

# **Conversion de puissance Chap5 – Convertisseurs électroniques statiques : Hacheur, redresseur, onduleur**

## **1. Principe de la conversion électronique de puissance**

- 1.1. Ordres de grandeurs en électronique de puissance
- 1.2. Intérêt des convertisseurs électroniques à interrupteurs
- 1.3. Les quatre classes de convertisseurs électroniques

## **2. Les interrupteurs électroniques**

- 2.1. Interrupteur idéal
- 2.2. Interrupteur à commutation *spontanée* : fonction diode
- 2.3. Interrupteur à commutation *commandée* : fonction transistor
- 2.4. Unidirectionnalité des interrupteurs

## **3. Sources d'entrée et de sortie impliquées dans la conversion**

- 3.1. Générateur / récepteur
- 3.2. Source de tension – Source de courant – Sources idéales
- 3.3. Source réelle + (L ou C) = source quasi-idéale
- 3.4. (*Facultatif*) Réversibilité des sources en tension, en courant, en puissance
- 3.5. Règles d'association des sources idéales

## **4. Hacheur série (convertisseur direct)**

- 4.1. Principe des hacheurs – Structures possibles
- 4.2. Phases de fonctionnement – Chronogrammes
- 4.3. Identification de la nature des interrupteurs
- 4.4. Valeurs moyennes de tension, courant et puissance
- 4.5. (*Culturel*) Un mot sur le hacheur parallèle et les hacheurs réversibles

## **5. Application à la commande en vitesse d'un moteur CC**

- 5.1. Chronogrammes
- 5.2. Lien entre vitesse angulaire et rapport cyclique
- 5.3. Rendement
- 5.4. Ondulation du courant de sortie
- 5.5. (*Culturel*) Pourquoi rechercher une faible ondulation ?

## **6. (*Facultatif*) Un mot sur les hacheurs à accumulation**

## **7. Redressement double alternance avec un pont de diodes**

## **8. Onduleur**

Intro : Ce chapitre traite de la *conversion électronique de puissance*. Elle est qualifiée de *statique* car contrairement aux machines électriques, il n'y a pas de mouvement mécanique. L'idée est de transformer un signal électrique en un autre signal électrique, en modifiant au passage une des caractéristiques du signal (amplitude, fréquence, valeur moyenne, etc.). Lors de cette transformation, le but est d'obtenir le meilleur rendement possible en puissance. C'est l'avènement des composants à semi-conducteurs qui a permis l'essor de ce domaine de l'électrotechnique depuis quelques décennies.

# 1. Principe de la conversion électronique de puissance

## 1.1. Ordres de grandeurs en électronique de puissance

Jusqu'à présent, on a surtout étudié l'électronique de commande. Le but était de former ou transformer un signal de faible puissance (un AO délivre moins de 1W). Lors d'une amplification, on recherchait généralement un fort gain en tension, sans s'intéresser au rendement en puissance.

L'objectif premier de la conversion de puissance est d'assurer un rendement maximal en puissance, les gains réalisés étant généralement moindres qu'en électronique de signal. Pour alimenter les moteurs électriques des appareils électroménagers, il faut fournir des puissances de l'ordre du kW. Pour l'alimentation des moteurs électriques d'un train, la puissance peut atteindre les 10 MW. La puissance fournie par une centrale nucléaire peut atteindre le GW.

## 1.2. Intérêt des convertisseurs électroniques à interrupteurs

Considérons un cas simple : une alimentation continue délivre 12V, mais on souhaite abaisser cette tension à 3V pour alimenter une ampoule (résistance R) ne pouvant supporter une tension supérieure. L'idée la plus simple consiste à insérer en série une résistance 3R.

❖ Calculer le rendement de ce convertisseur (adaptateur de tension continue). Conclure.

Pour obtenir de bons rendements, la *conversion statique de puissance* (par opposition à électromécanique, où il y a mouvement mécanique) repose sur l'utilisation *d'interrupteurs*, et l'absence d'éléments résistifs. En effet, un interrupteur fermé est presque assimilable à un fil, et consomme alors une puissance nulle. Ouvert, il ne consomme pas de puissance non plus. Il est alors possible d'atteindre des rendements proches de 100%.

**NB** : Associés aux interrupteurs, on peut aussi utiliser des inductances et des condensateurs, dont on a vu qu'ils ne consomment pas de puissance moyenne. Ils ne font que stocker l'énergie pour la restituer ensuite. Ces convertisseurs dits à *accumulation* ne sont pas au programme.

## 1.3. Les quatre classes de convertisseurs électroniques

### *Formes continues et alternatives de la puissance électrique*

*La puissance électrique est sous forme alternative quand  $\langle \mathbf{u} \rangle = \mathbf{0}$  et  $\langle \mathbf{i} \rangle = \mathbf{0}$ . Evidemment  $\langle u_i \rangle \neq 0$ .  
Sinon, la puissance électrique est dite sous forme continue.*

On peut distinguer 4 classes de convertisseurs électroniques statiques de puissance :

- les **redresseurs** : d'alternatif à continu
- les **hacheurs** : de continu à continu
- les **onduleurs** : de continu à alternatif
- les gradateurs : d'alternatif à alternatif

On étudie dans un premier temps un exemple de hacheur. Ensuite, mais de manière moins détaillée, un exemple de redresseur puis d'onduleur.

Les trois premières parties concernant :

- les sources d'entrée et de sortie
- les interrupteurs constitutifs des convertisseurs

sont générales, et concernent toutes les classes de convertisseurs électroniques.

## 2. Les interrupteurs électroniques

On n'utilise pas d'interrupteurs mécaniques à cause de leur trop grande inertie, qui les empêche de commuter à suffisamment haute fréquence (jusqu'à 20 kHz requis). On utilise des interrupteurs électroniques, composants à base de semi-conducteurs.

