

CHAPITRE CP3

Conversion électronique

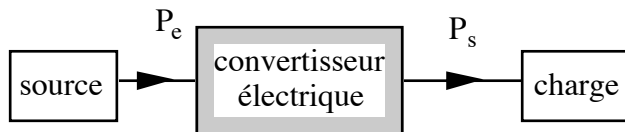
Contrairement aux convertisseurs électromécaniques, les convertisseurs électroniques, utilisés en électronique de puissance, ont des grandeurs d'entrée et de sortie de même nature, électriques.

Ce qui différencie l'électronique étudiée précédemment de l'électronique de puissance est l'intensité des courants mis en jeu : l'électronique de puissance s'intéresse aux courants de forte intensité.

Comme nous allons le voir, cela implique un mode de fonctionnement des convertisseurs essentiellement basé sur les opérations de commutation, ce qui leur permet de transférer de la puissance en minimisant les pertes.

1. L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE : UNE ELECTRONIQUE DE COMMUTATION

◆ La notion de base associée à toute transformation est la notion de *rendement* η , rapport de la puissance utile délivrée à la charge à la puissance reçue de la source.



$$\eta = \frac{P_s}{P_e} \quad \text{avec} \quad P_s + P_p = P_e$$

où P_e est la puissance reçue en entrée (par un générateur), P_s la puissance délivrée en sortie et P_p la puissance perdue (effet Joule ici).

La recherche de bons rendements est évidemment liée à celle d'une diminution des puissances perdues. Elle est aussi indispensable afin d'éviter un échauffement trop important de l'appareillage. Il est d'ailleurs à noter que les volumes et coûts des systèmes de refroidissement des convertisseurs électroniques sont du même ordre de grandeur que ceux des convertisseurs eux-mêmes.

◆ Les *puissances* mises en jeu aux bornes des convertisseurs électroniques sont de l'ordre de 100 W à quelques 100 kW.

◆ Comme les courants sont importants (10^3 A pour une locomotive ; 10^6 A pour les alternateurs de centrale nucléaire), la moindre chute de tension entre source et charge occasionne de lourdes pertes. On ne peut pas travailler en régime permanent comme en électronique (dont la fonction essentielle est le traitement du signal). On travaille en régime de *commutation*, fonctionnement pour lequel **le composant de base est le semi-conducteur de puissance fonctionnant en « interrupteur »**. Ce type de composant a les propriétés suivantes :

- lorsqu'il est soumis à une tension, même élevée, les courants qui le traversent sont négligeables (pour que la puissance consommée soit minimale) : « l'interrupteur » est alors ouvert ;

- lorsqu'il est traversé par un courant, même d'intensité élevée, la chute de tension à ses bornes est négligeable : « l'interrupteur » est alors fermé.

Ces interrupteurs, ouverts et fermés de manière cyclique, découpent (ou « hachent ») les courants ou tension d'entrée à fréquence fixe (généralement de l'ordre de plusieurs kilohertz)

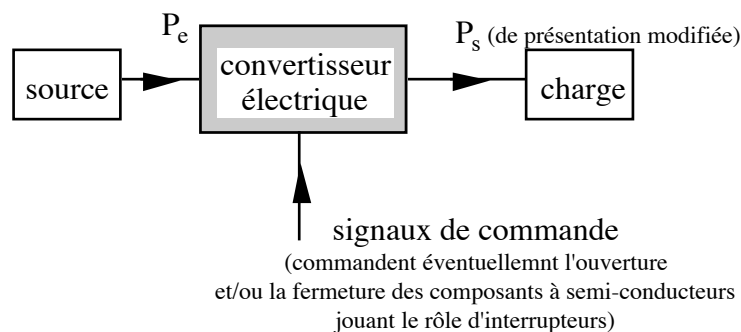
◆ La puissance sortant d'un convertisseur électronique de puissance est donc, aux pertes près (minimisées, comme on vient de la voir, par le fonctionnement en commutation) égale à celle fournie par la source reliée à l'entrée. Le convertisseur, essentiellement constitué « d'interrupteurs », permet en fait de *modifier la présentation de cette puissance*. Selon les cas, ces convertisseurs portent différents noms :

| | source en continu | source en alternatif |
|----------------------|--------------------|-------------------------------------|
| charge en continu | Hacheur (1) | Redresseur (2) |
| charge en alternatif | Onduleur(3) | Gradateur/conv. de fréq. (4) |

Exemples d'utilisation :

- (1) variateur de vitesse d'un moteur à courant continu alimenté par une source continue.
- (2) alimentation d'un moteur à courant continu alimenté par le réseau - Alimentations stabilisées.
- (3) récupération de puissance dans le cas du freinage du (2)
- (4) four à microondes.

