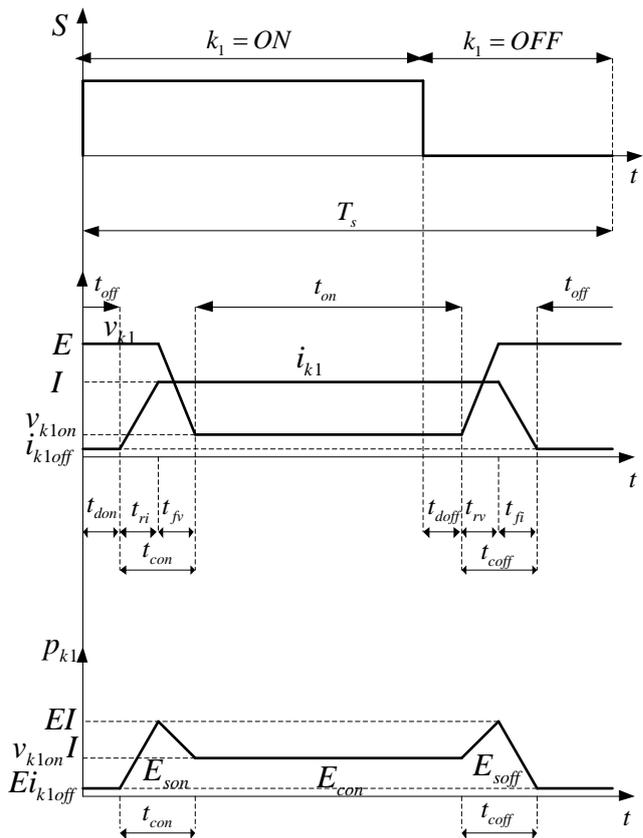
$t_{rv}$  : Temps de montée de la tension (voltage rise time)

$t_{fv}$  : Temps de décente de la tension (voltage fall time)

$t_{coff}$  : Intervalle de temps de décroissance d'ouverture (turn-off corssover interval)

$i_{k1off}$  : Courant de fuites à l'état bloqué (généralement négligeable)

$v_{k1on}$  : Chute de tension à l'état passant



### 8.2 Pertes de conduction (Pertes statiques)

Les pertes par conduction sont les pertes dissipées à l'état passant dans le semi-conducteur. Elles sont fonction de la chute de tension et au courant qui circule durant la fermeture.

Pendant la phase de conduction, les pertes en conduction sont égales au produit du courant par la tension aux bornes du transistor. L'énergie dissipée à l'état passant durant le temps de conduction  $t_{on}$ , est définie par:

$$W_{k1con} = \int_{t_{don}+t_{con}}^{t_{don}+t_{con}+t_{on}} v_{k1on} I dt = v_{k1on} I t_{on}$$

La puissance moyenne dissipée dans le transistor durant sa phase de conduction est exprimée par :

$$P_{k1con} = \frac{W_{k1con}}{T_s} = v_{k1on} I t_{on} f_s$$

### 8.3 Pertes au blocage (pertes par fuites)

Les pertes à l'état bloqué sont les pertes dissipées à l'état bloqué dans le semi-conducteur.

Pendant cette phase l'interrupteur est bloqué, le faible courant de fuite présenté par les composants de puissance à l'état ouvert permet de négliger les pertes lors de cette phase de fonctionnement. Ce qui en résulte :

$$W_{k1bloc} = \int_{t_{don}+t_{con}+t_{on}+t_{coff}}^{t_{don}+t_{con}+t_{on}+t_{coff}+t_{off}} E i_{k1off} dt = E i_{k1off} t_{off} \approx 0$$

### 8.4 Pertes en commutation (Pertes dynamiques)

Les pertes par commutation sont les pertes dissipées dans les phases d'amorçage et de blocage d'un interrupteur.