### 2.1. Interrupteur idéal

Le passage d'un état à l'autre s'appelle *commutation* :

- d'ouvert à fermé : *fermeture* ou *amorçage*
- de fermé à ouvert : *ouverture* ou *blocage*

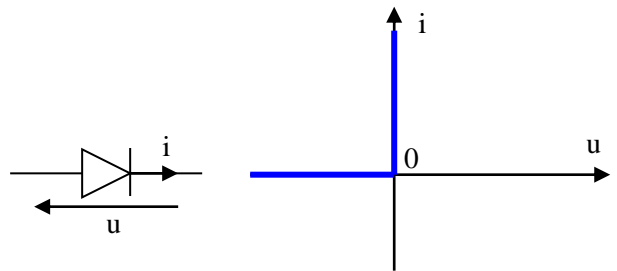
Un interrupteur *idéal* ne consomme pas de puissance :

- quand il est ouvert : aucun courant ne le traverse,  $i = 0$
- quand il est fermé : il est assimilé à un fil sans résistance,  $u = 0$
- lors de la commutation

### 2.2. Interrupteur à commutation spontanée : fonction diode

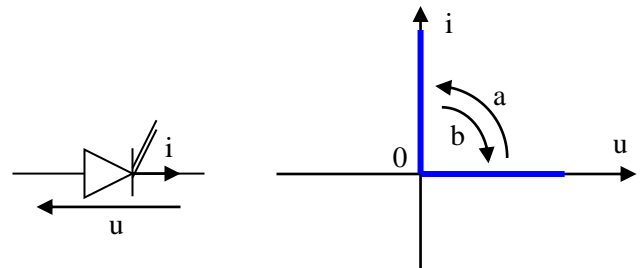
La diode est un interrupteur à commutation spontanée. C'est l'état du reste du circuit qui provoque la commutation :

- passage bloquée à passante :
  - la tension  $u$  imposée à ses bornes tend à devenir positive
  - le courant  $i$  imposé dans sa branche tend à devenir positif
- passage passante à bloquée :
  - le courant  $i$  imposé dans sa branche tend à devenir négatif
  - la tension  $u$  imposée à ses bornes tend à devenir négative



### 2.3. Interrupteur à commutation commandée : fonction transistor

Le transistor est un interrupteur à commutation commandée. C'est un 'circuit de commande' extérieur au circuit étudié qui provoque la commutation. Les deux traits obliques de la sur la représentation du composant symbolisent les connexions avec ce circuit de commande.



On notera le critère qui permet de choisir entre les deux types de commutation.

#### Critère pour distinguer un comportement de diode de celui d'un transistor

Lorsque le transistor est bloqué, la tension à ses bornes est positive ; dans le cas de la diode, elle est négative

### 2.4. Unidirectionnalité des interrupteurs

Les deux types d'interrupteurs sont *unidirectionnels*. Le courant ne peut les traverser que dans un sens.

Il est possible d'associer deux interrupteurs en parallèle pour réaliser un interrupteur bidirectionnel

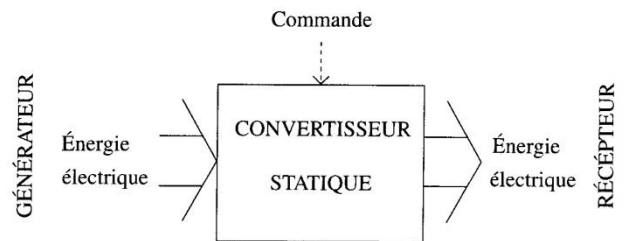
On peut aussi concevoir des hacheurs à 4 interrupteurs (unidirectionnels) pour permettre une conversion de puissance réversible : puissance échangée de l'entrée vers la sortie, puis de la sortie vers l'entrée (cf. TD).

### 3. Sources d'entrée et de sortie impliquées dans la conversion

#### 3.1. Générateur / récepteur

Ci-contre est schématisée la structure générale d'un convertisseur électronique. C'est un quadripôle inséré entre une *source d'entrée* et une *source de sortie*.

En entrée du convertisseur, le **générateur** fournit de la puissance électrique sous une forme donnée. Le *convertisseur* la convertit sous la forme adaptée au **récepteur**, placé en sortie du convertisseur et qui la reçoit.



On note qu'en général le convertisseur **nécessite d'être commandé** par un circuit (faible puissance), que l'on ne cherchera pas à décrire dans ce cours (circuit de commande des transistors).

Lorsque le convertisseur ne permet un transfert de puissance que de l'entrée vers la sortie, on parle de **convertisseur irréversible**. Lorsque les deux sens de transfert sont possibles, on parle de **convertisseur réversible**. Dans ce dernier cas, les rôles du générateur et du récepteur peuvent alors être inversés : l'entrée initialement définie à gauche sera alors réceptrice, et la sortie initialement définie à droite sera génératrice. Les exemples étudiés dans ce chapitre seront des convertisseurs irréversibles. Seul un exemple contraire sera donné à titre culturel.

Par la suite, le générateur et le récepteur seront modélisés par ce que l'on appelle en électronique de puissance des « sources de tension ou de courant ».

#### 3.2. Source de tension – Source de courant – Sources idéales

##### Notion de source de tension en électronique de puissance

*C'est un dipôle ne subissant pas de discontinuité de tension lors d'une discontinuité de courant, la discontinuité de courant étant provoquée par le reste du circuit, branché sur ce dipôle.*

##### Notion de source de courant en électronique de puissance

*C'est un dipôle ne subissant pas de discontinuité de courant lors d'une discontinuité de tension, la discontinuité de tension étant provoquée par le reste du circuit, branché sur ce dipôle.*

Lorsque l'inertie de la source vis-à-vis de la discontinuité associée est suffisamment grande (devant la période de commutation des interrupteurs du convertisseur), on pourra la modéliser par une **source idéale**.

##### (Rappel) Définition d'une source idéale de tension

*Une source idéale de tension impose une tension à ses bornes indépendamment du courant qui la traverse.*

##### (Rappel) Définition d'une source idéale de courant

*Une source idéale de courant impose un courant dans sa branche indépendamment de la tension à ses bornes.*

- ❖ Quel composant faudrait-il ajouter (en série, ou en //) à une résistance pour en faire une source de courant ?
- ❖ Idem pour en faire une source de tension ?
- ❖ Expliquer alors pourquoi l'inductif d'une MCC (ou d'une MSync) peut être modélisé par une source de courant

Ces exemples suggèrent comment faire d'un dipôle quelconque une source de tension ou de courant, au sens de l'électronique de puissance. On notera par ailleurs qu'une source (au sens de l'électronique de puissance) ne fournit pas nécessairement de puissance (cf. cas de RL série).

Dans le paragraphe suivant, en considérant le cas particulier de générateurs réels (au sens usuel), on montre par le calcul que l'ajout d'une inductance  $L$  en série (ou d'une capacité  $C$  en parallèle) permet « d'améliorer » le générateur, i.e. de faire tendre son comportement vers celui d'une source idéale.

### 3.3. Source réelle + (L ou C) = source quasi-idéale

Les alimentations (continues et alternatives) sont généralement modélisables par un générateur de Thévenin. On étudie ci-dessous une source de tension continue. Initialement, la tension délivrée  $u(t)$  est constante et égale à  $U_0$ , le courant délivré  $i(t)$  est constant et égal à  $I_0$ . A un instant pris comme origine des temps  $t = 0$ ,  $i(t)$  subit une discontinuité due au circuit branché sur le générateur.

Cette discontinuité est assimilable à un échelon :  $i(t) = I_0 + \Delta I$  où  $\Delta I$  est constant.

