

Électronique de puissance (interrupteurs et convertisseurs statiques)

COURS

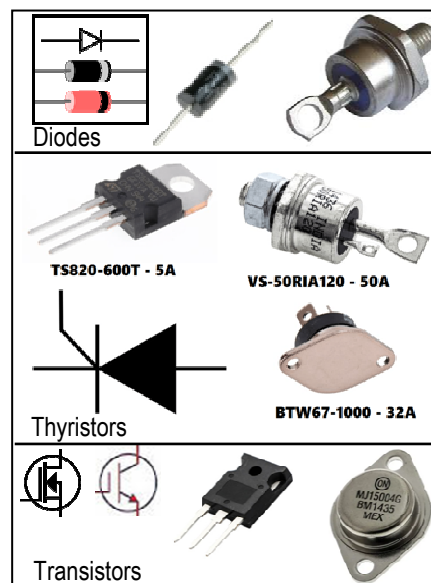
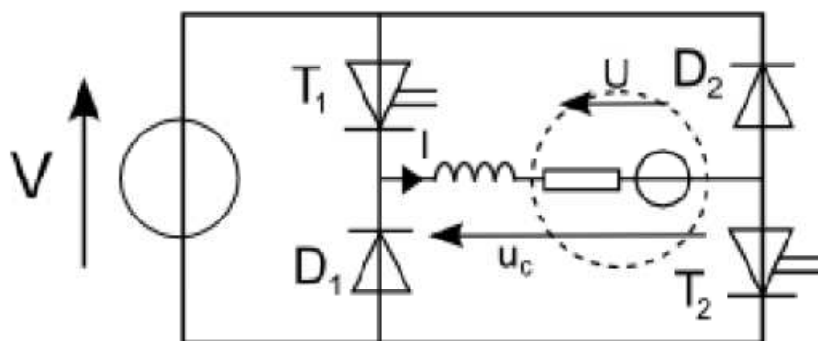


Table des matières

| | |
|--|----|
| 1) Introduction : l'électronique de puissance | 2 |
| 1.1) Rappels d'électricité..... | 2 |
| 1.2) Généralités..... | 2 |
| 2) Notions de dipôle, de source et de conventions | 3 |
| 2.1) Dipôle..... | 3 |
| 2.2) Convention générateur ou récepteur..... | 3 |
| 2.3) Sources de tension ou de courant..... | 3 |
| 2.4) Caractéristiques statiques et réversibilité : les quadrants | 4 |
| 3) Structures générales des convertisseurs statiques..... | 5 |
| 3.1) Règles d'associations des sources | 5 |
| 3.2) Cellule de commutation : Structure à deux interrupteurs | 6 |
| 4) Interrupteurs | 7 |
| 4.1) Régime statique et nombre de segments..... | 7 |
| 4.2) Semi-conducteurs utilisés..... | 7 |
| 5) Convertisseurs statiques | 9 |
| 5.1) Hacheur | 9 |
| 5.2) Onduleur | 13 |
| 5.3) Redresseur | 14 |
| 5.4) Exemples d'application des redresseurs et onduleurs | 16 |

Compétences de PTSI/PT (en gras celles traitées dans ce cours) :

Proposer une démarche permettant de déterminer des grandeurs électriques (déjà vus en physique) :

Lois de Kirchhoff. Théorème de superposition.

Modéliser les convertisseurs statiques d'énergie (S2) :

Modèles des interrupteurs parfaits (2 ou 3 segments) ;

Synthèse des convertisseurs ;

Association des interrupteurs (cellule élémentaire de commutation) ;

Caractéristiques des convertisseurs (hacheur, onduleur, redresseur, à 2 ou 3 cellules de commutation) :

- nature des grandeurs d'entrée-sortie,
- réversibilité.

Déterminer les signaux électriques dans les circuits (S3) :

Circuits en régime alternatif sinusoïdal ; Diagramme de Fresnel ;

Puissance active (continu, monophasé et triphasé en régime alternatif sinusoïdal) ;

Puissances apparente et réactive, en monophasé et triphasé en régime alternatif sinusoïdal ;

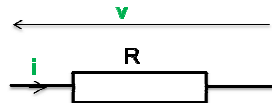
Ondulation des grandeurs électriques en régime permanent dans les convertisseurs ;

Composants de filtrage.

1) Introduction : l'électronique de puissance

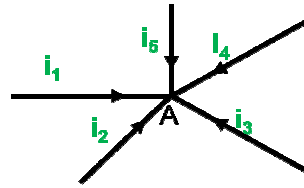
1.1) Rappels d'électricité

Loi d'Ohm :

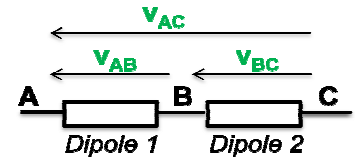


Lois de Kirchhoff :

Loi des nœuds :



Loi des mailles :



En France (norme AFNOR, celle du concours) la flèche de la tension va du plus bas potentiel vers le plus haut. Pour information, la norme ISO est l'opposée.