◆ Le schéma de principe d'un convertisseur électronique est donc le suivant :



Les convertisseurs de puissance électronique sont donc constitués « d'interrupteurs » et d'éléments de stockage d'énergie (bobines ou condensateurs idéaux qui n'absorbent aucune puissance moyenne, leur facteur de puissance étant nul). Nous allons tout de suite voir la modélisation de ces différents éléments.

2. MODELISATION DES COMPOSANTS DE BASE DE L' ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

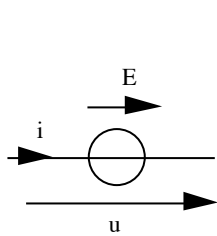
2.1 Sources d'entrée et de sortie

2-1-1 Modélisation par des sources de courant et de tension

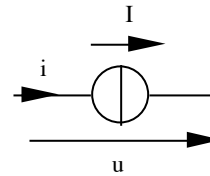
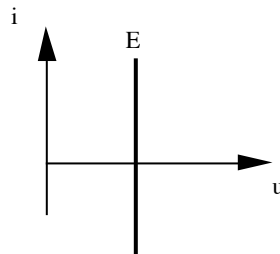
Un convertisseur de puissance est placé entre un générateur et une charge appelés respectivement « sources d'entrée » et « source de sortie ». L'intérêt de cette dénomination apparaîtra lorsqu'on envisagera la réversibilité du convertisseur, la source de sortie pouvant alors fournir de la puissance à

la source d'entrée dans certaines phases de fonctionnement (au cours du freinage d'un moteur par exemple).

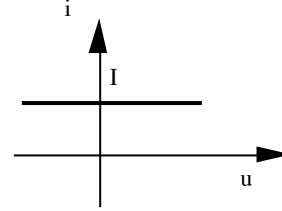
Comme en électronique, on rencontrera des sources de tension et de courant « classiques » dont on rappelle les caractéristiques **idéales** :



source idéale de tension



source idéale de courant



Une **source réelle** comporte une résistance interne, représentée en série sur la source de tension et en parallèle sur la source de courant.

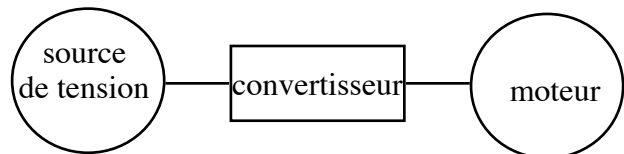
On a ici envisagé le cas de **sources réversibles** puisque leurs caractéristiques font apparaître des zones où la puissance reçue $P = -ui$ peut être positive. Dans ces zones, les sources se comportent comme des récepteurs.

Les **sources** pour lesquelles ça n'est pas possible sont dites **unidirectionnelles**.

La réversibilité d'une chaîne de conversion de puissance suppose la réversibilité de chacun de ses éléments (du convertisseur et de ses sources d'entrée et de sortie).

2-1-2 Exemple

On peut utiliser un convertisseur électronique dans le cas de l'alimentation d'une machine à courant continu. Le convertisseur permet de régler la puissance transférée à la machine.



Dans ce cas, la source d'entrée est une source de tension continue, et la source de sortie une source de courant, modélisant la machine à courant continu.

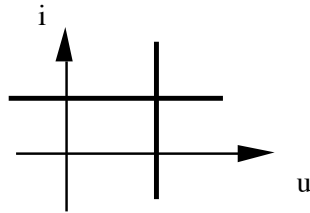
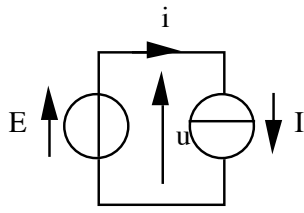
Lors des phases de traction (mise en mouvement et maintien à vitesse constante), la source d'entrée fournit de la puissance électrique au moteur.

Lors des phases de freinage, il est possible de récupérer une partie de l'énergie cinétique du moteur à condition que la source d'entrée et le convertisseur soient réversibles.

2-2 Règles d'association des sources

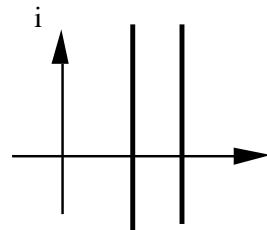
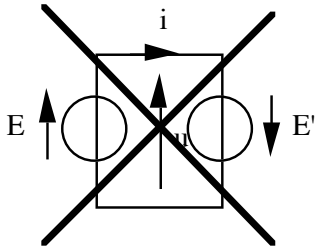
Au cours du fonctionnement du convertisseur, des sources vont être connectées entre elles pendant certaines phases de fonctionnement. Certaines règles sont à respecter :

- On peut interconnecter une source de tension et une source de courant :



Le point de fonctionnement du circuit correspond alors à $u = E$ et $i = I$.