- ❖ Montrer cela provoque une discontinuité de la tension délivrée par le générateur
- ❖ On insère un condensateur en parallèle sur le générateur. Déterminer l'évolution de la tension  $u(t)$  délivrée par l'ensemble {générateur ; condensateur} suite à la discontinuité en courant
- ❖ En supposant que les discontinuités en courant sont périodiques (fréquence  $f$ ), donner le critère qui doit être rempli pour assimiler le générateur à une source idéale de tension

Pour parfaire une source de courant continu (source idéale de courant en parallèle avec une résistance), on montre de même qu'il suffit de placer une inductance en série avec le générateur.

### 3.4. (Facultatif) Réversibilité des sources en tension, en courant, en puissance

Les notions de « source de tension » et de « source de courant » vont être utilisées pour modéliser simplement le générateur et le récepteur. Il est donc évident qu'une source (de tension ou de courant) ne délivre pas nécessairement de la puissance, elle peut éventuellement en recevoir.

Certaines sources ne sont pas réversibles, et ne peuvent que fournir ou recevoir de la puissance. Quelques exemples de sources réversibles :

- un accumulateur est une source de tension, réversible *en courant* donc *en puissance*. Inverser le sens du courant ne le détériore pas, il passe simplement d'une décharge à une charge. Il passe alors de statut de générateur à celui de récepteur de puissance électrique.
- l'induit d'une machine à courant continu est une source de courant (cf. son schéma électrique équivalent). Elle *peut être réversible en courant* donc *en puissance*, le rotor tournant toujours dans le même sens. Pour comprendre cette réversibilité en courant, il suffit de considérer que l'on coupe l'alimentation de l'induit, alors seule subsiste la fcém (le rotor continu à tourner du fait de son inertie) qui provoque un courant de sens contraire à celui de la phase motrice. De récepteur de puissance électrique, l'induit devient générateur de puissance électrique
- l'induit d'une machine à courant continu est une source de courant qui *peut être réversible en tension* donc *en puissance*. Deux possibilités ici :
  - le rotor tourne toujours dans le même sens : la MCC doit alors être à excitation séparée. En inversant le courant statorique, on inverse le sens du champ statorique. Cela revient à changer la constante  $\phi$  en  $-\phi$  dans les formules du cours: la fcém change de signe, d'où la réversibilité en tension. Le couple change de signe et devient résistant : la MCC passe de réceptrice de puissance électrique à génératrice
  - le rotor ne tourne pas dans le même sens : la fcém devient négative, pas le couple. Ce dernier est résistant car la vitesse angulaire a changé de signe, la MCC fournit de la puissance électrique

Sur ces deux exemples de sources réversibles, accumulateur et MCC, on peut donner un exemple concret d'utilisation de la réversibilité : la traction électrique d'un véhicule muni de batteries, et la possibilité de récupérer de l'énergie lors de la phase de freinage et de la stocker dans les batteries :

- lorsque la traction et la récupération se font pour un même sens de rotation du rotor : traction et freinage avant, ou traction et freinage arrière
- lorsque la traction et la récupération se font pour des sens différents de rotation du rotor : traction avant et freinage arrière, ou inversement

### 3.5. Règles d'association des sources idéales

- ❖ Démontrer les assertions suivantes.

#### Règle de connexion entre sources de tension

Deux sources de **tensions** ne doivent pas être branchées en parallèle l'une sur l'autre.  
Corollaire: une source de tension ne doit pas être mise en court-circuit.

#### Règle de connexion entre sources de courant

Deux sources de **courant** ne doivent pas être branchées en série l'une avec l'autre.  
Corollaire: une source de courant ne doit pas être mise en circuit ouvert.

## 4. Hacheur série (convertisseur direct)

### 4.1. Principe des hacheurs – Structures possibles

Un hacheur convertit une puissance de forme continue en une puissance de forme continue... en modifiant au passage la valeur moyenne de la tension ou du courant délivré. Comme son nom l'indique, son principe consiste à **hacher de manière périodique** une tension continue  $E$  (ou un courant continu) pour en faire un signal créneau  $[0, E]$  dissymétrique, dont la valeur moyenne peut être réglée en modifiant **le rapport cyclique**.

Les hacheurs sont par exemple utilisés pour commander les machines à courant continu (« hacheur série »). Il peut paraître surprenant d'alimenter un moteur à courant continu par une tension créneau dissymétrique. En réalité, celui-ci n'est **sensible qu'à la composante continue** (i.e. la valeur moyenne) du signal périodique créneau : du fait de son inertie mécanique, **le moteur agit comme un passe-bas**. Il suffit de régler la fréquence du hachage (donc la fréquence du créneau délivré) pour qu'elle soit supérieure à la fréquence de coupure du moteur.

Un hacheur peut aussi servir à convertir la puissance électrique d'une MCC (fonctionnant en génératrice) en vue de la stocker dans des batteries (exemple : récupération d'énergie lors d'une phase de freinage d'un véhicule électrique : « hacheur parallèle »).

On peut distinguer deux types de hacheurs : les *convertisseurs directs* et les *convertisseurs à accumulation*.

Les premiers ne sont constitués que d'interrupteurs. Lors de la phase de transfert de puissance, la source d'entrée et la source de sortie sont directement reliées en série. Ces hacheurs ne permettent donc de relier que des sources de nature différente :

- source de tension vers source de courant : hacheur série
- source de courant vers source de tension : hacheur parallèle

- ❖ Dans le cas du hacheur série, montrer qu'un montage avec un simple interrupteur en série ne suffit pas
- ❖ Montrer que deux interrupteurs (sans préciser leur nature) suffisent pour ne pas violer les règles de connexion

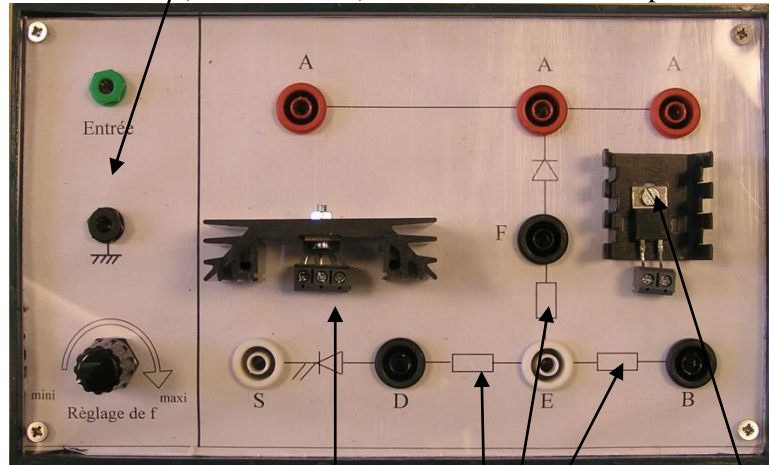
Culturel : Les seconds relient des sources de même nature : tension – tension ; courant – courant. La liaison entre les sources ne pouvant être directe, il faut ajouter aux interrupteurs un dispositif de stockage d'énergie : une inductance  $L$  ou un condensateur  $C$ . Lors de la phase 1,  $L$  ou  $C$  stocke de l'énergie délivrée par l'entrée. Lors de la phase 2,  $L$  ou  $C$  fournit cette énergie à la source de sortie. Ainsi, à aucun moment les deux sources ne sont reliées entre elles.