#### 8.4.1 Pertes à la fermeture

Les pertes par commutation à la fermeture sont le produit de la tension aux bornes du transistor et du courant qui le traverse pendant la phase d'amorçage. L'énergie dissipée est calculée par :

$$W_{k1on} = \int_{t_{don}}^{t_{don}+t_{ri}} E \left( \frac{(I - i_{k1off})}{t_{ri}} (t - t_{don}) + i_{k1off} \right) dt + \int_{t_{don}+t_{ri}}^{t_{don}+t_{ri}+t_{fv}} \left( E - \frac{(E - v_{k1on})}{t_{fv}} (t - t_{don} - t_{ri}) \right) I dt$$

$$W_{k1on} = \frac{1}{2} E \frac{(I - i_{k1off})}{t_{ri}} (t - t_{don})^2 \Big|_{t_{don}}^{t_{don}+t_{ri}} + E i_{k1off} t_{ri} + E I t_{fv} - \frac{1}{2} \frac{(E - v_{k1on})}{t_{fv}} I (t - t_{don} - t_{ri})^2 \Big|_{t_{don}+t_{ri}}^{t_{don}+t_{ri}+t_{fv}}$$

$$W_{k1on} = \frac{1}{2} E (I - i_{k1off}) t_{ri} + E i_{k1off} t_{ri} + E I t_{fv} - \frac{1}{2} (E - v_{k1on}) I t_{fv}$$

Si on admet que  $i_{k1off} \ll I$  et  $v_{k1on} \ll E$ , l'équation précédente se simplifiée à :

$$W_{k1on} = \frac{1}{2} E I t_{ri} + \frac{1}{2} E I t_{fv} = \frac{1}{2} E I (t_{ri} + t_{fv}) = \frac{1}{2} E I t_{con}$$

#### 8.4.2 Pertes à l'ouverture

Les pertes par commutation à l'ouverture sont le produit de la tension aux bornes du transistor et du courant qui le traverse pendant la phase de blocage. L'énergie dissipée est calculée par :

$$W_{k1off} = \int_{t_{don}+t_{con}+t_{on}}^{t_{don}+t_{con}+t_{on}+t_{rv}} \left( v_{k1on} + \frac{(E - v_{k1on})}{t_{rv}} (t - t_{don} - t_{con} - t_{on}) \right) I dt + \int_{t_{don}+t_{con}+t_{on}+t_{rv}}^{t_{don}+t_{con}+t_{on}+t_{rv}+t_{fi}} E \left( I - \frac{(I - i_{k1off})}{t_{fi}} (t - t_{don} - t_{con} - t_{on} - t_{rv}) \right) dt$$

$$W_{k1off} = v_{k1on} I t_{rv} + \frac{1}{2} \frac{(E - v_{k1on})}{t_{rv}} I (t - t_{don} - t_{con} - t_{on})^2 \Big|_{t_{don}+t_{con}+t_{on}}^{t_{don}+t_{con}+t_{on}+t_{rv}} + E I t_{fi} - \frac{1}{2} E \frac{(I - i_{k1off})}{t_{fi}} (t - t_{don} - t_{con} - t_{on} - t_{rv})^2 \Big|_{t_{don}+t_{con}+t_{on}+t_{rv}}^{t_{don}+t_{con}+t_{on}+t_{rv}+t_{fi}}$$

$$W_{k1off} = v_{k1on} I t_{rv} + \frac{1}{2} (E - v_{k1on}) I t_{rv} + E I t_{fi} - \frac{1}{2} E (I - i_{k1off}) t_{fi}$$

Si on admet que  $i_{k1off} \ll I$  et  $v_{k1on} \ll E$ , l'équation précédente se simplifiée à :

$$W_{k1off} = \frac{1}{2} E I t_{rv} + \frac{1}{2} E I t_{fi} = \frac{1}{2} E I (t_{rv} + t_{fi}) = \frac{1}{2} E I t_{cuff}$$

La puissance moyenne des pertes par commutation dissipée dans l'interrupteur durant ses phases de transitions est exprimée par :

$$P_{k1con} = \frac{W_{k1on} + W_{k1off}}{T_s} = \frac{1}{2} \frac{EI t_{con} + EI t_{coff}}{T_s} = \frac{1}{2} EI (t_{con} + t_{coff}) f_s$$

Cette équation montre que les pertes moyennes en commutation sont proportionnelles à la fréquence de découpage et aux temps de commutation.