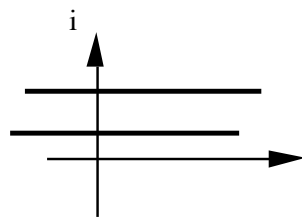
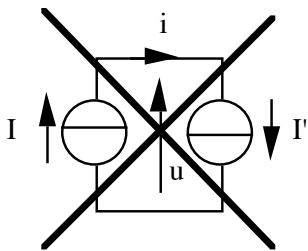
- On ne peut pas (et ne doit pas !) interconnecter deux sources de tension différentes



Le courant échangé deviendrait alors très grand et l'on aboutirait à une destruction.

En particulier, ***il ne faut donc jamais court-circuiter une source de tension.***

- On ne peut pas (et ne doit pas !) interconnecter deux sources de courant différentes



La tension à leurs bornes deviendrait alors très grande et l'on aboutirait à une destruction.

En particulier, ***il ne faut donc jamais laisser une source de courant en circuit ouvert.***

2.3 Amélioration des sources

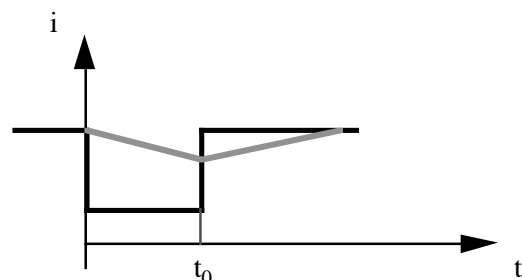
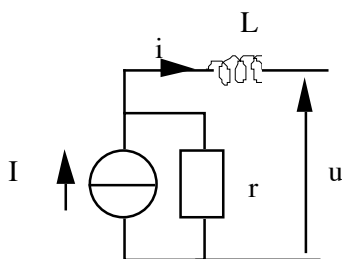
Il s'agit d'améliorer les sources en faisant en sorte que les surtensions ou les surintensités accidentelles soient atténuées.

2-3-1 Amélioration d'une source de courant réelle.

Imaginons le cas d'une source de courant réelle aux bornes de laquelle apparaît une surtension Δu entre 0 et t_0 .

Sans la bobine, cela produit un saut proportionnel de l'intensité délivrée par la source.

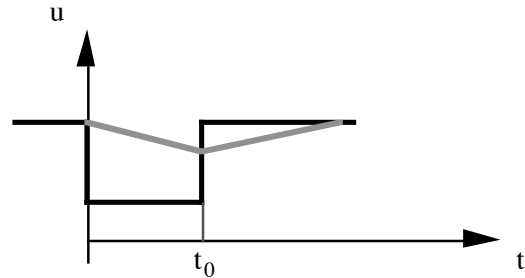
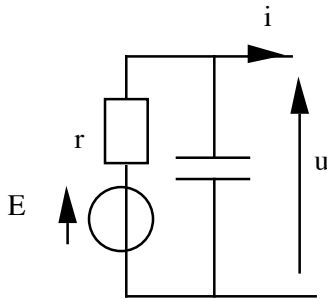
La bobine permet de *diminuer l'ondulation du courant* : cela vient de la propriété de continuité du courant traversant ce composant. En outre, plus l'inductance est grande, plus l'ondulation est faible (loi de modération : plus la fém d'induction s'opposant aux variations de i sous l'effet des variations de u est grande).



2-3-2 Amélioration d'une source de tension réelle.

De façon analogue, on placera un condensateur en parallèle sur une source de tension afin de minimiser l'ondulation de la tension pouvant apparaître sous l'effet d'une surintensité.

On utilise dans ce cas la propriété de continuité de la charge et donc de la tension aux bornes d'un condensateur.



2.4 Changement de nature des sources en présence de commutations

Le comportement des différents composants est celui qu'ils ont en régime transitoire : la fréquence de commutation des interrupteurs étant de plusieurs kilohertz, le régime permanent n'est jamais atteint et les notions de source de courant ou de tension sont à étendre.

En présence de commutations, une source est dite **source de tension** si elle ne s'oppose pas aux variations de courant qui la traverse mais que la tension à ses bornes varie peu.