*Seul le hacheur série est au programme.*

Pour illustration, voici ci-dessous un hacheur utilisé en TP. Il se compose de deux parties.

A gauche, la partie **commande** : une entrée permettant de brancher la tension commandant la valeur du rapport cyclique et un potentiomètre permettant le réglage de la fréquence de hachage.

Ce circuit doit être alimenté en  $\pm 15\text{ V}$  (coté du boîtier), car il contient des composants actifs.



A droite, la partie **puissance**, composée du transistor de puissance et de la diode de puissance. On branche la source d'entrée (une alimentation stabilisée) entre les bornes A (+) et S (-), et on relie la source de sortie (un moteur CC) aux bornes A et B. Trois résistances  $r = 0,1\ \Omega$  permettent l'observation des courants dans certaines parties du circuit. On peut distinguer des ailettes noires de refroidissement fixées aux interrupteurs. Ce sont des **radiateurs** qui évitent aux interrupteurs de surchauffer.

Remarque : On notera que le positionnement des interrupteurs n'est pas le même que celui déterminé précédemment dans le cours (transistor en haut et passant vers la droite + diode passante vers le bas), mais on montre facilement que le montage du TP donne un comportement équivalent à celui étudié dans le cours.

#### 4.2. Phases de fonctionnement – Chronogrammes

Le hacheur série est une structure à deux interrupteurs, reliant une source de tension en entrée à une source de courant en sortie. Ces deux sources idéalisées peuvent modéliser par exemple un générateur de Thévenin en entrée (amélioré par un C en parallèle) et l'induit d'un moteur CC en sortie.

On appelle  $K_1$  l'interrupteur en série avec la source de tension, et  $K_2$  celui en parallèle avec la source de courant. On se place **en régime commuté permanent** : les signaux sont périodiques de période T.

On distingue 2 phases :

- phase 1  $[0, \alpha T]$ ,  $K_1$  fermé et  $K_2$  ouvert : les sources sont connectées en série, il y a transfert de puissance
  - phase 2  $[\alpha T, T]$ ,  $K_1$  ouvert et  $K_2$  fermé : les sources ne sont pas connectées, pas de transfert de puissance
- $\alpha$  s'appelle le **rapport cyclique**.

- ❖ Dessiner le circuit lors de chaque phase et représenter les tensions d'entrée et sortie, ainsi que les courants
- ❖ Dessiner les chronogrammes (ou « formes d'onde ») de la tension et du courant d'entrée
- ❖ Idem pour la sortie

#### 4.3. Identification de la nature des interrupteurs

- ❖ Orienter les interrupteurs en convention récepteur, en choisissant le « bon sens » du courant
- ❖ En repérant leurs points de fonctionnement (un par phase), identifier leur nature

On appelle ce convertisseur un **hacheur série** car le **transistor est en série avec la source d'entrée**.

#### 4.4. Valeurs moyennes de tension, courant et puissance

- ❖ Déterminer les valeurs moyennes des tensions et des courants, en entrée et en sortie.
- ❖ Expliquer pourquoi on qualifie ce hacheur de « dévolteur ».
- ❖ Déterminer la puissance moyenne fournie par l'entrée, et celle absorbée par la sortie
- ❖ Déterminer le rendement de cette conversion de puissance. Conclure.

## Lecture d'une valeur moyenne sur un chronogramme

*A partir des chronogrammes, on trouve la valeur moyenne d'un signal à partir de l'aire située sous la courbe.*

## Valeur moyenne de la dérivée d'un signal périodique

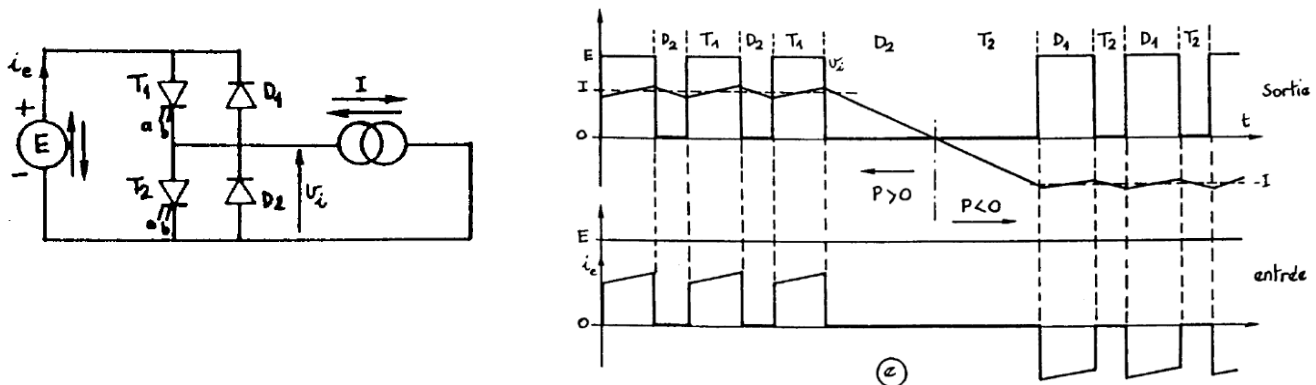
*La valeur moyenne de la dérivée d'un signal périodique est toujours nulle.*

❖ Démontrer cette assertion.

