

## Chapitre 2 : Mécanisme de commutation et méthode de conception des convertisseurs statiques

Lors d'une conception des convertisseurs statiques formés principalement des interrupteurs à SC est sources (entrée-sortie), la connaissance des *caractéristiques* et *natures* de commutation de ces interrupteurs est requise, ainsi que la liaison ou la connexion de ces sources pour assurer le transfert de l'énergie.

### I. Nature de commutation :

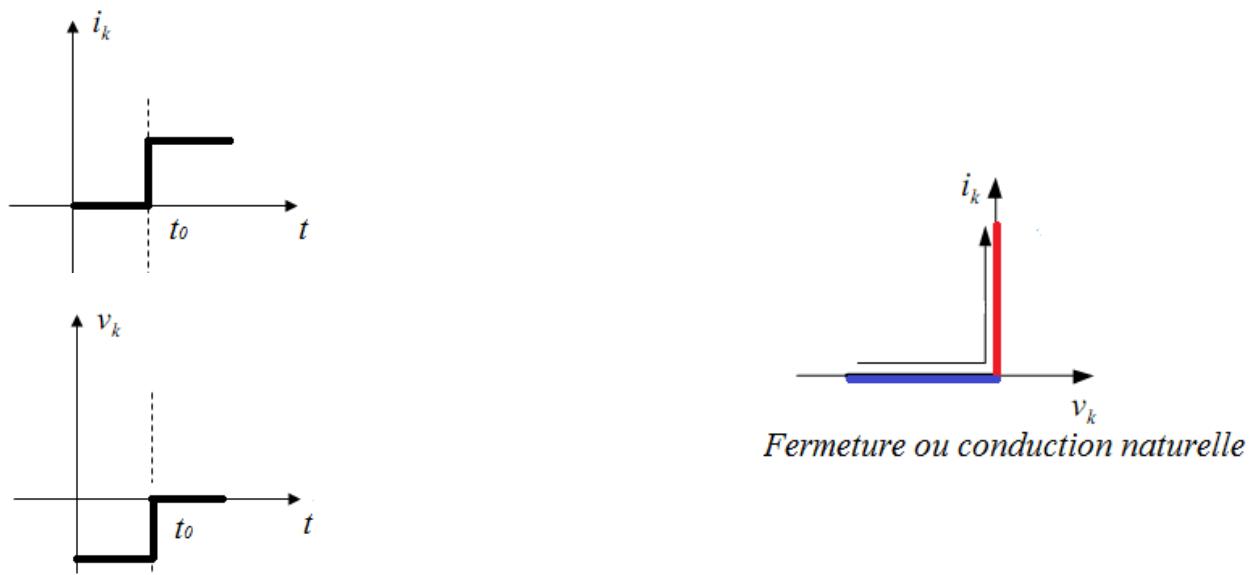
La commutation d'un interrupteur semi-conducteur peut être spontanée (naturelle) ou commandée.

**Commutation naturelle (on conduction ou en blocage)** : le changement d'état est imposé par les variables de circuit de puissance.

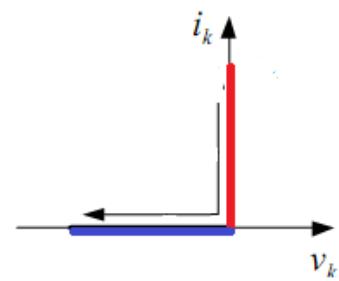
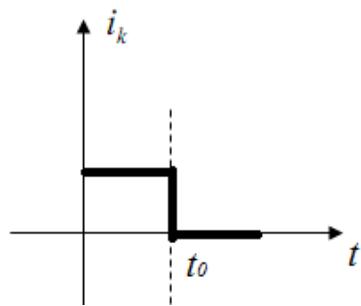
**Commutation commandée (on conduction ou en blocage)** : le changement d'état est assuré par un signal de commande

### Comportement courants – tensions en fonction du temps lors d'une commutation naturelle :

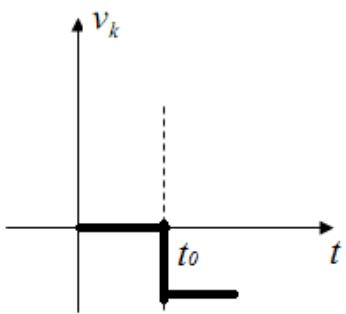
Si on suppose que la durée des commutations nulles, et on considère que le changement de l'interrupteur  $k$  d'état correspond à *l'instant  $t_0$*