Une source est dite **source de courant** si elle ne s'oppose pas aux variations de la tension à ses bornes mais que l'intensité qui la traverse varie peu.

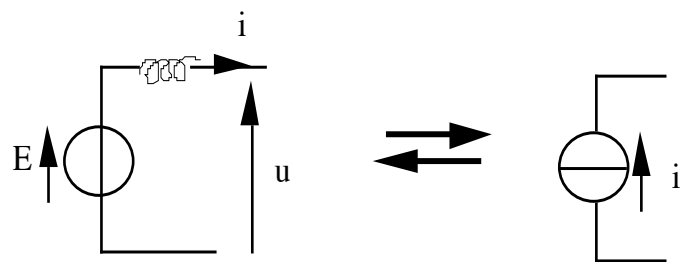
◆ Une source de tension voit sa nature modifiée si on la place en série avec une bobine : en présence de commutations, l'ensemble est équivalent à une source de courant.

En effet, on sait qu'une bobine s'oppose aux variations rapides du courant la traversant.

On a ici :

$$L \frac{di}{dt} = -u + E \text{ d'où } \frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(E - u)$$

Si L est suffisamment grande, les variations de i avec u sont faibles, ce qui correspond donc à la définition que nous avons donnée d'une source de courant.

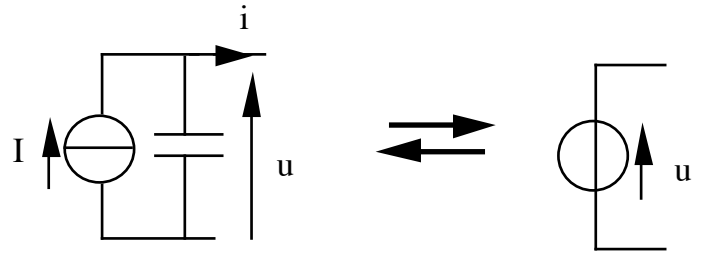


◆ Une source de courant voit sa nature modifiée si on la place en parallèle sur un condensateur : en présence de commutations, l'ensemble est équivalent à une source de tension.

En effet, on sait qu'un condensateur s'oppose aux variations rapides de la tension à ses bornes. On a ici :

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{C} (I - i)$$

Si C est suffisamment grande, les variations de u avec i sont faibles, ce qui correspond donc à la définition que nous avons donnée d'une source de tension.

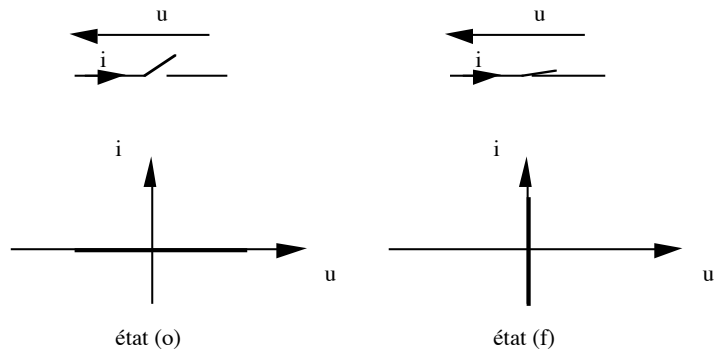


2.5 Interrupteurs idéaux. Interrupteurs réels. Fonctions de commutation

2-5-1 Caractéristiques idéales d'un interrupteur

Un interrupteur idéal peut présenter deux états correspondants aux caractéristiques suivantes :

- état ouvert (o) caractérisé par la relation $i = 0$;
- état fermé (f) caractérisé par la relation $u = 0$.

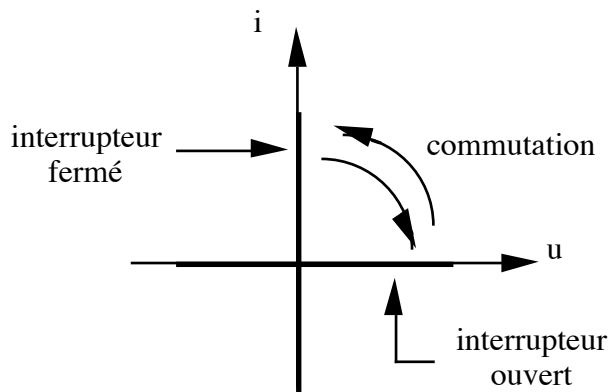


Les opérations de commutation sont les opérations de passage d'un état vers l'autre :

- ouverture (ou blocage) : passage de (f) à (o) ;
- fermeture (ou amorçage) : passage de (o) à (f).