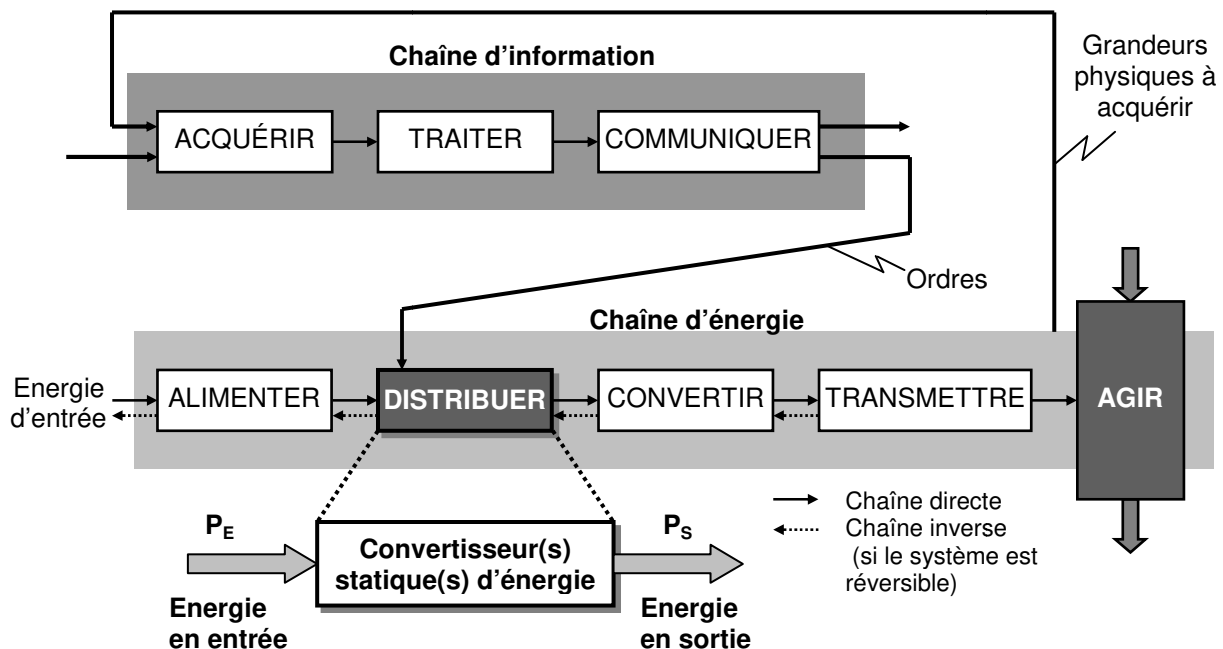
Notation parfois utilisée : $\langle i \rangle$: valeur moyenne de « i ».

1.2) Généralités

L'électronique de puissance a pour objet l'échange d'énergie entre au moins deux systèmes électriques. Pour cela, elle assure d'une part une **fonction de conversion** de l'énergie électrique en rendant compatibles les caractéristiques (fonction de la tension, du courant et de la fréquence) de ces deux systèmes et d'autre part (en général) une **fonction de contrôle** de cet échange d'énergie. C'est, par conséquent, une discipline qui correspond au traitement de l'énergie électrique (en combinant les aspects « conversion » et « contrôle »). Les dispositifs électriques permettant d'assurer ces fonctions portent le nom générique de **Convertisseurs Statiques**.

Les fonctions de base de l'électronique de puissance trouvent leurs applications dans tous les domaines d'utilisation de l'électricité, c'est à dire dans toutes les industries.

Toutefois, il est un type particulier d'emplois, qui de par son importance et sa spécificité, nécessite un développement particulier, il s'agit des **variateurs de vitesse**. Dans l'architecture fonctionnelle générique d'un système pluritechnologique, les convertisseurs statiques assurent la fonction technique « **DISTRIBUER** » de la chaîne d'énergie.



Certains convertisseurs sont **réversibles**, c'est-à-dire qu'ils permettent de renvoyer l'énergie électrique de la charge vers la source en permutant les rôles de l'entrée et de la sortie. Si la charge est réversible (elle peut, par exemple, restituer de l'énergie : un train en descente) et qu'on souhaite récupérer cette énergie, la source d'entrée et le convertisseur devront aussi être réversibles.

2) Notions de dipôle, de source et de conventions

2.1) Dipôle

Un dipôle désigne un composant électrique, et plus généralement une portion de circuit électrique, faisant apparaître deux bornes, caractérisé par la relation existant entre la tension à ses bornes et le courant circulant entre ses bornes.

2.2) Convention générateur ou récepteur

Un dipôle est **générateur** lorsqu'il fournit de l'énergie (même de manière très temporaire).

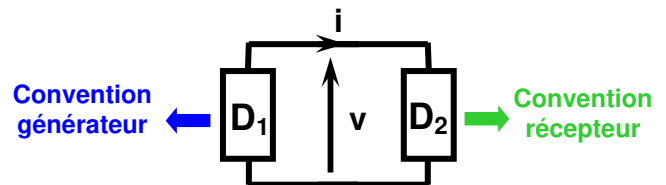
Il est un **récepteur** lorsqu'il consomme (reçoit) de l'énergie (même de manière temporaire).

Dans un schéma électrique, on adopte des conventions de signe telles que la valeur moyenne du produit $v.i$ soit positive pour un **générateur** débitant de la puissance ou pour un **récepteur** la recevant.

Ainsi, un dipôle représenté en **convention générateur** aura ses flèches de tension et de courant dans le même sens.

Alors qu'un dipôle représenté en **convention récepteur** verra les flèches de tension et de courant opposées.

L'interconnexion de deux dipôles les conduit à partager la même tension et le même courant. Quelles que soient les conventions de signe choisies, il apparaît de façon évidente que le sens conventionnel du courant est sortant pour l'un des dipôles (D1) et rentrant pour l'autre (D2). Le fait de les représenter avec la même tension et le même courant implique donc nécessairement que l'un soit en **convention générateur** (D1) et l'autre en convention récepteur (D2).



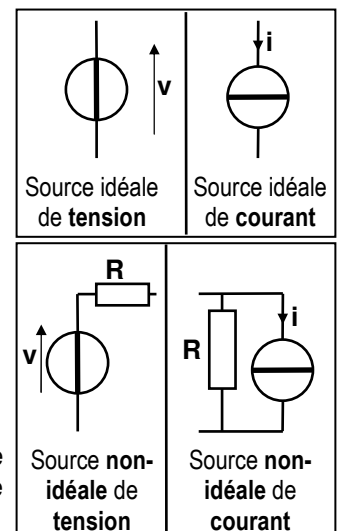
Au-delà des aspects purement conventionnels, le fait que le produit $v.i$, qui correspond à la puissance échangée, soit le même pour les deux dipôles signifie que l'un des dipôles fonctionne obligatoirement en générateur et l'autre en récepteur. Si le produit $v.i$ est positif, les dipôles fonctionnent conformément à la convention choisie. Si le produit $v.i$ est négatif (même temporairement), le dipôle qui est en convention générateur fonctionne en réalité comme un récepteur et inversement.

2.3) Sources de tension ou de courant

Les sources électriques existantes sont des générateurs de tension ou de courant, continus ou alternatifs.