Conduction à l'instant  $t_0$

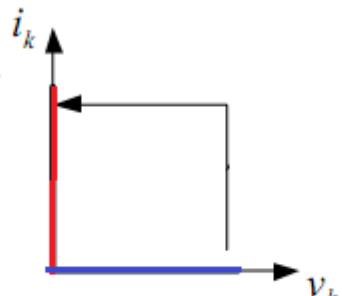
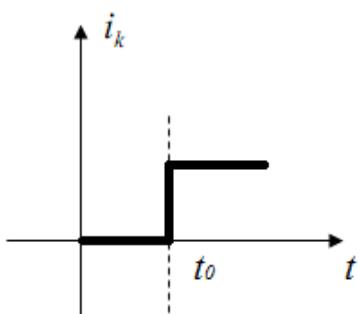


Ouverture ou blocage naturel

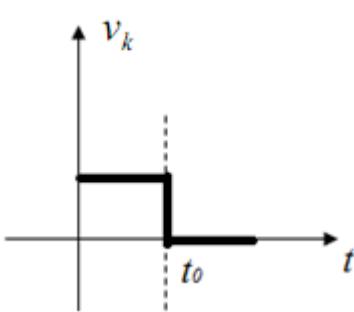


Blocage à l'instant  $t_0$

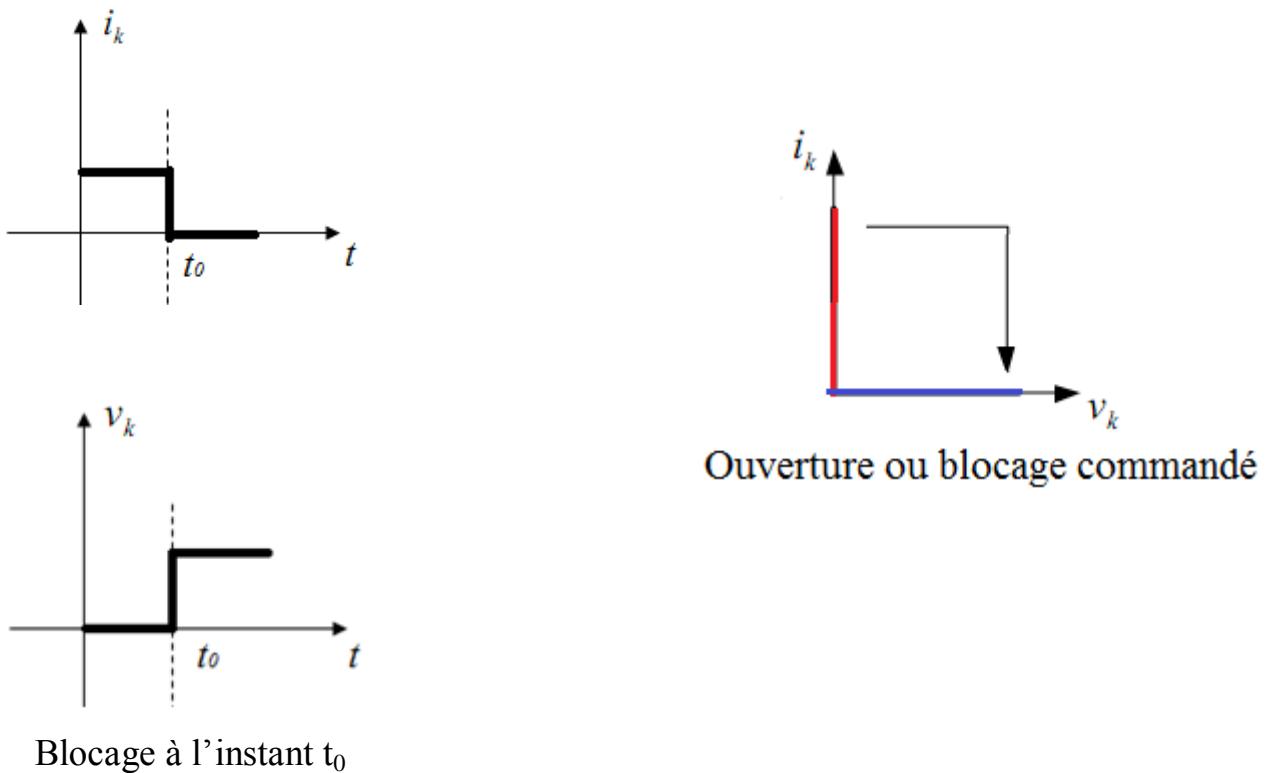
**Comportement courants – tensions en fonction du temps lors d'une commutation Commandée :**



Fermeture ou conduction commandée



Conduction à l'instant  $t_0$



D'après les allures, on peut reconnaître donc la nature des commutations par rapport à la forme d'onde de courant et des tensions.