Ces opérations peuvent être soit commandées de l'extérieur, soit naturelles.

u et i peuvent prendre dans ce cas idéal des valeurs positives ou négatives. On parle d'interrupteur 4 quadrants.



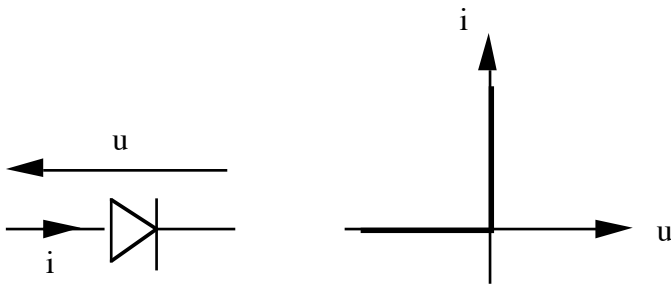
2-5-2 Les fonctions réelles. Les interrupteurs usuels

Le fonctionnement dans les quatre quadrants ($[u > 0$ ou $u < 0]$ et $[i > 0$ ou $i < 0]$) n'est généralement pas nécessaire et dans les dispositifs réels, les composants ne présentent qu'une partie des caractéristiques idéales : l'interrupteur est alors dit unidirectionnel.

Les fonctions de commutation que l'on rencontrera le plus fréquemment sont les suivantes :

Fonction diode D :

La *caractéristique idéale* d'une diode est :



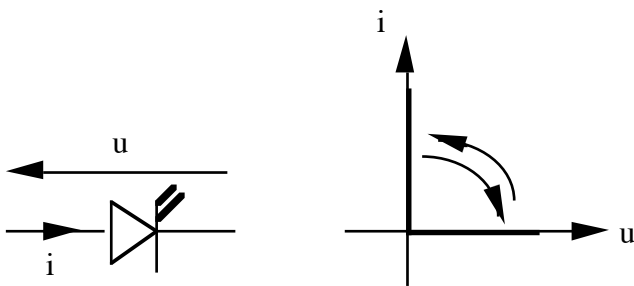
On a donc, pour cet élément, *unidirectionnalité* en courant et en tension. En effet, quand la diode est bloquée, la tension doit rester négative, et quand la diode est passante, le courant doit rester positif.

De plus, c'est un composant à **commutation spontanée** : le passage d'un état vers l'autre se fait par inversion du courant ou de la tension, sans intervention d'un dispositif annexe.

Fonction transistor T :

On ne s'intéressera pas dans ce cours à la technologie des composants (transistors et thyristors) réalisant ce type de fonction de commutation mais simplement à leur caractéristique.

La *caractéristique* pour une fonction T est :

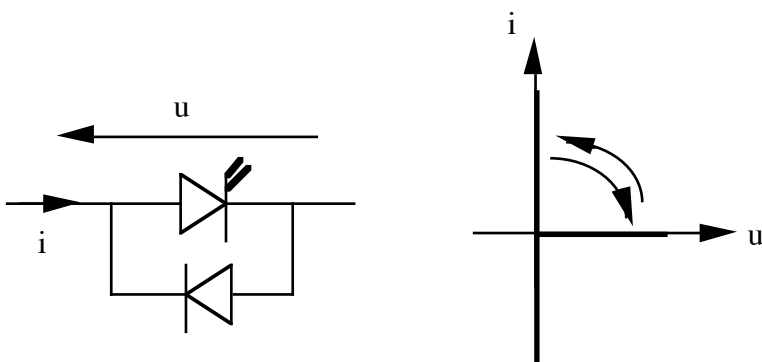


On a donc aussi, pour cet élément, *unidirectionnalité* en courant et en tension.

De plus, c'est un composant à **commutation commandée** : des électrodes de commande, représentées par le double trait oblique, permettent de déclencher soit l'amorçage (o → f lorsque la condition $i > 0$ est réalisée), soit le blocage (f → o lorsque la condition $u > 0$ est réalisée).

Remarque : en fait, le thyristor est un interrupteur unidirectionnel en courant uniquement, à fermeture commandée et à ouverture spontanée (lorsque la tension à ses bornes devient négative ou que l'intensité du courant qui le traverse devient nulle). Le transistor est un interrupteur commandé à l'ouverture et à la fermeture, dont le fonctionnement est limité à $i \geq 0$ et $u \geq 0$.

Autres fonctions :



On peut en obtenir par association des deux fonctions principales présentées ci-dessus. En voici un exemple :

Dans ce cas, l'unidirectionnalité en courant a disparu.