**8.5 Energie totale dissipée dans un interrupteur**

Les pertes dans le transistor sont principalement la combinaison des pertes par conduction et par commutation. L'énergie totale dissipée est exprimée par :

$$W_{k1} = v_{k1on} I t_{on} + \frac{1}{2} EI (t_{con} + t_{coff})$$

La puissance moyenne totale dissipée dans le transistor est calculée par :

$$P_{k1} = v_{k1on} I \frac{t_{on}}{T_s} + \frac{1}{2} EI \frac{t_{con} + t_{coff}}{T_s} = (v_{k1on} I t_{on} + \frac{1}{2} EI (t_{con} + t_{coff})) f_s$$

**Exercice:**

La figure (1) représente un convertisseur DC-DC permettant le transfert d'énergie entre deux sources. L'une est bidirectionnelle en tension et unidirectionnelle en courant et l'autre est une source unidirectionnelle en tension et bidirectionnelle en courant. La commande du convertisseur est représentée sur la figure (2).

1°) - Donner la nature de chaque source (de tension ou de courant).

- Afin de spécifier la réversibilité de chaque source, remplir le tableau suivant en cochant la bonne case.

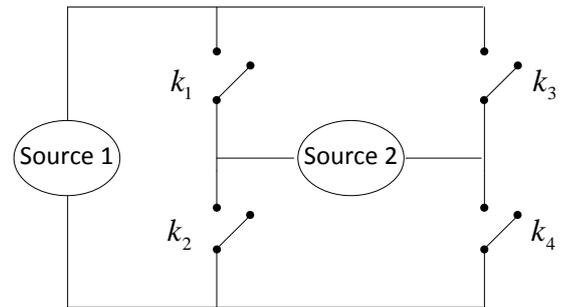


Figure (1)

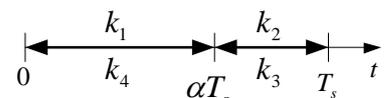


Figure (2)

	Source 1	Source 2
Unidirectionnelle en courant		
Bidirectionnelle en courant		
Unidirectionnelle en tension		
Bidirectionnelle en tension		

2°) Tracer les circuits des configurations possibles.

3°) Tracer les caractéristiques statiques des interrupteurs.

4°) Compléter le tableau ci-dessous en donnant le type de commutation de chaque interrupteur (spontanée ou commandée).

	Amorçage	Blocage
k <sub>1</sub>		
k <sub>2</sub>		
k <sub>3</sub>		
k <sub>4</sub>		

5°) Tracer les caractéristiques dynamiques des interrupteurs.

- 6°) Proposer un schéma du convertisseur en remplaçant les interrupteurs par des semi-conducteurs appropriés.
- 7°) Si on admet que les courants traversant les deux interrupteurs  $k_1$  et  $k_2$  et les tensions à leurs bornes, lors de la commutation à la fermeture et à l'ouverture, sont présentés sur la figure (3).