En effet :

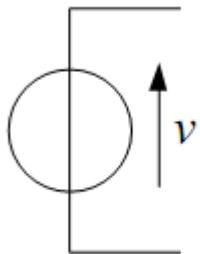
- Dans une *commutation commandée* le courant dans l'interrupteur lorsqu'il est fermé et la tension à ces bornes lorsqu'il est ouvert sont de même signe.
- Dans une *commutation spontanée* ce courant dans l'interrupteur et cette tension sont de signe opposé (contraire).

## **II. Connexion d'une source à une charge en électronique de puissance :**

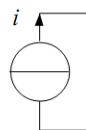
Un convertisseur statique contient des générateurs et récepteurs entre lesquels sont montés des interrupteurs à SC. Ces sources d'énergie et ces récepteurs doivent être compatibles pour assurer l'opération de conversion.

On distingue deux types de sources de puissance :

- **Source de tension** : considérer comme un dipôle assurant la continuité de la tension dans le cadre d'une commutation.



- **Source de courant** : considérer comme un dipôle imposant la continuité du courant dans le cadre d'une commutation.



**NB :**

Les inductances et les condensateurs sont considérés comme des sources instantanées. En effet :

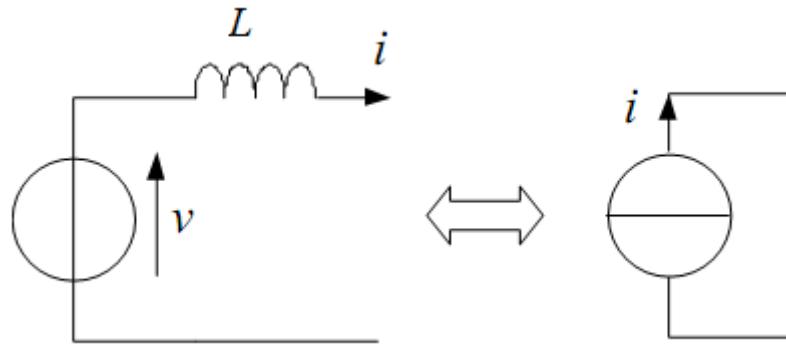
- L'inductance (source de courant instantanée) avec  $u = L \frac{di}{dt}$  : interdit tout discontinue de courant (s'oppose aux variations brusques du courant), sinon la tension  $u$  tend vers l'infinie. Elle est utilisée pour lisser le courant.
- Le condensateur (source de tension instantanée) avec  $i = C \frac{du}{dt}$  : assure la continuité de la tension (s'oppose aux variations brusques de tension). Elle est utilisée pour lisser la tension.

**N.B :** Les deux sources instantanées sont limitées à une certaine dynamique.

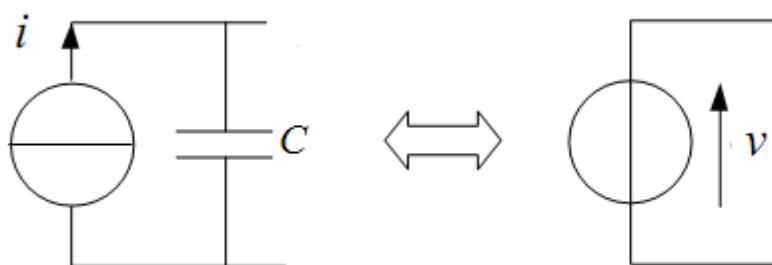
**II.1. Changement de nature des sources :**

Pour pouvoir réaliser des CS convenablement on peut effectuer les changements de nature suivants :

- une inductance de valeurs **L suffisante** placée en série avec une source de tension est l'équivalent d'une source de courant.



- un condensateur de **capacité C** suffisante placée en parallèle avec une source de courant est l'équivalent d'une source de tension.



### Remarque :

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

### Exemples de réversibilité

- Une batterie d'accumulateurs se comporte en récepteur lors de la charge, en générateur lors de la décharge; on dit que c'est une *source de tension réversible en courant*.
- Le circuit de l'induit d'une machine à courant continu est assimilable à une f.é.m. en série avec une résistance et une inductance ; c'est donc *une source de courant réversible en tension et en courant*.