On peut remarquer que dans l'état passant avec $i < 0$, le blocage se fera par commutation spontanée, alors que dans l'état passant avec $i > 0$, elle se fera par commutation commandée.

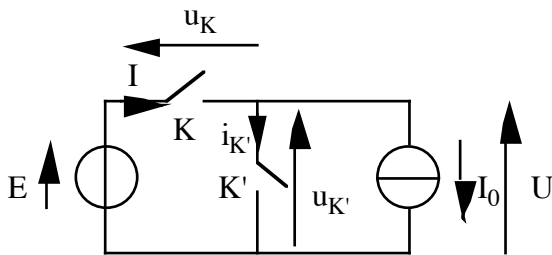
3. STRUCTURE GENERALE DES CONVERTISSEURS

3.1 Convertisseurs directs

Ils ne sont formés que d'interrupteurs.

On ne peut les envisager que *si les sources d'entrée et de sortie sont de natures différentes.*

3-1-1 Exemple d'une structure à deux interrupteurs : alimentation d'une source de courant.



On souhaite que la puissance transférée soit réglable par l'intermédiaire du dispositif de commande des interrupteurs.

◆ Parmi les configurations (o ; f) envisageables des interrupteurs, on remarque que :

K(f) et K'(f) est impossible (E serait alors court-circuitée) ;
K(o) et K'(o) est impossible (I_0 serait alors en circuit ouvert).

Restent donc les configurations {K(f) et K'(o)} ou {K(o) et K'(f)}.

◆ On peut donc envisager un fonctionnement périodique de période T du type :

Phase a : pour $0 \leq t \leq \alpha T$: les sources sont interconnectées {K(f) et K'(o)}. On a, dans cette phase échange de puissance entre les deux sources. En effet, $I = I_0$ et $U = E$: la puissance instantanée débitée par la source d'entrée est $E I_0$ = la puissance instantanée absorbée par la source de sortie. Le fait qu'il n'y ait aucune perte vient du fait que l'on a supposé les sources et les interrupteurs parfaits.

Phase b : pour $\alpha T \leq t \leq T$: {K(o) et K'(f)} : dans cette phase, les sources n'échangent aucune puissance instantanée. En effet, dans ce cas, $I = 0$ et $U = 0$: les puissances instantanées débitée par la source d'entrée et absorbée par la source de sortie sont donc nulles.

◆ La *puissance moyenne* transférée par le convertisseur entre les sources d'entrée et de sortie est :

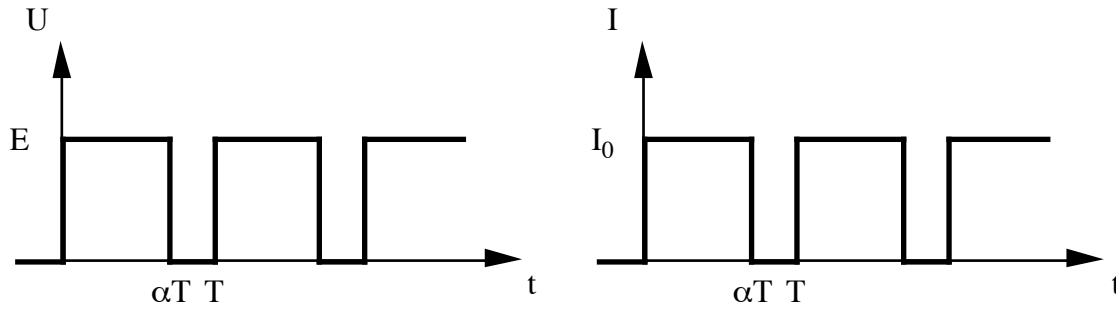
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T UI dt = \alpha EI_0$$

Il est donc possible de régler le transfert de puissance via le dispositif de commande, en jouant sur le coefficient α .

◆ La tension moyenne aux bornes de la source de sortie vaut $\langle U \rangle = \alpha E$ avec $\alpha < 1$: on appelle aussi ce montage **hacheur dévolteur**.

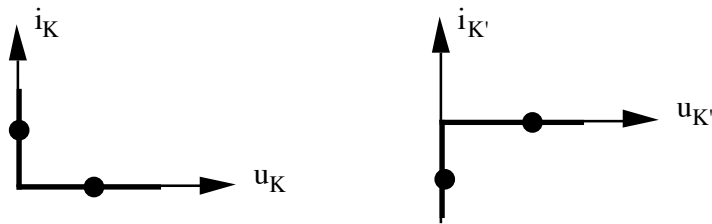
◆ *Choix des interrupteurs* dans le cas de sources unidirectionnelles : dans ce cas, $E > 0$ et $I_0 > 0$.