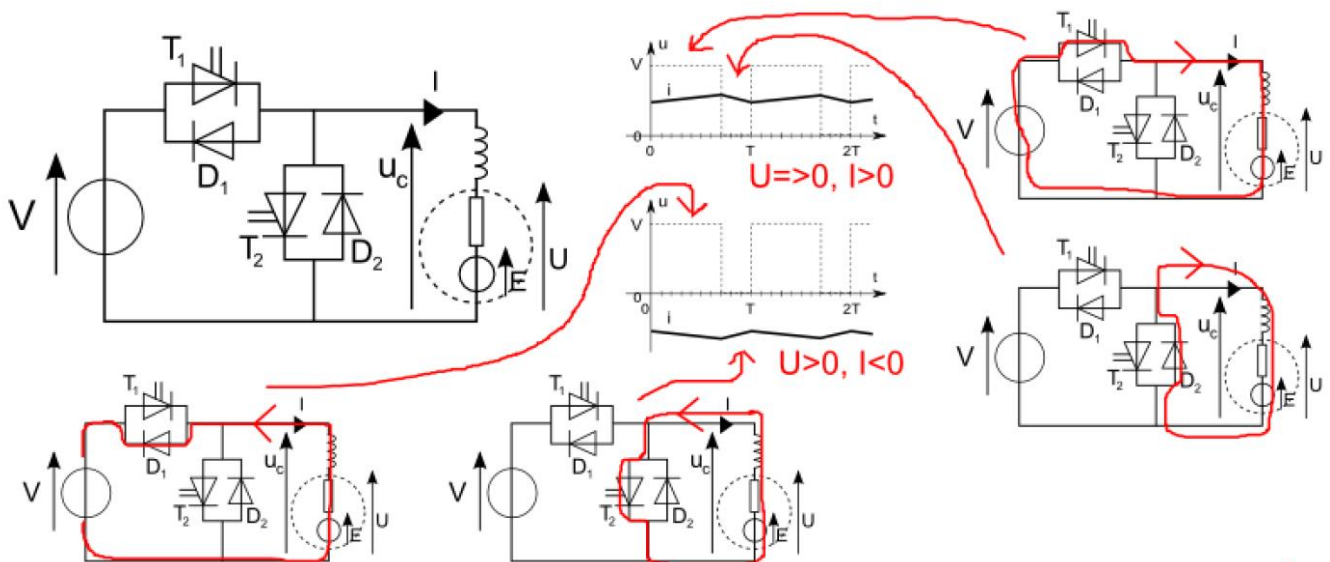
### 4.5. (Culturel) Un mot sur le hacheur parallèle et les hacheurs réversibles

Lorsque l'entrée est une source de courant et la sortie une source de tension, l'interrupteur commandé doit se trouver en parallèle sur l'entrée (et la diode en série avec la sortie). Ce convertisseur direct est un *hacheur parallèle*.

Voici une structure de hacheur réversible en courant (ex : batterie / MCC réversible en courant) :

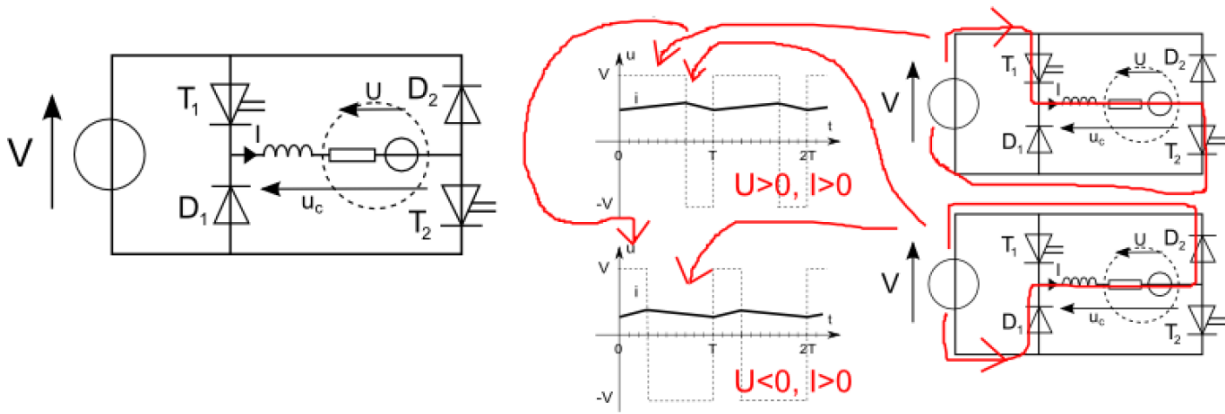


Le couple {transistor T1 ; diode D2} est dédié à la phase motrice de la MCC (structure hacheur série), et l'autre couple {transistor T2 ; diode D1} est dédié à la phase de récupération d'énergie (structure hacheur parallèle). Les chronogrammes de l'entrée et de la sortie sont tracés et précisent la commande des transistors. On voit que la réversibilité se fait simplement en laissant T1 dans l'état bloqué (ce qui revient à « couper l'alim du moteur »). Le courant tend alors spontanément à s'annuler. Lorsqu'il atteint 0, T2 est fermé et la deuxième phase de commande du hacheur débute : c'est la phase de récupération d'énergie. Ci-dessous un autre schéma explicatif du fonctionnement, la source idéale de courant ayant été remplacée par la modélisation usuelle de l'inductif d'une MCC (R, L et  $f_{cém}$ ) :

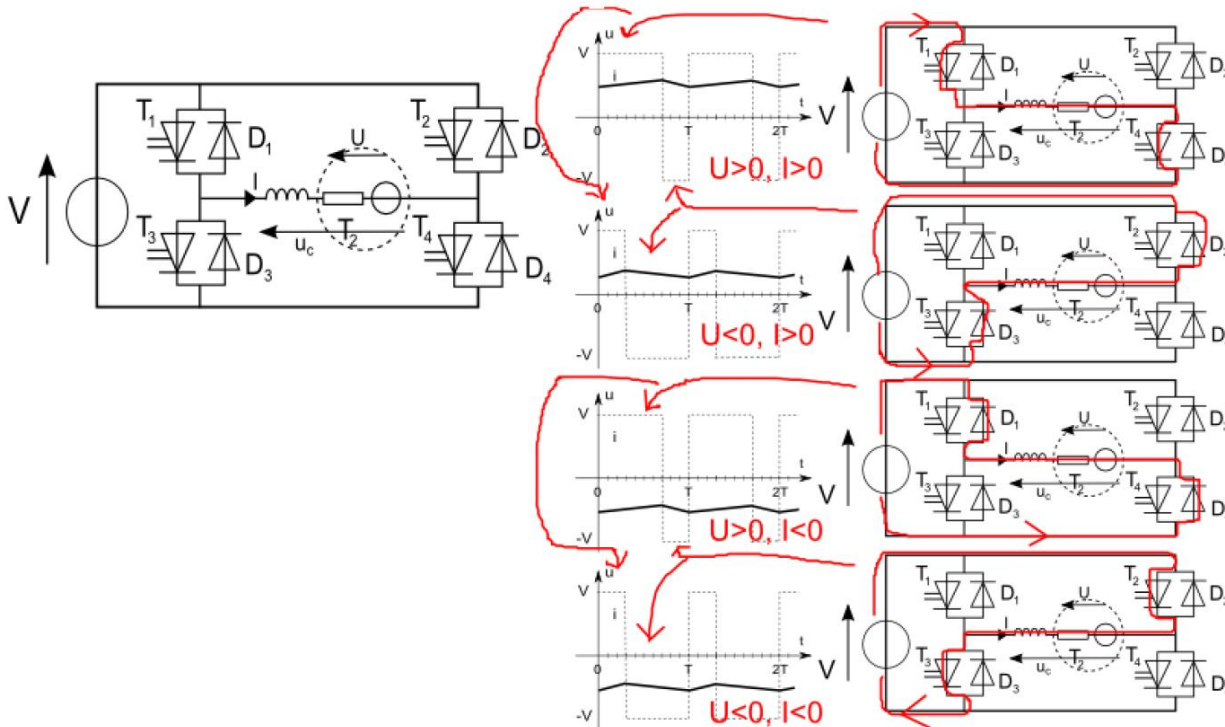


Ci-dessous, une structure de hacheur réversible en tension (batterie / MCC réversible en tension)





Ci-dessous, la totale... un hacheur réversible en tension et en courant :



La MCC peut alors être motrice et réceptrice en marche avant et en marche arrière. Ce hacheur est dit 4 quadrants, car la MCC peut fonctionner dans les quatre quadrants du plan  $(\omega, \Gamma)$ , i.e. pour toutes les paires de signe possible de ces deux grandeurs.