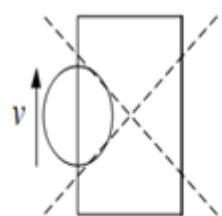
## **II.2. Règle d'interconnexion des sources**

Pour établir une configuration des convertisseurs statique, il faut respecter les trois règles suivantes

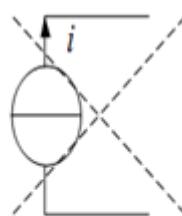
- 1/** Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée mais elle peut être ouverte (*pour éviter les surintensités*).
- 2/** Une source de courant ne doit jamais être ouverte mais elle peut être court-circuitée (*pour éviter les surtensions*).
- 3/** Il ne faut jamais connecter deux sources de même nature. Cela revient à dire qu'il est possible de connecter deux sources de natures différentes.

Cela conduit à respecter les configurations assurant le transfert continu de l'énergie comme suit :

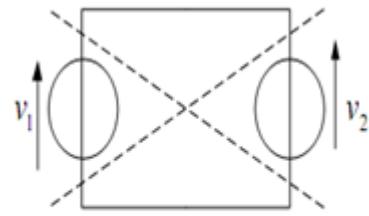
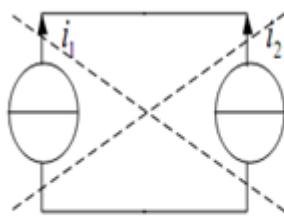
### ➤ **Configurations interdites**



*Ne pas court-circuiter  
une source de tension*

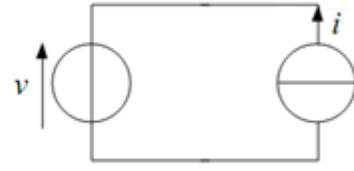
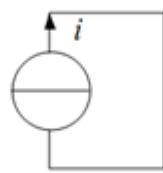
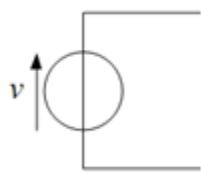


*Ne pas ouvrir une  
source de courant*



*Ne pas connecter deux sources de même nature*

## ➤ Configurations autorisées



Aussi ;

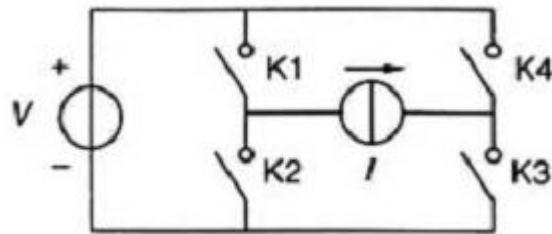
Il faut noter que pour connecter **deux sources de tension**, le convertisseur doit contenir un **élément inductif**. De même, pour connecter **deux sources de courant**, le convertisseur doit contenir un **élément capacitif**.

### III. Structure des convertisseurs :

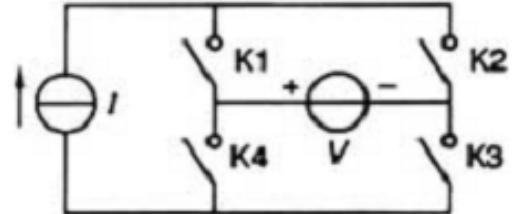
On distingue les convertisseurs *directs et indirects*.

#### III.1. Structure des convertisseurs directs :

Les sources d'entrée et de sorties sont de nature différentes. Le convertisseur statique peut contenir, dans ce cas, que des interrupteurs à semi-conducteur.



Convertisseur directe tension-courant

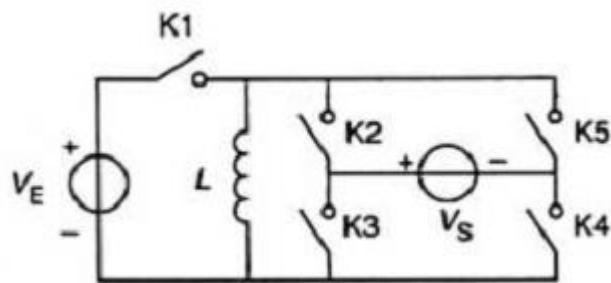


Convertisseur directe courant-tension

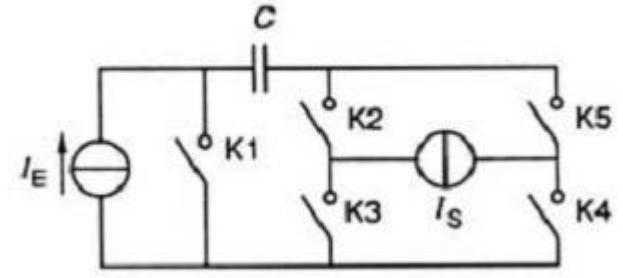
*Configuration de base*

### III.2 Structure des convertisseurs indirects :

Les sources d'entrée et de sortie sont de nature identique, et pour les relier, il faut faire appel à des éléments de stockage (inductance L ou capacité C)