Les chronogrammes de U et I sont les suivants :



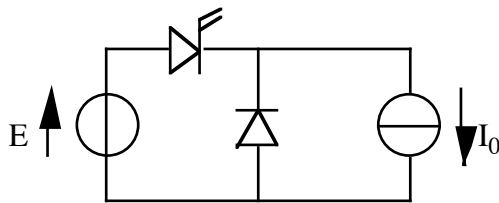
Dans la phase a : $u_K = 0$ et $i_K = I_0$; $u_{K'} = E$ et $i_{K'} = 0$.

Dans la phase b : $u_K = E$ et $i_K = 0$; $u_{K'} = 0$ et $i_{K'} = -I_0$.



Les points de fonctionnement des deux interrupteurs sont donc tels qu'on doit envisager une fonction T pour l'interrupteur K et une fonction D inverse pour K'.

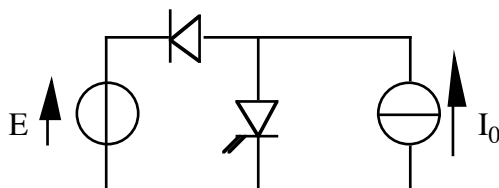
Le schéma final du convertisseur est donc le suivant : il est non réversible en tension et en courant.



On parle de **hacheur série**, car l'élément commandé (fonction T) est en série avec le générateur.

L'amorçage de la fonction T se fait en début de chaque période ; le blocage et l'amorçage de la fonction D se fait spontanément.

Remarque : si on inverse le sens de I_0 , les points de fonctionnement sont tels qu'il faut choisir une fonction D pour K et une fonction T pour K'.



On parle de **hacheur parallèle**, car l'élément commandé est en parallèle sur le générateur.

Ce montage permet le transfert de puissance de la source de courant vers la source de tension.

3-1-2 Alimentation d'un moteur à courant continu.

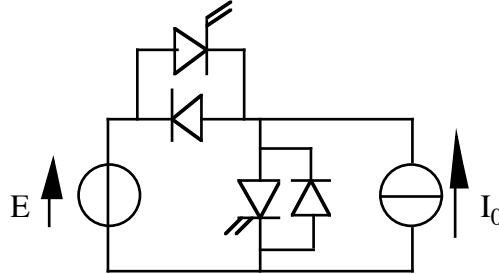
Un **moteur à courant continu** est bien représenté par l'association en série d'une f.é.m. et d'une bobine (voire en plus d'une résistance). Il se comporte donc en régime de commutation rapide (période de commutation faible devant sa constante de temps) **comme une source de courant**. Il pourra donc être alimenté par une source de tension associée à un hacheur série.

Afin d'avoir un courant d'alimentation du moteur le plus stable possible, il est parfois nécessaire de placer entre le hacheur et le moteur une bobine supplémentaire appelée **bobine de lissage**.

3.2 Convertisseur réversible en courant

La réversibilité des convertisseurs (à condition que les sources le permettent) implique des structures à interrupteurs plus complexes.

Dans l'exemple précédent, on peut envisager un fonctionnement réversible en courant ($I_0 > 0$ ou < 0) en combinant les deux montages série et parallèle. Ce montage permet donc un transfert de puissance réversible entre les sources d'entrée et de sortie.



On remarque que la valeur moyenne de la tension aux bornes de la source de sortie ne peut pas s'inverser : on parle de convertisseur deux quadrants ($I_0 > 0$ ou < 0).

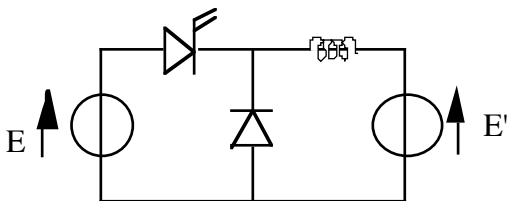
3.3 Convertisseurs à liaison indirecte

Dans le *cas où les sources d'entrée et de sortie sont de même nature*, les phases d'interconnexion sont interdites. On peut toutefois transférer de la puissance de l'une à l'autre en utilisant deux méthodes :

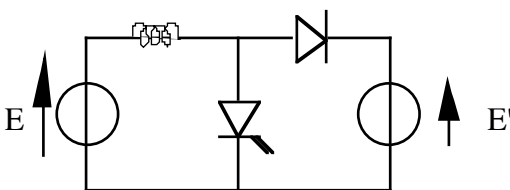
◆ La première consiste à changer la nature de l'une des deux sources à l'aide, comme on l'a vu précédemment d'un condensateur ou d'une bobine ;

◆ La seconde permet le transfert par l'intermédiaire d'un élément de stockage d'énergie (condensateur ou bobine) qui stocke de l'énergie provenant de la source d'entrée dans certaines phases de fonctionnement et en restitue à la source de sortie dans les autres phases : les convertisseurs fonctionnant sur ce principe sont appelés « *hacheurs à accumulation* ».