Par définition, en **régime statique** :

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



Les modèles précédents sont des modèles théoriques (idéaux), en **réalité** :

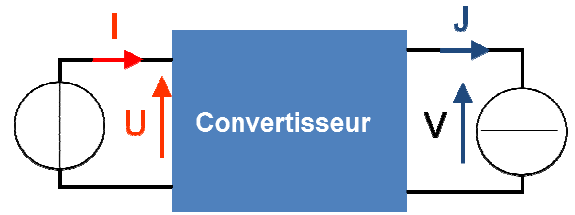
une source de tension aura une impédance série non nulle (Modèle de Thévenin),
une source de courant aura une impédance parallèle non nulle (Modèle de Norton).

Définition :

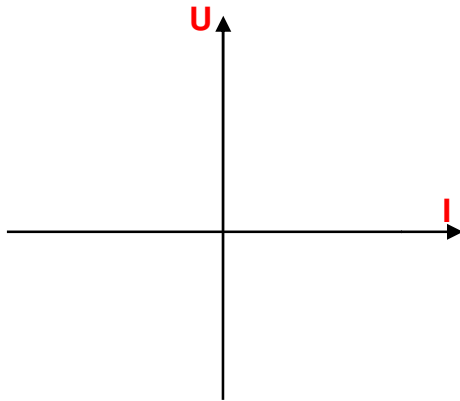
L'**impédance** électrique mesure l'opposition d'un circuit électrique au passage d'un courant alternatif sinusoïdal. La définition d'impédance est une généralisation de la loi d'Ohm dans l'étude des circuits en courant alternatif.

2.4) Caractéristiques statiques et réversibilité : les quadrants

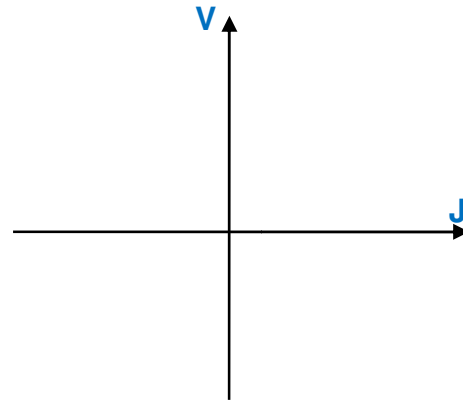
Les grandeurs électriques des dipôles peuvent s'exprimer par une relation tension-courant, que l'on peut représenter graphiquement par ce que l'on appelle la caractéristique statique dans le plan (V , I). A la suite des remarques du paragraphe 2.2, il est essentiel de préciser quelle est la convention choisie (générateur ou récepteur) pour les dipôles dont on trace la caractéristique statique.



Source de tension, en convention générateur :



Source de courant, en convention récepteur :



La **réversibilité** en puissance d'un système est une caractéristique très importante à connaître car elle conditionne directement la structure de conversion, son mode de contrôle et les interrupteurs qui la constituent. On pourra en outre indiquer ses réversibilités en précisant si elle est **réversible en tension** ($v > 0$ ou $v < 0$), **en courant** ($i > 0$ ou $i < 0$) ou les deux (à la fois ou indépendamment).

□ Exemples :

- Un accumulateur (batterie) est une source de tension réversible en courant mais pas en tension.
- Toutes les machines tournantes (machine à courant continu, machines synchrone et asynchrone) possèdent au moins une réversibilité ; la machine à courant continu est réversible en tension (par la vitesse) et en courant (par le couple).

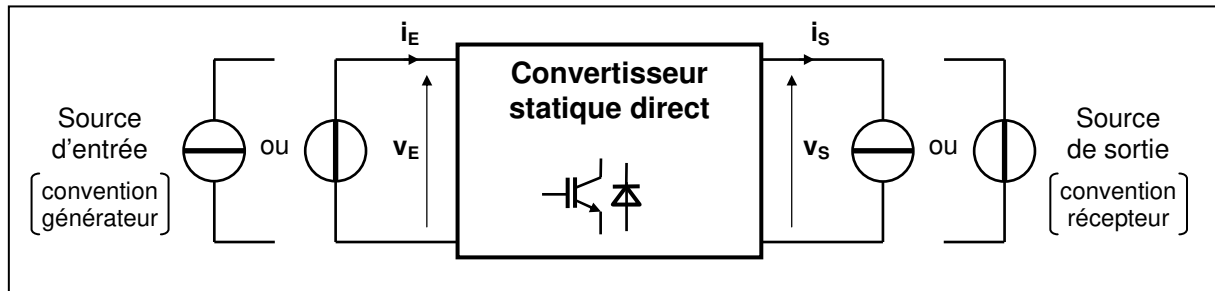
☞ **Tracer les caractéristiques statiques dans le plan (v, i) des dipôles suivants. Préciser le type de fonctionnement du dipôle dans les différents quadrants. Préciser le schéma électrique équivalent.**

| Convention générateur | Convention récepteur |
|--|---|
| <p>Batterie (à connaître)</p> <p>Schéma électrique :</p> <p>Réversible en ...</p> | <p>Résistance (à connaître)</p> <p>Source tension convention récepteur</p> <p>Schéma électrique :</p> <p>Réversible en ... (v et i de même signe)</p> |
| <p>Panneau photovoltaïque (juste pour l'exemple)</p> <p>Seul le quadrant 1 est utilisé</p> | <p>Machine à courant continu (à connaître)</p> <p>Source tension convention récepteur</p> <p>Schéma électrique :</p> <p>Réversible en ...</p> |