## 5. Application à la commande en vitesse d'un moteur CC

On étudie la phase de traction d'un moteur CC, commandé en vitesse par un hacheur série : on modélise l'entrée par une source idéale de tension, et l'induit par une inductance  $L$  en série avec la fcém du moteur. On néglige donc la résistance  $r$  de l'induit.

NB : le programme stipule de travailler avec des chronogrammes affines par morceaux, ce qui signifie implicitement de supposer  $\frac{L}{r} \gg T_{hach}$ , condition évidemment réalisée quand  $r = 0$ .

### 5.1. Chronogrammes

On se place en régime établi, le moteur tourne avec une vitesse angulaire constante  $\Omega > 0$ .

Le hacheur fonctionne donc en régime commuté établi. On distingue deux phases :

- phase 1 : l'interrupteur commandé est fermé
- phase 2 : l'interrupteur commandé est ouvert

On note  $I_{min}$  et  $I_{max}$  respectivement les valeurs min et max (inconnues) du courant de sortie (traversant l'induit).

- ❖ Durant la phase 1 :
  - montrer que la diode est bloquée
  - Quel est le signe de la fcém de l'induit ? la MCC fonctionnant en moteur, quel est le sens réel du courant traversant l'induit ? En déduire les signes du courant d'entrée et du courant de sortie
- ❖ Montrer que dès le début de la phase 2, la diode devient passante. Le hachage étant de 'haute fréquence', expliquer pourquoi la diode reste passante durant toute la phase 2.
- ❖ Etablir les EDiff vérifiées par le courant de sortie lors de chaque phase. Montrer que ce courant baisse lors de la phase 2 et augmente donc nécessairement lors de la phase 1. En déduire son expression mathématique lors de chaque phase, en fonction notamment de  $I_{min}$  et  $I_{max}$ .
- ❖ Tracer les chronogrammes :
  - des tensions aux bornes des interrupteurs
  - de la tension de sortie
  - des courants d'entrée et de sortie

*La diode est dite « diode de roue libre », car celle-ci intervient durant la phase 2, phase pendant laquelle le moteur n'est pas alimenté (fonctionne en « roue libre »)*

### 5.2. Lien entre vitesse angulaire et rapport cyclique

- ❖ Appliquer la loi des mailles à l'induit en se basant sur le 'circuit valable à tout instant' (i.e. inclure la diode D dans la maille). En prenant la valeur moyenne de l'expression, exprimer la fcém de l'induit en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique
- ❖ Interpréter en terme de commande du moteur CC

### 5.3. Rendement

On peut penser à deux méthodes pour calculer la valeur moyenne des courants d'entrée et de sortie (nécessaires pour le calcul des puissances). La première est de déterminer les intégrales graphiquement à partir de l'aire sous la courbe. C'est encouragé par le programme. La seconde est de calculer mathématiquement.

- ❖ Calculer la puissance moyenne fournie par l'entrée, puis la puissance moyenne reçue par la fcém de l'induit (la puissance électromotrice).
- ❖ En déduire le rendement. Conclure.

Remarque : Le programme stipule de pouvoir établir des relations entre tensions et intensités à partir d'un bilan de puissance moyenne.

- ❖ Quelle relation peut-on établir entre les courants moyens d'entrée et de sortie, en supposant que le convertisseur est parfait et que le rendement vaut 1 ?

### 5.4. Ondulation du courant de sortie

**Définition de l'ondulation et du taux d'ondulation**

*L'ondulation du courant de sortie est définie par  $\Delta i_s \stackrel{\text{def}}{=} I_{max} - I_{min}$ .*

*En la rapportant au courant moyen, on obtient le taux d'ondulation  $\tau_{ond} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Delta i_s}{\langle i_s \rangle}$*

*Plus l'ondulation est faible, plus la sortie se comporte comme une source idéale de courant.*

- ❖ Déterminer l'expression de l'ondulation du courant de sortie, alimentant l'induit.
- ❖ Comment rendre l'ondulation minimale ?

### 5.5. (Culturel) Pourquoi rechercher une faible ondulation ?

L'intérêt de rendre l'ondulation minimale est de réduire les pertes par effets Joule dans l'induit (lorsque la résistance n'est pas négligée bien-sûr). En effet, on peut montrer que ces pertes sont minimales à ondulation nulle du courant :

Décomposons le courant de sortie en série de Fourier  $i_s(t) = \langle i_s \rangle + \sum_n A_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$

Les pertes Joule dans la résistance interne de l'induit s'écrivent  $\langle P_J \rangle = r I_{eff}^2$  avec  $I_{eff}^2 = \langle i_s \rangle^2 + \sum_n \frac{A_n^2}{2}$  (formule de Parseval)

On démontre bien alors que les pertes Joules sont minimales quand  $i_s$  est continu (ondulation nulle, pas d'harmoniques  $A_n = 0$ )

On pourrait penser qu'il faut aussi minimiser  $\langle i_s \rangle$ , mais cette valeur est fixée par la charge du moteur et les frottements. En effet, en régime permanent, la puissance moyenne délivrée par le moteur (celle du couple magnétique donc) est égale à celle fournie à la charge et dissipée par les frottements. Or  $\langle P_{mag} \rangle = \langle \Gamma_{mag} \rangle \Omega$  et  $\langle \Gamma_{mag} \rangle = \phi \langle i_s \rangle \dots$  Ainsi  $\langle i_s \rangle$  ne peut être choisi au niveau de la commande du hacheur, car fixée par le fonctionnement du moteur.

## 6. (Facultatif) Un mot sur les hacheurs à accumulation

*La conversion de puissance entre sources de même nature utilise L ou C pour stocker temporairement de l'énergie.*

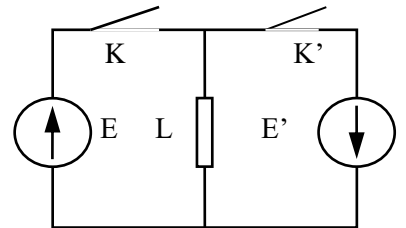
Exemple d'un hacheur à accumulation inductive :

On considère le hacheur ci-contre dans lequel tous les éléments sont idéaux.