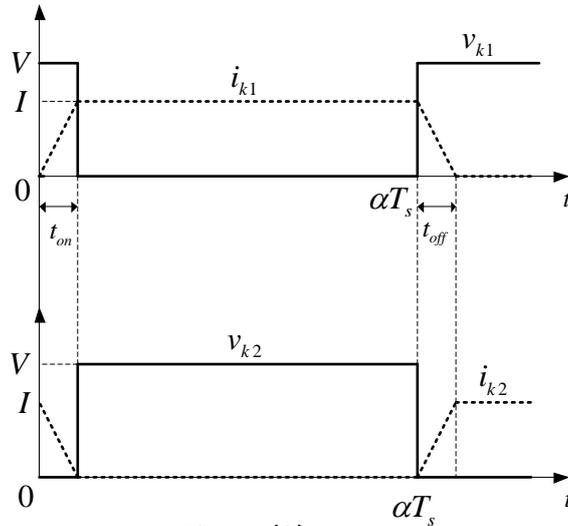


Figure (3)

- 7°) Calculer la puissance perdue par commutation dans les deux interrupteurs puis en déduire celle dissipée dans le convertisseur sachant que :  $V = 200V$ ,  $I = 10A$ ,  $T_s = 20 \mu s$ ,  $t_{on} = 0.5 \mu s$  et  $t_{off} = 0.4 \mu s$ .

**Solution**

1°) - Nature des sources

En identifiant le circuit d'une cellule élémentaire avec chacune des deux cellules du convertisseur en peut en déduire que :

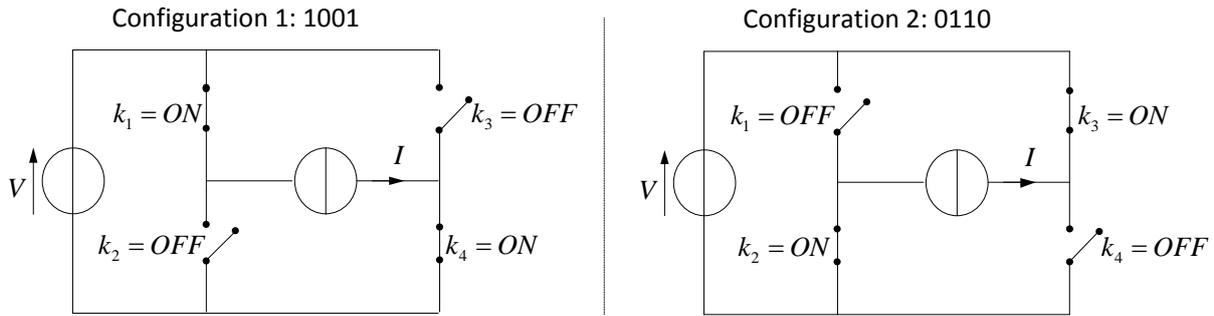
- Source 1=source de tension
- Source 2=source de courant

- Etude de la réversibilité des deux sources

	Source 1	Source 2
Unidirectionnelle en courant		X
Bidirectionnelle en courant	X	
Unidirectionnelle en tension	X	
Bidirectionnelle en tension		X

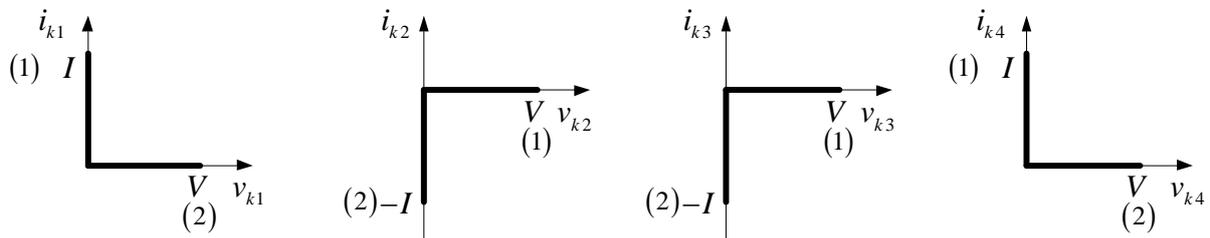
2°) Circuits des configurations possibles.

En examinant la commande du convertisseur en peut constater qu'il possède uniquement de deux configurations possibles, comme le montre la figure ci-dessous.



3°) Tracé des caractéristiques statiques des interrupteurs

Tous les interrupteurs sont des interrupteurs à quatre segments comme le montre la figure suivante.