Convertisseur indirecte tension-tension



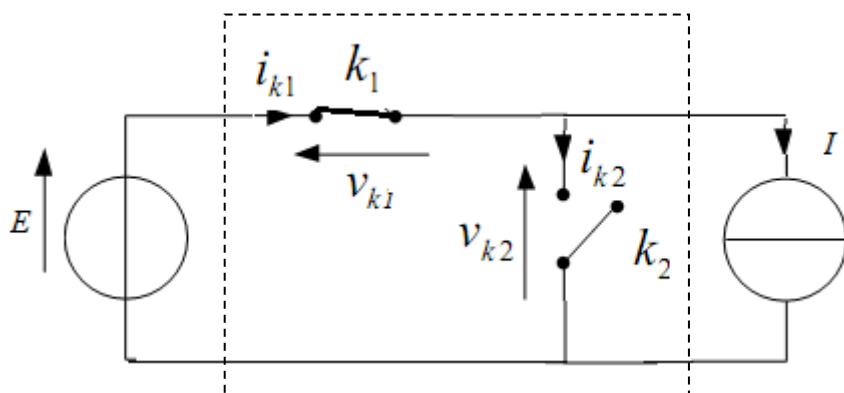
Convertisseur indirecte courant-courant

#### Configuration de base

### IV. Cellules de commutations

Les CS de l'EP sont réalisés par des interrupteurs assurant le respect des règles d'association et d'interconnexions des sources. Cela conduit à utiliser au minimum une structure à deux interrupteurs, le 1<sup>er</sup> connecte les sources entre elles et le 2<sup>ème</sup> assure le respect des règles d'interconnexions des sources.

Une telle structure contenant deux interrupteurs est nommée « *Cellules de commutations* ». Les deux commutateurs sont **nécessairement complémentaires** (le 1<sup>er</sup> est ouvert lorsque le 2<sup>ème</sup> est fermé et vice versa).



La cellule de commutation

Les équations électriques correspondant au fonctionnement de la cellule de commutation associé aux deux sources :

$$V_{k1} + V_{k2} = E$$

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

C'est lois sont toujours vraies quelque soit l'état des interrupteurs à condition qu'ils soient complémentaires  $K_1 = \overline{K_2}$  (quand l'un est fermé l'autre est ouvert)

**Supposant le cas** où  $E > 0$  et  $I > 0$

Lorsque  $K_1$  passant et  $K_2$  bloqué ( $K_1$  et  $K_2$  sont parfaites)

$$V_{k1} = 0, i_{k1} = I$$

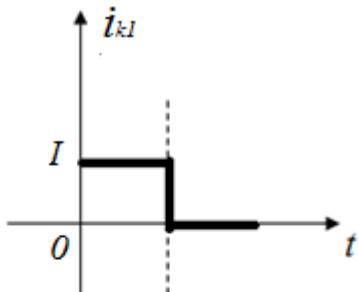
$$V_{k2} = E, i_{k2} = 0$$

Lorsque  $K_1$  bloqué et  $K_2$  passant

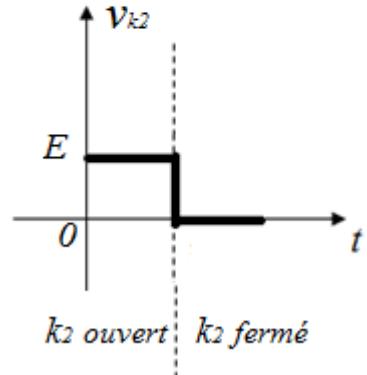
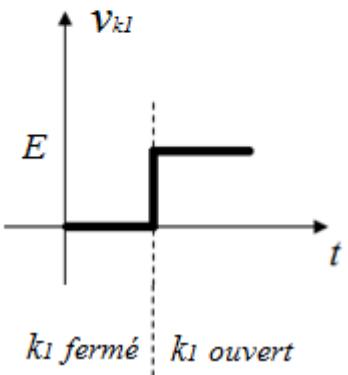
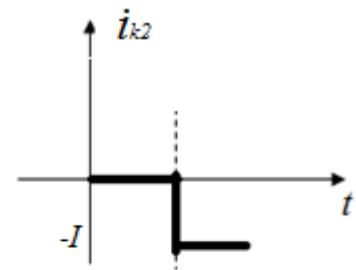
$$V_{k1} = E, i_{k1} = 0$$