$E = 50 \text{ V}$  ;  $T = 50 \mu\text{s}$  ;  $\alpha = 0,7$  ;  $L = 10 \text{ mH}$ .

La commande des interrupteurs est périodique et s'effectue comme suit :

- \* de  $t = 0$  à  $t = \alpha.T$  K est fermé et K' ouvert ;
- \* de  $t = \alpha.T$  à  $t = T$  K' est fermé et K ouvert.



On suppose le régime permanent établi et on note  $I_m$  la valeur de l'intensité dans la bobine au début d'une période.

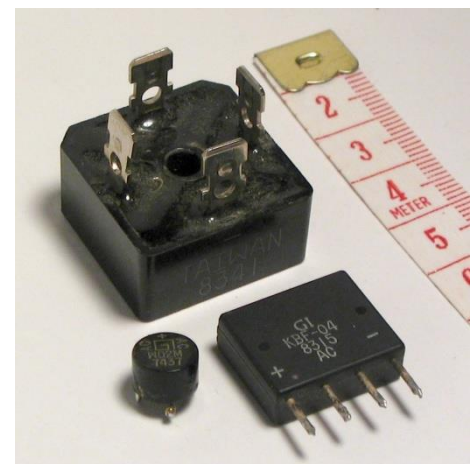
- ★ Expliquer qualitativement le rôle de l'inductance dans le fonctionnement du hacheur.
- ★ Exprimer, par deux relations indépendantes faisant intervenir d'une part E et d'autre part E', l'intensité  $I_m$  (intensité au blocage de K).
- ★ En déduire une relation entre E,  $\alpha$  et E'. Calculer E'.
- ★ La puissance moyenne échangée entre les deux sources est  $P = 70 \text{ W}$ . Déterminer  $I_m$  et  $I_M$ .
- ★ On désire définir quelles fonctions de commutation peuvent être utilisées.
- ★ Tracer l'évolution de l'intensité dans la bobine et dans chaque interrupteur avec les valeurs numériques. Représenter dans le plan tension-courant les zones de fonctionnement de chaque interrupteur K et K'.
- ★ En déduire les fonctions de commutation à utiliser.

Réponses : b)  $E' = \alpha E / (1 - \alpha)$  ; c)  $I_m = 1,9 \text{ A}$  ;  $I_M = 2,1 \text{ A}$  ; d) K = Tr, K' = D.

## 7. Redressement double alternance avec un pont de diodes

L'objectif d'un redresseur est de transformer une puissance électrique de forme alternative en puissance de forme continue. Il s'agit de *redresser les alternances négatives* de la tension d'entrée pour que la valeur moyenne de la tension en sortie soit non-nulle.

Le redressement simple alternance ne fait que couper l'alternance négative. Le redressement double-alternance inverse le signe de l'alternance négative pour en faire une alternance positive (opération mathématique « valeur absolue »).



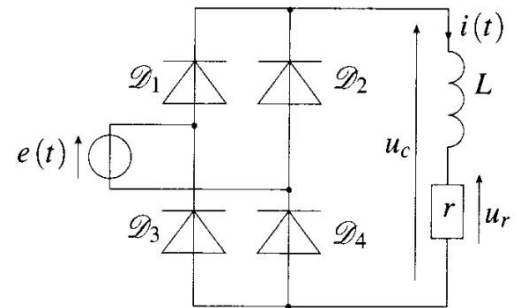
Tous les appareils quotidiens fonctionnant sur batterie fonctionnent à courant continu. Lorsqu'ils sont branchés sur le secteur EDF (pour chargement ou pour utilisation directe sur secteur), il faut interposer un redresseur entre le secteur et l'appareil :

- ordinateurs
- téléphones portables

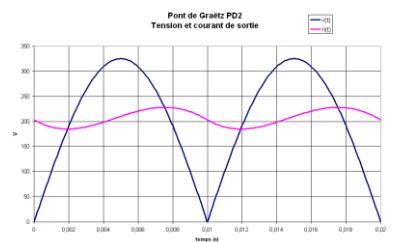
On utilise des redresseurs de plus haute puissance pour d'autres applications (cf. page wikipédia). Ci-dessous, le redresseur peut être associé à accumulateur et un onduleur pour réaliser une « alimentation sans interruption ».

On étudie le circuit représenté ci-contre (pont de Graetz) :

- ❖ En assimilant le récepteur  $rL$  à une source idéale de courant, décrire les différentes séquences de commutation des diodes
- ❖ Tracer le chronogramme de la tension de sortie  $u_c$
- ❖ En notant  $E$  la valeur moyenne de  $u_c$  (ne pas la calculer), déterminer la valeur moyenne de  $i(t)$



Ci-contre, la tension  $ri(t)$  superposée à  $u_c(t)$ . On constate bien que la charge  $rL$  agit comme un filtre passe-bas aux bornes de  $r$  : la charge  $rL$  est bien assimilable à une source quasi-idéale de courant. On dit que la bobine « lisse » le courant.