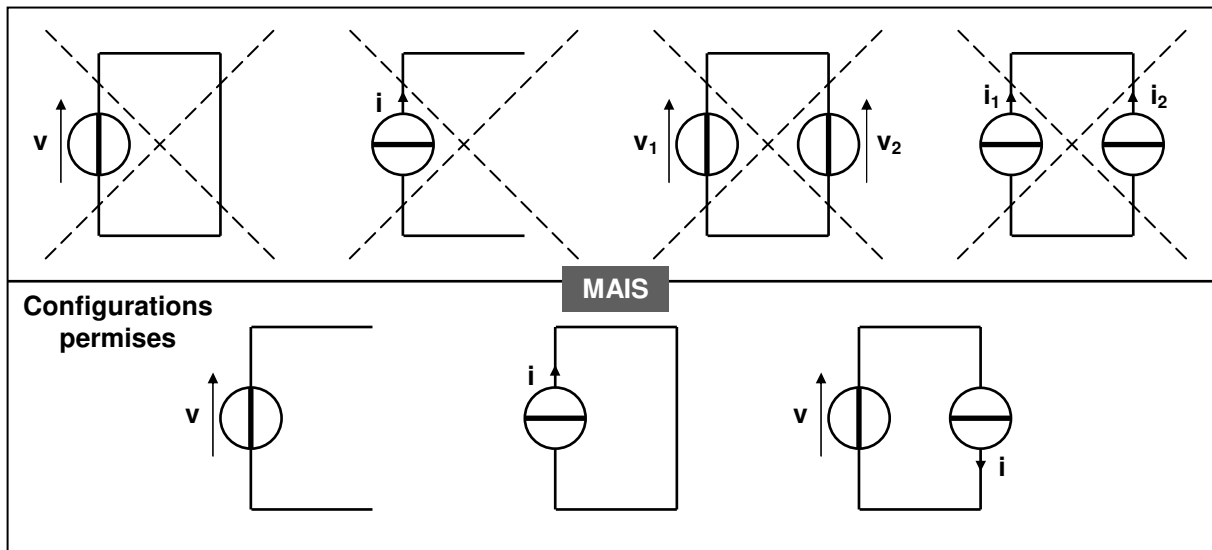
3) Structures générales des convertisseurs statiques

3.1) Règles d'associations des sources

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



On comprend aisément, en s'appuyant sur les principes de base de la théorie des circuits électriques, que **toutes les associations de sources ne sont pas permises**, en particulier :



Règles à respecter impérativement :

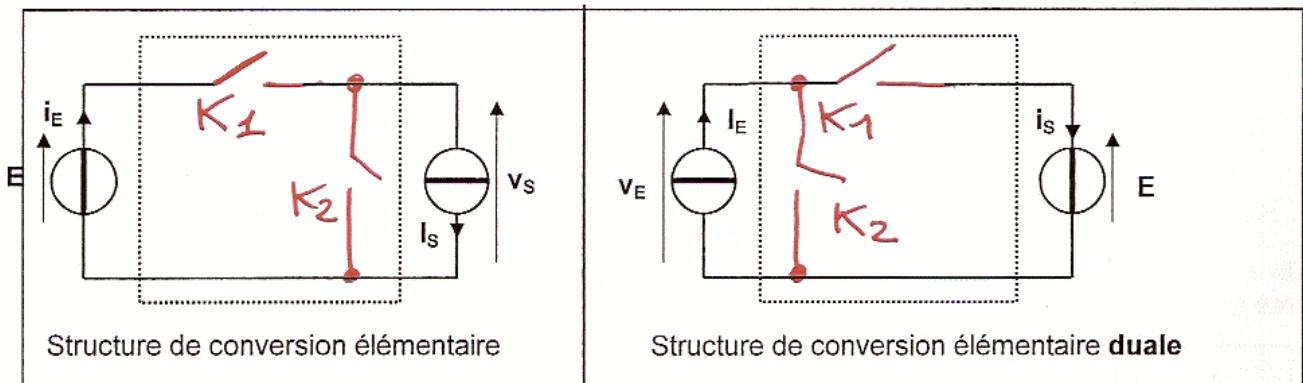
- Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée mais elle peut être ouverte ;
- Le circuit d'une source de courant ne doit jamais être ouvert mais il peut être court-circuité ;
- Il ne faut jamais connecter entre elles deux sources de même nature. Cela revient à dire qu'on ne peut connecter entre elles qu'une source de courant et une source de tension.

3.2) Cellule de commutation : Structure à deux interrupteurs

Lorsque les sources d'entrée et de sortie du convertisseur sont de nature différente, on peut envisager une structure ne comportant que des interrupteurs électroniques : **convertisseur direct**. Le respect des règles énoncées précédemment conduit à l'utilisation de **deux interrupteurs** :

- Le premier K_1 connecte les sources entre elles ;
- Le second K_2 assure le respect de la règle concernant le circuit d'une source de courant.

La structure de base qui en découle met donc en œuvre obligatoirement **deux interrupteurs dont les fonctionnements sont liés** : leurs états sont nécessairement **complémentaires**. Elle est nommée « **cellule de commutation** » et constitue la brique élémentaire de tout convertisseur statique :



La structure de la figure 1 constitue le principe du **hacheur série** et du **hacheur réversible en courant**. Celle de la figure 2 correspond au **hacheur parallèle**.

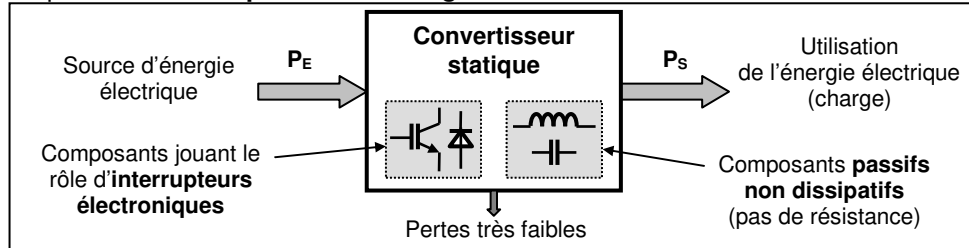
Pour traduire l'état complémentaire de ces deux interrupteurs, on utilisera dorénavant la notation empruntée à la logique : $K_2 = \overline{K_1}$.

4) Interrupteurs

L'électronique de puissance est une électronique de commutation, qui utilise des interrupteurs électroniques.

Puisqu'ils sont destinés à traiter de l'énergie, les interrupteurs doivent être le **siège de pertes aussi faibles que possible**, pour des raisons évidentes de rendement, mais aussi afin de minimiser le poids et le coût des dispositifs d'évacuation de ces pertes (échangeurs thermiques, ventilateurs...).

Pour ce faire, les convertisseurs statiques utilisent des composants jouant le rôle d'**interrupteurs électroniques** (ouverts ou fermés) selon un **principe de découpage** (par opposition au principe d'amplification linéaire) complété par des **circuits passifs de filtrage**.



4.1) Régime statique et nombre de segments

Un interrupteur idéal **K** est considéré comme un dipôle orienté en convention récepteur (cf. symbole). Il possède deux états :

- **Etat ouvert (bloquant)** caractérisé par ...
- **Etat fermé (passant)** caractérisé par ...