$$V_{k2} = 0, i_{k2} = -I$$

Interrupteur  $K_1$



Interrupteur  $K_2$



$k_1$  fermé       $k_1$  ouvert

$k_2$  ouvert       $k_2$  fermé

### Point de fonctionnement statique (cas fermé et ouvert)



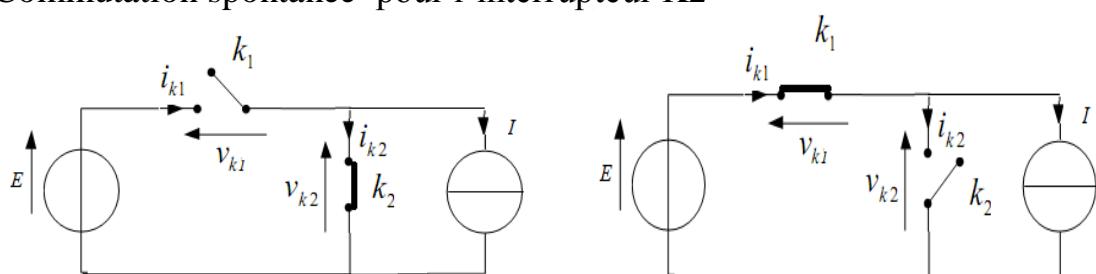
### Caractéristiques dynamiques



Dans ce cas ( $E > 0$  et  $I > 0$ ) on constate :

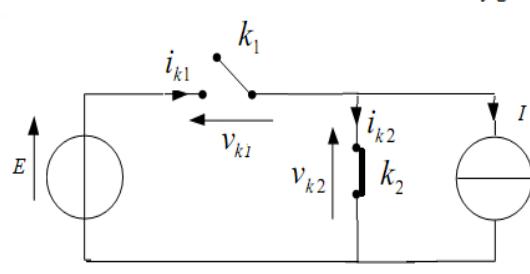
Commutation commandée pour l'interrupteur K1

Commutation spontanée pour l'interrupteur K2

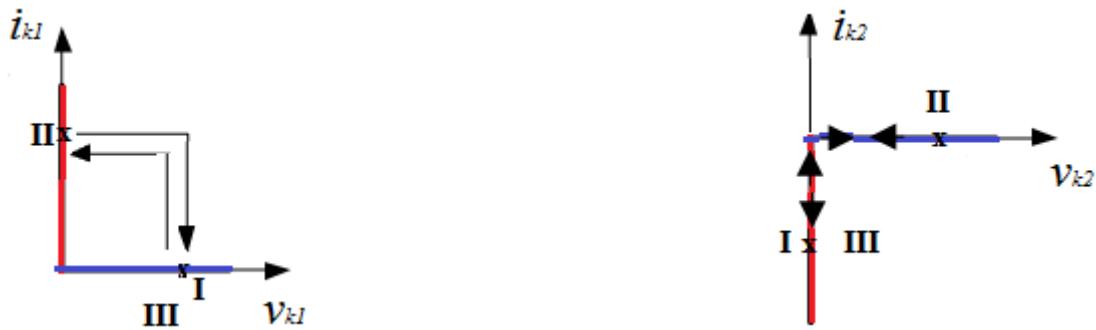


Configuration I

Configuration II

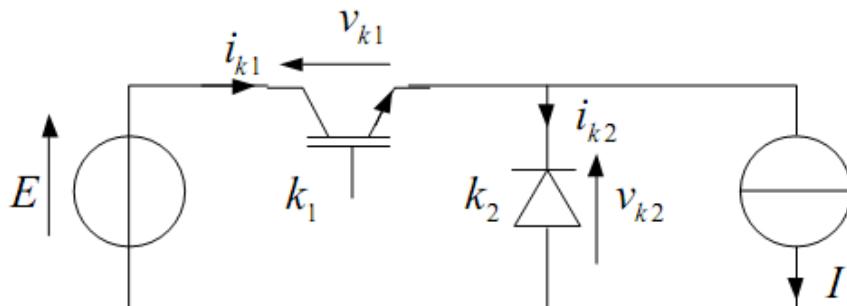


Configuration III



Ce cas (lorsque  $E > 0$  et  $I > 0$ ) correspond donc à un interrupteur *unidirectionnel* commandé à la fermeture et ouverture (transistor par exemple) et un autre interrupteur *unidirectionnel* à fermeture et blocage spontanés (diode).