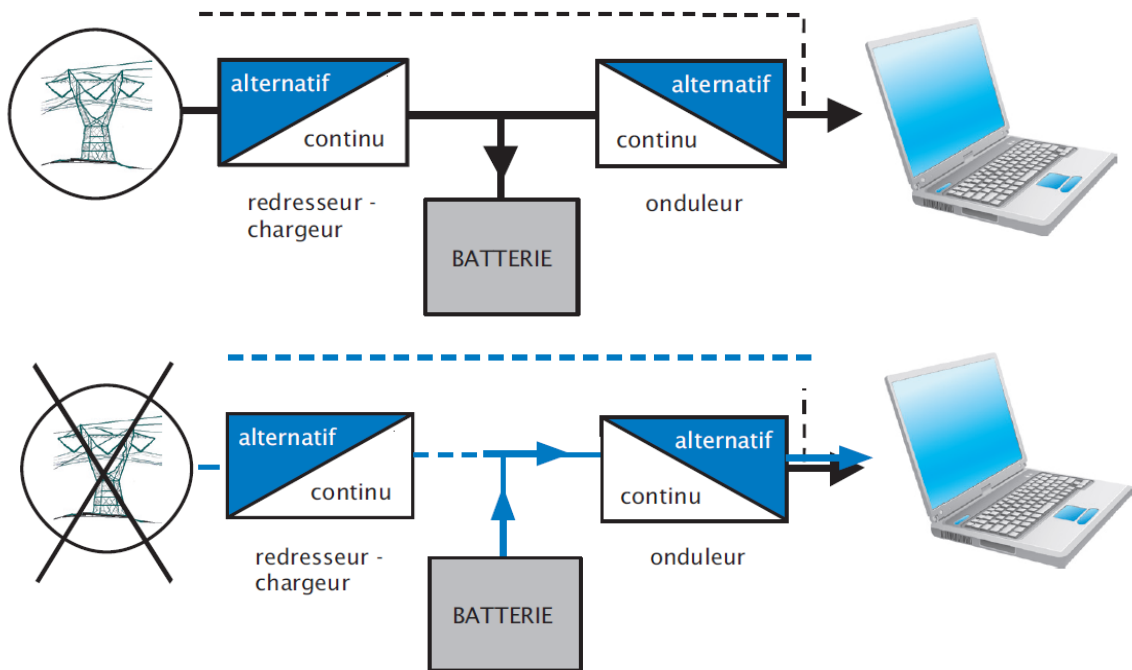
## 8. Onduleur

L'onduleur convertit une puissance électrique sous forme continue en puissance électrique sous forme alternative. Grosso modo, l'idée est de « faire onduler » la tension d'entrée constante pour donner une sortie alternative.

Exemples d'utilisation :

- onduleur pour commander en vitesse une machine synchrone : TGV Thalys par exemple, la caténaire délivre une tension constante et doit alimenter un moteur synchrone. Toyota Prius : batterie délivrant une tension continue doit alimenter un moteur synchrone
- onduleur pour réaliser une « alimentation sans interruption » : existe dans de nombreuses entreprises, industries et bâtiments hospitalier. Lors d'une coupure de courant, même très brève, l'onduleur prend le relais et alimente les installations électriques. Indispensable à chaque fois qu'un bâtiment héberge des serveurs informatiques par exemple. L'onduleur peut alors aussi filtrer les parasites du réseau. On voit sur les schémas ci-dessous qu'il est alors couplé à un redresseur, qui alimente la batterie

<http://fr.academic.ru/dic.nsf/frwiki/1262130>



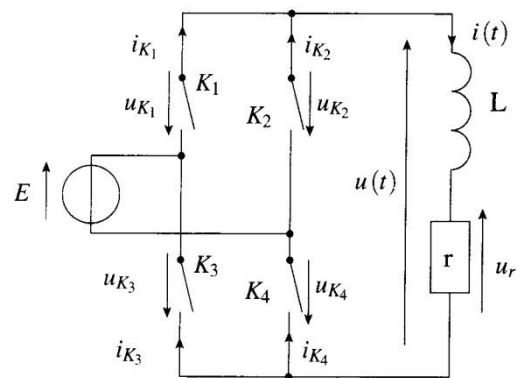
[http://sti.tice.ac-orleans-tours.fr/spip2/IMG/swf/Alimentation\\_sans\\_interruption.swf](http://sti.tice.ac-orleans-tours.fr/spip2/IMG/swf/Alimentation_sans_interruption.swf)

Ci-contre est représentée la structure d'un onduleur. L'entrée est une source de tension, modélisée ici par une source idéale. Elle alimente une source de courant, modélisée ici par une charge  $rL$ . On note que la structure est similaire à celle du redresseur double alternance, mais la nature des interrupteurs n'est pas la même.

Les séquences de commutation sont les suivantes :

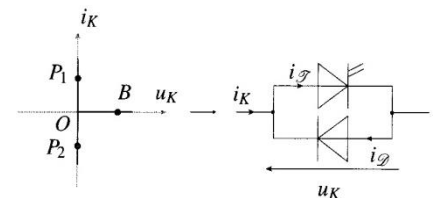
- phase 1 :  $K_1$  et  $K_4$  sont fermés, les autres ouverts
- phase 2 : c'est l'inverse

❖ Représenter le chronogramme de la tension de sortie  $u(t)$



L'idéal en général est de récupérer un courant sinusoïdal en sortie (ou une tension sinusoïdale aux bornes de  $r$ ). Le rôle de la bobine est de filtrer les harmoniques de rang supérieures à 1, en réalisant un filtre  $rL$  passe-bas. Il faut trouver un compromis entre : laisser passer le fondamental et supprimer les harmoniques supérieures. Dans les montages réels, d'autres types de filtres sont vraisemblablement utilisés.

La nature des interrupteurs n'est pas à connaître, elle est donnée pour indication ci-contre.



Le bloc 4 aborde la conversion électronique statique de puissance principalement sur l'exemple du hacheur série. Il ne s'agit pas de traiter un cours exhaustif sur les convertisseurs en multipliant les exemples de circuits, l'état d'esprit de cet enseignement doit permettre de réinvestir les capacités pour étudier modestement d'autres montages (redresseur, onduleur). On ne décrira pas le circuit de commande d'un transistor.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4. Conversion électronique statique</b>	
Formes continue et alternative de la puissance électrique.	Citer des exemples illustrant la nécessité d'une conversion de puissance électrique.

Structure d'un convertisseur.	Décrire l'architecture générale d'un convertisseur électronique de puissance : générateur, récepteur, processeur de puissance utilisant des interrupteurs électroniques, commande des fonctions de commutation.
Fonction de commutation spontanée.	Décrire la caractéristique idéale courant-tension de la diode.
Fonction de commutation commandée.	Décrire la caractéristique idéale courant-tension du transistor.
Sources.	Définir les notions de sources de courant et de tension. Expliquer le rôle des condensateurs et des bobines comme éléments de stockage d'énergie assurant le lissage de la tension ou de l'intensité à haute fréquence.
Réversibilité.	Caractériser les sources par leur réversibilité en tension, en intensité, en puissance. Citer des exemples.
Interconnexion.	Citer les règles d'interconnexions entre les sources.
Cellule de commutation élémentaire.	Expliquer le fonctionnement d'une cellule élémentaire à deux interrupteurs assurant le transfert d'énergie entre une source de courant et une source de tension.
Hacheur.	<p>Tracer des chronogrammes, exploiter le fait que la moyenne d'une dérivée est nulle en régime périodique établi, calculer des moyennes de fonctions affines par morceaux, utiliser un bilan de puissance moyenne pour établir des relations entre les tensions et les intensités.</p> <p>Justifier le choix des fonctions de commutation pour un hacheur série assurant l'alimentation d'un moteur à courant continu à partir d'un générateur idéal de tension continue. Exprimer les valeurs moyennes des signaux. Calculer l'ondulation en intensité dans l'approximation d'un hachage haute fréquence réalisant une intensité affine par morceaux.</p>
Redressement double alternance réalisé avec un pont de diodes.	<p>Pour un générateur de tension sinusoïdal et une charge assimilable à une source continue de courant, décrire les différentes séquences de commutation des diodes.</p> <p><b>Mettre en œuvre un redressement double alternance.</b></p>
Onduleur.	Décrire la structure en pont à quatre interrupteurs et les séquences de commutation pour une fréquence de commutation fixe.