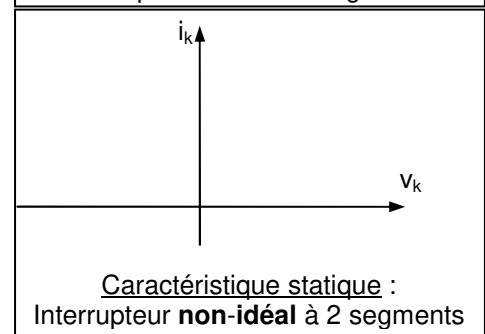
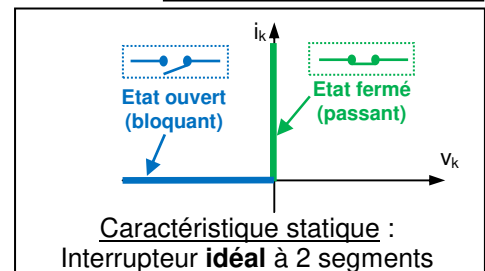
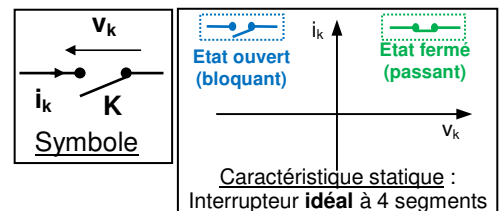
La **caractéristique statique** d'un interrupteur est composée des **segments** sur lesquels son point de fonctionnement (v_K , i_K) peut se déplacer.

Ces segments de droite sont confondus avec les axes pour un interrupteur idéal.

Les interrupteurs « classiques » (mécaniques) sont à 4 segments (réversibles en tension et intensité), mais les interrupteurs statiques commandés (comme les transistors) sont généralement à 2 ou 3 segments (cf. page suivante).

Les interrupteurs réels (non-idéaux), possèdent entre autres :

- une **tension seuil** en-dessous de laquelle le courant ne passe pas ;
- une **résistance interne** non-nulle ;
- une **tension de saturation** au-delà de laquelle le **courant de fuite** arrivant à passer devient non négligeable ;
- une **intensité maximale** détériorant le composant ;
- un **retard pur** (pour ceux qui sont commandés), etc.



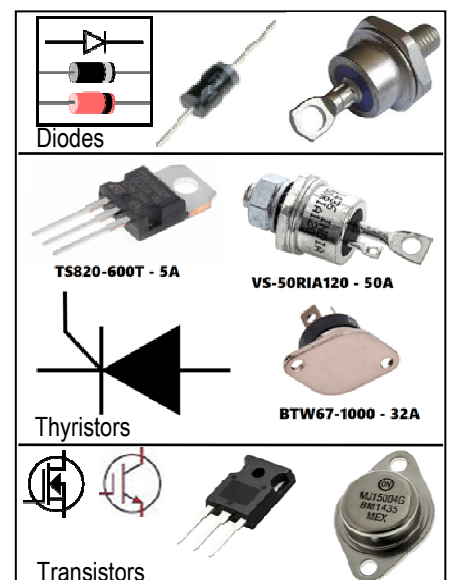
4.2) Semi-conducteurs utilisés

Les semi-conducteurs sont constitués de matériaux possédant des couches dopées P ou N, permettant ou non le passage du courant selon s'ils sont soumis à des tensions dans des directions particulières.

Trois grands types de semi-conducteurs sont utilisés actuellement :

- **la diode** : dipôle polarisé, non commandé.
- **le thyristor classique** : (3 bornes) seule la fermeture est commandée.
- **les transistors** : (3 bornes) commandés à l'ouverture et à la fermeture :
 - le transistor bipolaire à jonction (BJT), basé sur les jonctions PN ;
 - le **transistor à effet de champ (FET)** à Métal Oxyde Semi conducteur (MOS(FET)) ou à jonction PN (JFET) ;
 - le **transistor bipolaire à grille isolée (IGBT)** : plus récent, combinant les 2 technologies précédentes, avec moins de pertes, mais avec une vitesse de commutation plus lente qu'un MOSFET ;

Nota : le thyristor GTO (Gate Turn Off) est commandable à l'ouverture et à la fermeture, comme un transistor, mais par l'intensité de gâchette.

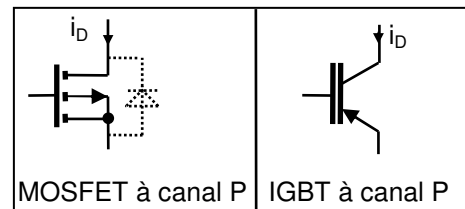


| | Diode | Thyristor (classique) | Transistor MOS(FET) (à canal N) | Transistor IGBT (à canal N ou NPN) |
|--------------------------|---|---|---|--|
| Symbole | | | | |
| Commande | Non commandé $v_D \geq 0$: passant $v_D < 0$: bloqué | semi-commandé par i_{GK} $v_D < 0$: bloqué $v_D \geq 0$ & $i_{GK} = 0$: bloqué $v_D \geq 0$ & $i_{GK} > 0$: passant <i>NB : lorsque $v_D \geq 0$, seule une impulsion i_{GK} suffit pour rendre le thyristor passant, il le restera tant qu'il y a du courant $i_D > 0$.</i> | Commandé par v_G $v_G > 0$: passant $v_G = 0$: bloqué | |
| Caractéristiques idéales | 2 segments | 3 segments | 2 segments, ou 3 segments avec diode de structure | |
| Schéma équivalent | | | | |

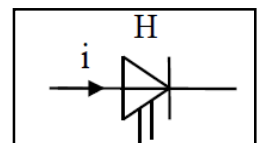
Il existe aussi des transistors à **canal P (ou PNP)** (MOSFET ou IGBT), qui sont passants pour la tension de grille nulle, et bloquants sinon.

Ils sont moins utilisés, car génèrent plus de pertes.

Sur leur symbole, la flèche est inversée (cf. schémas ci-contre), mais il est préférable en plus de préciser « canal P » ou « PNP ».

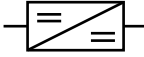





Les **interrupteurs électroniques unidirectionnels commandés**, quelle que soit leur nature, peuvent être représentés par le symbole ci-contre, symbolisant un comportement identique à une diode que l'on pourrait ouvrir ou fermer par commande électrique (cas des transistors et thyristors).