4°) Types de commutation des interrupteurs

Etude de la commutation

1- Commutation dans la cellule 1

Commutation de  $k_1 = ON$  à  $k_1 = OFF$

$com < 0 + I > 0 \Rightarrow$  Blocage commandé de  $k_1$  et amorçage spontané de  $k_2$ .

Commutation de  $k_2 = ON$  à  $k_2 = OFF$

$com > 0 + I > 0 \Rightarrow$  Amorçage commandé de  $k_1$  et blocage spontané de  $k_2$ .

1- Commutation dans la cellule 2

Commutation de  $k_4 = ON$  à  $k_4 = OFF$

$com > 0 + I < 0 \Rightarrow$  Blocage commandé de  $k_4$  et amorçage spontané de  $k_3$ .

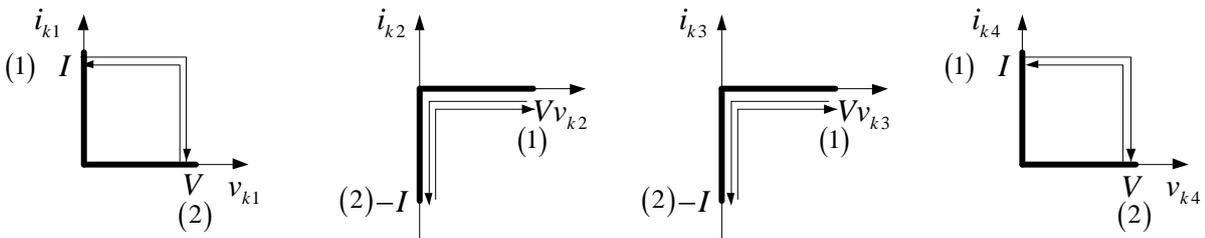
Commutation de  $k_3 = ON$  à  $k_3 = OFF$

$com < 0 + I < 0 \Rightarrow$  Amorçage commandé de  $k_4$  et blocage spontané de  $k_3$ .

	Amorçage	Blocage
$k_1$	Commandé	Commandé
$k_2$	Spontané	Spontané
$k_3$	Spontané	Spontané
$k_4$	Commandé	Commandé

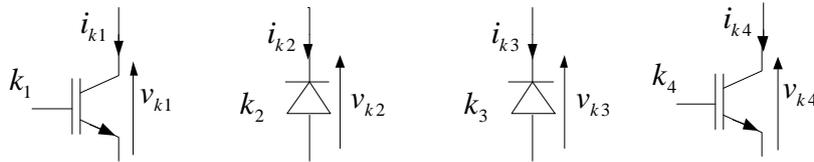
5°) Tracé des caractéristiques dynamiques des interrupteurs.

Parmi les quatre interrupteurs, il y a deux interrupteurs totalement commandés et deux interrupteurs non commandés.

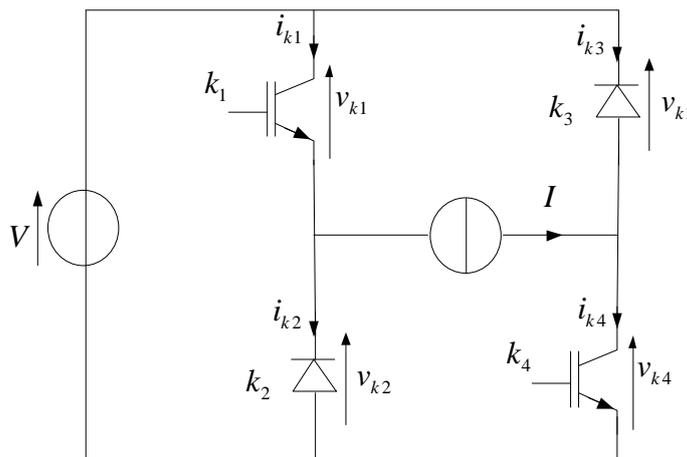


6°) Schéma du convertisseur

A partir des caractéristiques statiques et dynamiques des interrupteurs, on peut en déduire la nature de chaque interrupteur.