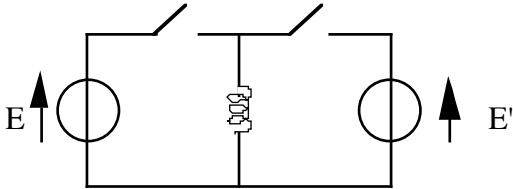
Ainsi, les trois montages permettant le transfert de puissance entre deux sources de tension sont les suivants :



Le récepteur est transformé en source de courant :
on retrouve le montage du hacheur série.



Le générateur est transformé en source de courant :
on retrouve le montage du hacheur parallèle.



Le transfert d'énergie entre les deux sources de tension s'effectue par l'intermédiaire d'une bobine qui joue le rôle d'élément de stockage d'énergie.

La bobine (ici supposée idéale !) n'absorbe aucune puissance moyenne et permet dans une première phase de fonctionnement (interrupteur de gauche fermé, interrupteur de droite ouvert) de stocker de l'énergie provenant de la source de tension E.

Dans la seconde phase (état inversé des interrupteurs), la bobine restitue cette énergie à la source de sortie.

Le rapport cyclique, rapport des durées des deux phases de fonctionnement, permet de régler la puissance transférée de la source d'entrée vers la source de sortie.

Pour le transfert d'énergie entre deux sources de courant, l'élément de stockage utilisé est le condensateur. Les règles d'interconnexion données au début du chapitre permettent de déduire la structure de ce convertisseur.

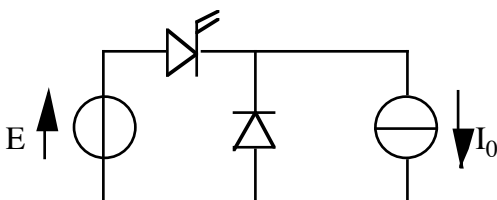
4. EXEMPLE D'APPLICATION

Alimentation d'une machine à courant continu

Il peut paraître aberrant de vouloir alimenter une machine à courant continu par une source de tension via un dispositif à interrupteurs délivrant des tensions ou courants « hachés », donc non permanents. En fait, la fréquence de fonctionnement du hacheur est grande devant la constante de temps caractéristique de la machine pour laquelle tout se passe alors comme si elle était alimentée par la tension moyenne délivrée par le hacheur.

On suppose donc qu'une source de tension continue idéale alimente une source de courant (machine à courant continu), la puissance moyenne échangée devant être réglée par l'opérateur.

Phase de traction :



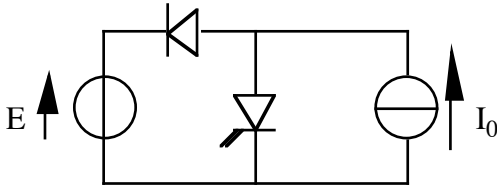
C'est le montage **hacheur série**. Avec les phases de fonctionnement étudiées précédemment, la puissance moyenne transférée est $P = \alpha EI_0$ où α est le rapport cyclique imposé par la commande des interrupteurs.

Au démarrage, la puissance transférée au moteur permet d'accroître l'énergie cinétique de rotation de l'arbre jusqu'à l'obtention de la vitesse désirée. La montée en puissance doit être progressive afin d'éviter des efforts mécaniques excessifs au démarrage.

Dans le cas d'un maintien à vitesse constante, cette puissance doit compenser les pertes par frottement et par effet Joule.

Le coefficient α doit donc varier au cours de ces différentes opérations et être adapté en cas de perturbations extérieures venant dérégler la vitesse du moteur : ceci se fait par des montages à boucle de rétroaction qui permettent d'assurer ces fonctions de régulation et d'asservissement.

Phase de freinage et de récupération :



Lors des phases de freinage, la machine doit pouvoir fonctionner en génératrice, ce qui implique un sens du courant qui s'inverse dans l'induit du moteur. On peut donc envisager le montage hacheur parallèle. Pour autoriser les modes de fonctionnement on utilisera donc le montage complet, réversible en courant (cf §32).