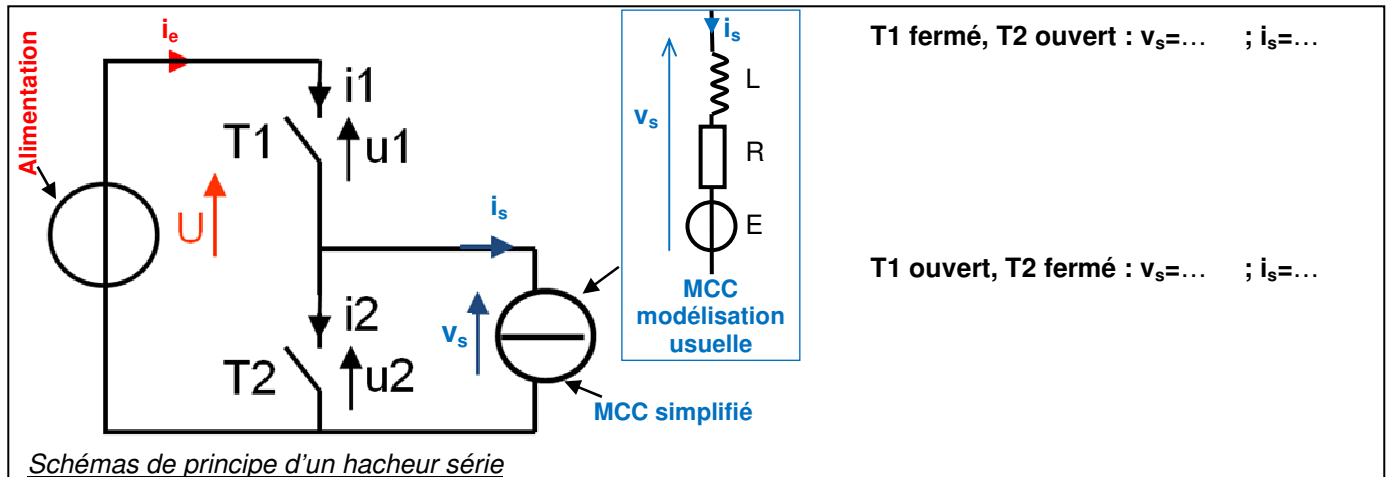
5) Convertisseurs statiques

Il existe plusieurs convertisseurs statiques, que l'on classe par type de courant en entrée et sortie :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Hacheur (continu – continu) |  | Onduleur (continu – alternatif) |  |
| Gradateur ou Transformateur (alternatif – alternatif) |  | Redresseur (alternatif – continu) |  |

5.1) Hacheur

Un hacheur (ou variateur de MCC) sert à alimenter un moteur à courant continu qui sera souvent modélisé par une résistance interne R , une inductance L et une force contre-électromotrice E . La vitesse angulaire ω_m du moteur est proportionnelle à E ($\omega_m = k_E \cdot E$) et le couple C_m du moteur est proportionnel à l'intensité i_s ($i_s = k_T \cdot C_m$).



a) Principe du hachage et rapport cyclique

La cellule de base pour construire un convertisseur statique est la cellule de commutation qui compte deux interrupteurs en commandes complémentaires.

Ce convertisseur un quadrant, appelé hacheur série, « hache » le signal d'entrée (continu), très rapidement, de telle sorte que le récepteur (souvent un moteur) ne ressent que la valeur moyenne de la tension à ses bornes :

$$\langle v_s \rangle = \alpha \times U$$

Le **rapport cyclique** α est souvent envoyé par une carte électronique sous forme de signal **MLI** (modulation de largeur d'impulsion) ou **PWM** en anglais (*Pulse Width Modulation*) : $\alpha = \frac{\text{Largeur de pulse}}{\text{Période de modulation}}$ (α compris entre 0 et 1)

b) Différents types de hacheurs

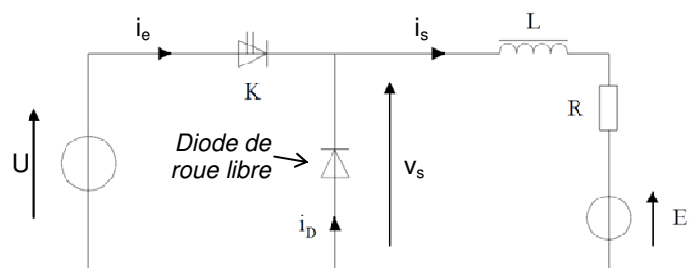
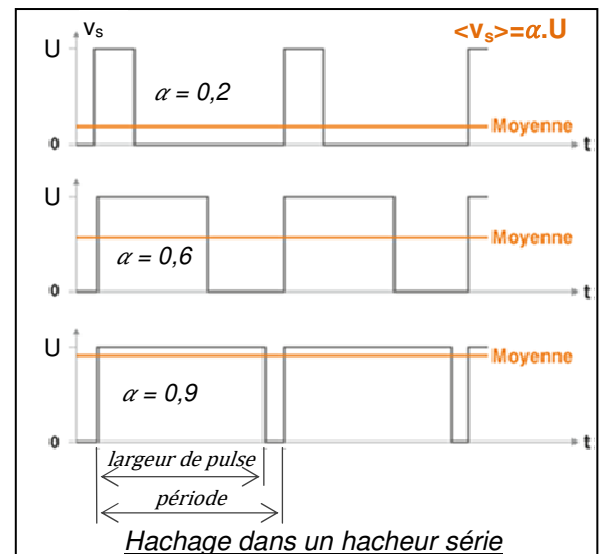
Hacheur série, ou abaisseur de tension (un quadrant) :

Il ne permet que d'alimenter un moteur CC en tension positive, donc de le faire tourner dans un seul sens, sans recharge d'une batterie possible (quadrant Q1).

La diode est appelée diode de roue libre car elle permet à l'intensité de continuer à circuler dans le moteur (indispensable pour ne pas détériorer les composants) lorsque l'interrupteur commandé K est ouvert.