En remplaçant ces interrupteurs dans le schéma du convertisseur on obtient le hacheur à deux quadrants suivant :



7°)

Pour calculer la puissance dissipée par commutation, on calcule en premier lieu l'énergie perdue lors de la commutation à la fermeture et à l'ouverture.

1- Puissance perdue par commutation dans l'interrupteur  $k_1$

L'énergie dissipée à la fermeture est :

$$W_{k1ON} = \int_0^{t_{on}} v_{k1}(t) i_{k1}(t) dt \quad \text{avec } v_{k1}(t) = V \text{ et } i_{k1}(t) = \frac{I}{t_{on}} t, \text{ ce qui en résulte :}$$

$$W_{k1ON} = \int_0^{t_{on}} \frac{VI}{t_{on}} t dt = \frac{1}{2} VI t_{on}$$

L'énergie dissipée à l'ouverture est :

$$W_{k1OFF} = \int_{\alpha T_s}^{\alpha T_s + t_{off}} v_{k1}(t) i_{k1}(t) dt \quad \text{avec } v_{k1}(t) = V \text{ et } i_{k1}(t) = -\frac{I}{t_{off}}(t - \alpha T_s) + I, \text{ ce qui en résulte :}$$

$$W_{k1OFF} = \int_{\alpha T_s}^{\alpha T_s + t_{off}} V \left( -\frac{I}{t_{off}}(t - \alpha T_s) + I \right) dt = -\frac{VI}{2t_{off}} (t - \alpha T_s)^2 \Big|_{\alpha T_s}^{\alpha T_s + t_{off}} + VI(t) \Big|_{\alpha T_s}^{\alpha T_s + t_{off}}$$

$$W_{k1OFF} = -\frac{1}{2} VI t_{off} + VI t_{off} = \frac{1}{2} VI t_{off}$$

L'énergie totale dissipée par commutation est :

$$W_{k1} = W_{k1ON} + W_{k1OFF} = \frac{1}{2} VI (t_{on} + t_{off})$$

La puissance dissipée par commutation est :

$$P_{ck1} = \frac{W_{k1}}{T_s} = \frac{1}{2} VI (t_{on} + t_{off}) f_s$$

$$P_{ck1} = \frac{1}{2} 200 \times 10 \times (0.4 \times 10^{-6} + 0.5 \times 10^{-6}) \times 50 \times 10^3 = 45 \text{ W}$$

2- Puissance perdue par commutation dans l'interrupteur  $k_2$

L'énergie dissipée à l'ouverture est :

$$W_{k2OFF} = \int_0^{t_{on}} v_{k2}(t) i_{k2}(t) dt \quad \text{avec } v_{k2}(t) = 0 \text{ et } i_{k2}(t) = -\frac{I}{t_{on}} t + I, \text{ ce qui en résulte :}$$

$$W_{k2OFF} = 0$$

L'énergie dissipée à la fermeture est:

$$W_{k2ON} = \int_{\alpha T_s}^{\alpha T_s + t_{on}} v_{k2}(t) i_{k2}(t) dt \quad \text{avec } v_{k2}(t) = 0 \text{ et } i_{k2}(t) = \frac{I}{t_{off}}(t - \alpha T_s), \text{ ce qui en résulte :}$$

$$W_{k2ON} = 0$$

L'énergie totale dissipée par commutation est :

$$W_{k2} = W_{k2ON} + W_{k2OFF} = 0$$

La puissance dissipée par commutation est :

$$P_{ck2} = \frac{W_{k2}}{T_s} = 0$$

3- La puissance perdue par commutation dans le convertisseur est :

$$P_c = 2(P_{ck1} + P_{ck2}) = 2P_{ck1} = 90W$$