On peut déduire alors dans ce cas une structure de *hacheur dévolteur non réversible*.

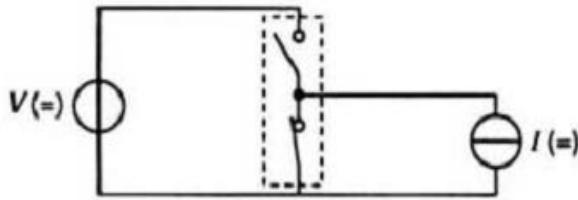


### Remarque :

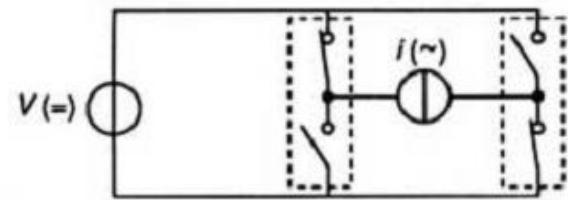
la réversibilité des interrupteurs est liée à la réversibilité des sources en tension pour une source de tension et en courant pour une source de courant.

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 convertisseur statique.

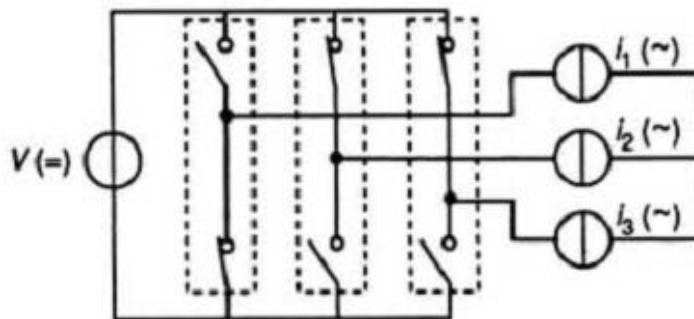
**Exemple de structures avec cellules élémentaires de commutation :**



Hacheur



Onduleur de tension monophasé



Onduleur de tension triphasé

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 convertisseur statique.

**V. Etapes de la synthèse d'un convertisseur statique**

La démarche de synthèse des convertisseurs statiques se base ainsi tout simplement sur le 'cahier des charges' du circuit et permet généralement une détermination totale de la structure par le suivi des étapes suivants :

- 1/ nature des sources d'entrée et de sortie et réversibilité des sources. En déduit la configuration de base (direct ou indirect)
- 2/ Identifier les séquences de fonctionnement nécessaires.
- 3/ Détermination des caractéristiques statiques  $i_k(v_k)$  de chaque interrupteur correspondants.
- 4/ Détermination des natures de commutation de chaque interrupteur
- 5/ En déduire les composants semi-conducteurs à utiliser.

## **VI. Estimation des pertes dans les convertisseurs statiques :**

Dans le cas **d'un interrupteur** réel on considère une **chute de tension** non nulle à l'état ON, un **courant de fuite** non nul à l'état OFF, un **temps de commutation** (passage de l'état ON à l'état OFF ou l'inverse) non nul aussi.

Dans un semi conducteur de puissance, on distingue principalement deux types de pertes :

**Les pertes par conduction**  $P_{cond}$  : dues au passage du courant qui est accompagné d'une chute de tension aux bornes du S.C.

**Les pertes par commutation**  $P_{com}$  : dues au fait que chaque fermeture ou ouverture de l'interrupteur S.C s'accompagné d'une certaine quantité d'énergie. Ces deux types de pertes correspondent aux valeurs moyennes des puissances associées:

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \int_T p_{kcond} dt = \frac{1}{T} W_{cond}$$