La tension moyenne de sortie $\langle v_s \rangle$ est plus faible que celle d'entrée (source de tension U) : $\langle v_s \rangle = \alpha \times U$

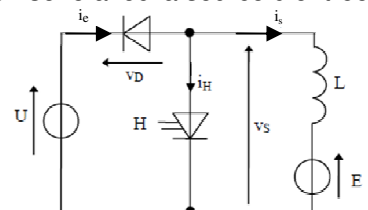
On appelle ce convertisseur un hacheur série car l'interrupteur commandé K est en série avec la source d'entrée.



Hacheur parallèle, ou élévateur de tension (un quadrant) :

L'interrupteur commandé K se trouve en parallèle de l'entrée.

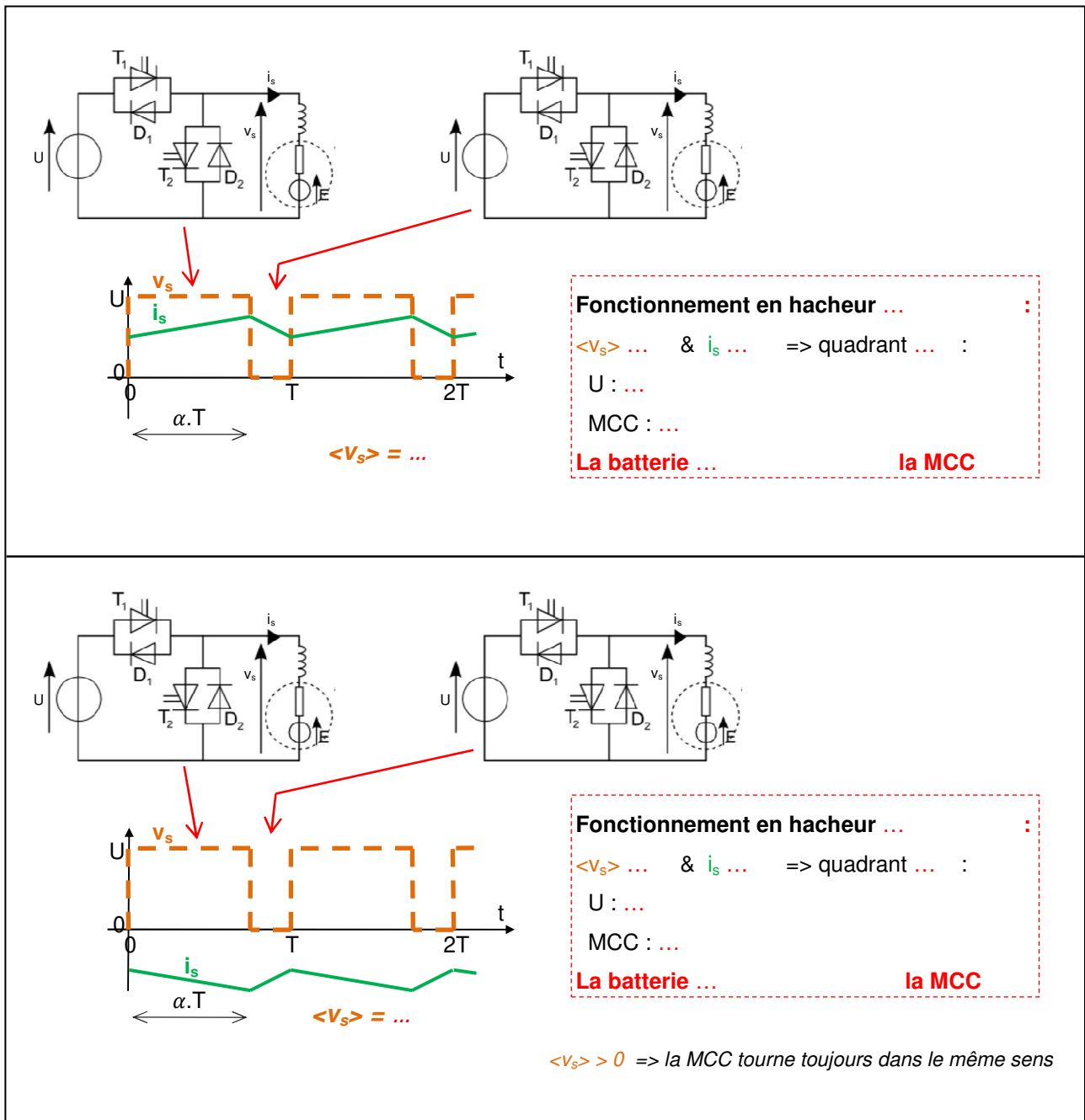
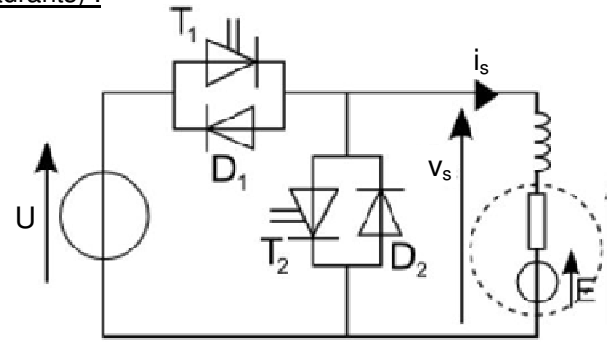
Il ne fonctionne que dans le quadrant Q2 : il permet à la sortie (MCC de force électromotrice E proportionnelle à sa vitesse angulaire ω_m) de recharger une batterie ayant pourtant une tension $U > E$.



Hacheur réversible en courant, ou « série-parallèle » (deux quadrants) :

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). Il est réversible en courant car l'intensité i_s peut être positive ou négative.

Les chronogrammes de l'entrée et de la sortie sont tracés. Compléter les 4 schémas en indiquant par où et dans quel sens circule l'intensité i_s et si les transistors T1 et T2 sont ouvert ou fermé. Indiquer le quadrant de fonctionnement et ce que cela implique.



Dans un hacheur réversible en courant, la machine à courant continu (MCC) ne peut tourner que dans **un seul sens**, mais elle peut fonctionner en **moteur** (récepteur électrique) ou en **génératrice** rechargeant la batterie. Pour qu'elle fonctionne en génératrice, il faut deux conditions :

- que la batterie soit rechargeable (réversibilité en courant de l'ensemble de la chaîne de puissance) ;
- que le moteur tourne plus vite que la vitesse à laquelle il tournerait si c'était la batterie qui l'alimentait, c'est-à-dire que $E > U$; c'est le cas par exemple en forte pente descendante pour un véhicule électrique, ou lorsque ce dernier n'est plus commandé ($\alpha=0$), le véhicule « ralentit » alors en rechargeant la batterie, par « frein-moteur ».