$$P_{com} = \frac{1}{T} \int_T p_{kcom} dt = \frac{1}{T} W_{com}$$

Avec

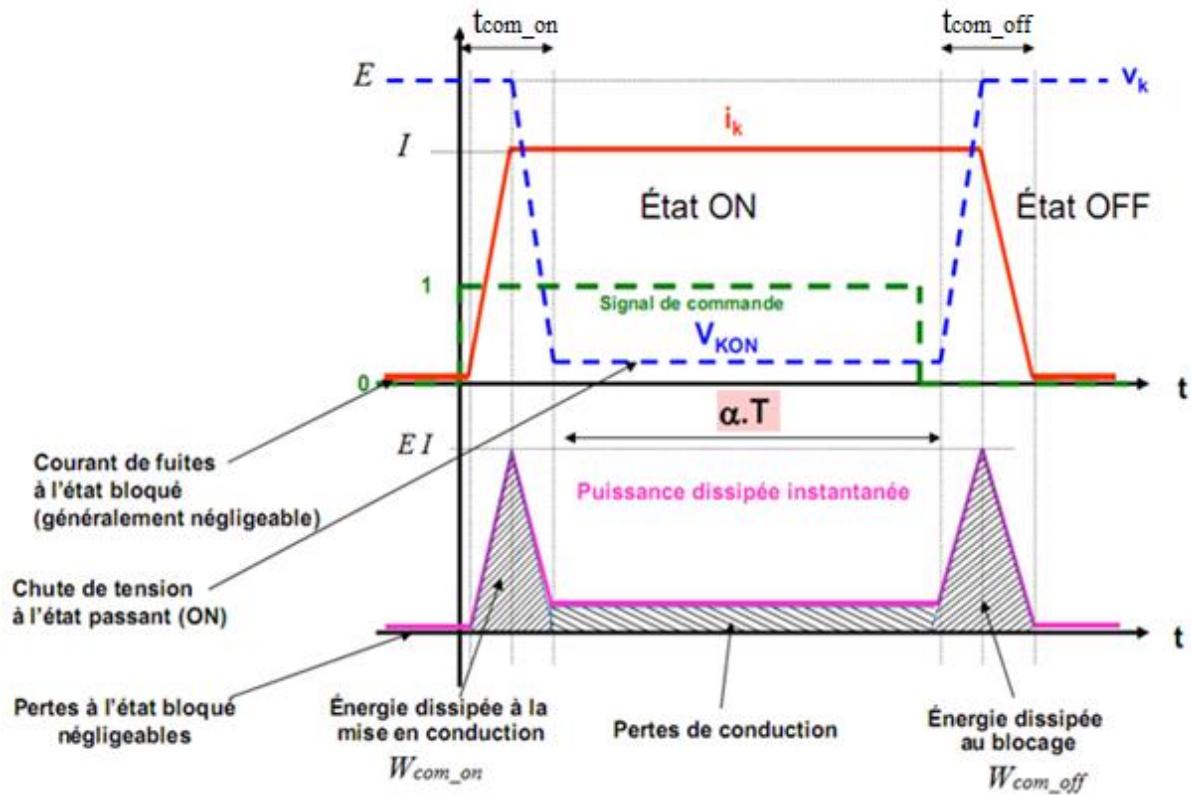
$$P_{com} = f W_{com}$$

Avec  $f$  fréquences de découpage ( $f = \frac{1}{T}$ )

$W_{cond}$  : énergie consommée par le composant lors de la conduction.

$W_{com}$  : énergie consommée par le composant lors de la commutation (fermeture ou ouverture)

Dans le cas de la cellule de commutation, les pertes par commutation du transistor sont estimées comme suit :



$$W_{com\_on} \approx \frac{1}{2} E I (t_{com\_on})$$

$$W_{com\_off} \approx \frac{1}{2} E I (t_{com\_off})$$

$$P_{com} = f W_{com}$$

$$P_{com} = \frac{1}{2} f E I (t_{com\_on} + t_{com\_off})$$

Et les pertes par conductions sont estimées :

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \int_{\alpha T} V_{kon} I dt = \alpha V_{kon} I$$

$\alpha T$  : Durée de conduction du transistor dans une période T.

Avec  $\alpha$  est le rapport cyclique ( $0 < \alpha < 1$ )

Aussi  $P_{cond}$  dans le transistor peut être estimé par la relation :

$$P_{cond\_T} = R_{DS-ON} I_{Teff}^2$$

$R_{DS-ON}$  : résistance du transistor à l'état passant et  $I_{Teff}$  son courant efficace.

➤ Dans une diode les pertes par conduction peuvent être estimées par :

$$P_{cond\_D} = V_s I_{Dmoy} + r_d I_{Dmoy}^2$$

Avec :  $V_s$  : tension de seuil

$r_d$  : résistance dite « dynamique»

$I_{Dmoy}$  courant moyen traversant la diode.

$I_{Dmoy}$  courant efficace de la diode.

Approximativement ses pertes correspondent aussi :

$$P_{cond\_D} \approx V_f I_{Dmoy}$$

Avec  $V_f$ : chute de tension à l'état passant (correspondant au courant nominal)

➤ **Le rendement :**

Le rendement dans les convertisseurs statiques s'exprime :

$$\eta = \frac{P_s}{P_s + \sum \text{pertes}}$$