PS : il existe aussi un **hacheur réversible en tension** (non étudié dans ce cours).

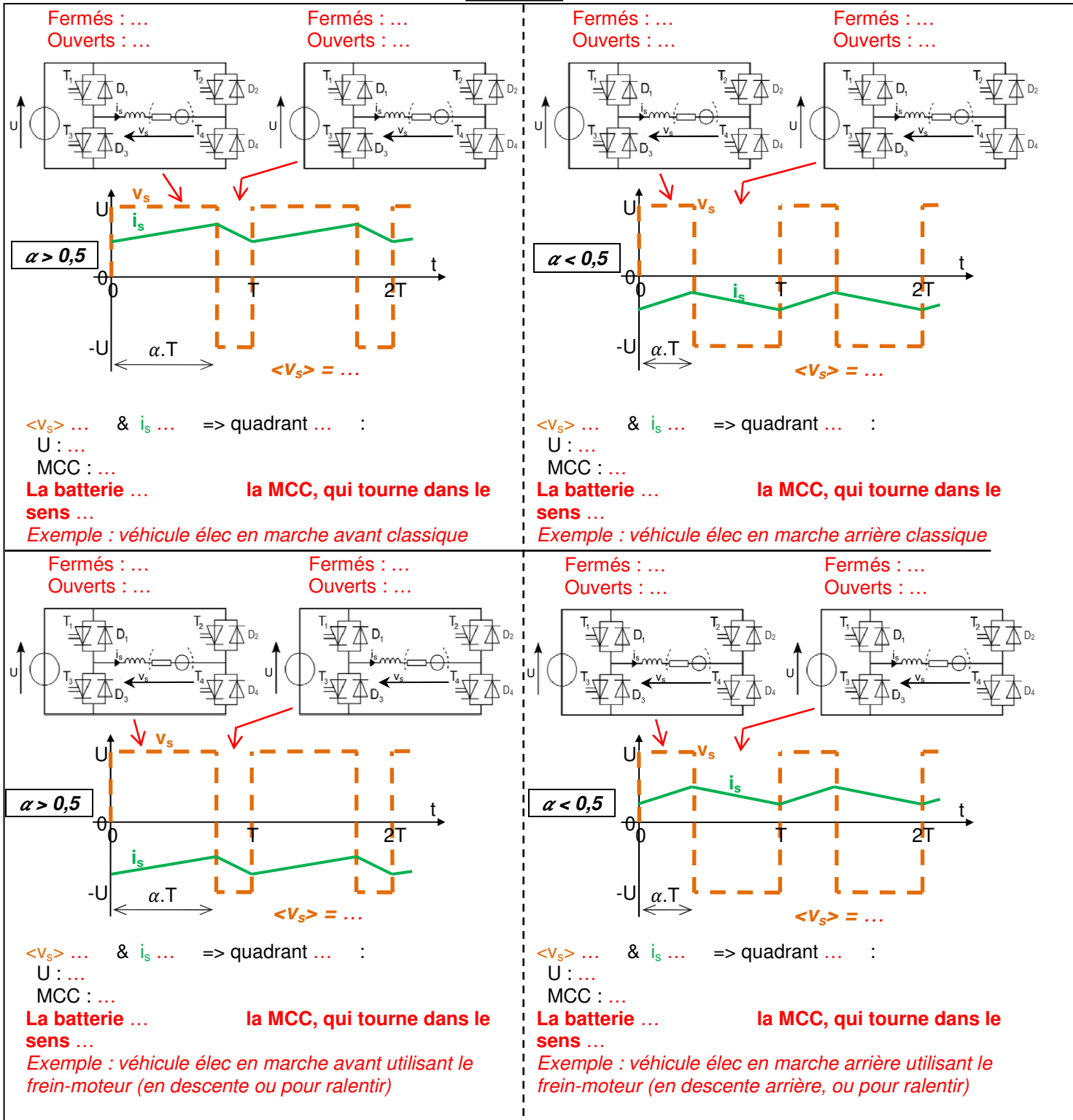
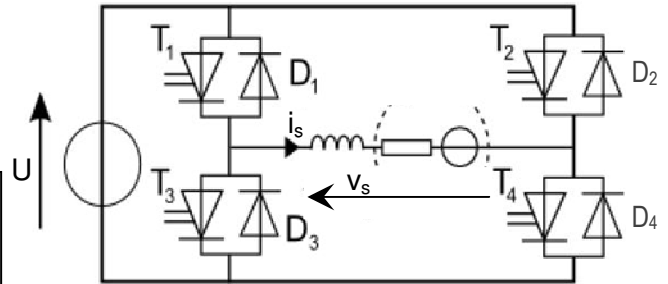
Hacheur en pont, ou hacheur réversible en tension et courant, ou hacheur quatre quadrants (pont en H) :

La MCC peut alors être motrice ou génératrice, en marche avant ou en marche arrière : le système peut fonctionner dans les quatre quadrants.

Il y a deux cellules de commutation : $\{T_1 \text{ et } T_3\}$ ainsi que $\{T_2 \text{ et } T_4\}$. Ils ne peuvent pas être simultanément fermés sinon il y a court-circuit !

Ci-dessous : Pont en H dont le sens est piloté par valeur du rapport cyclique α ($<0,5$ ou $>0,5$).

$\frac{Q2}{Q3} \uparrow \frac{Q1}{Q4}$
4 quadrants



Au final, dans un hacheur en pont dont le sens est piloté selon α : $\langle v_s \rangle = (2\alpha - 1) \cdot U \Rightarrow$

- si $\alpha > 0,5$: le moteur tourne dans le **sens positif**, « alimenté par » ou « alimentant » la batterie ;
- si $\alpha < 0,5$: le moteur tourne dans le **sens négatif**, « alimenté par » ou « alimentant » la batterie.

Pour arrêter le moteur, plutôt que poser $\alpha=0,5$ (forte ondulation de courant), on ferme soit T_1 et T_2 , soit T_3 et T_4 .

Ce hacheur peut aussi être piloté différemment, en laissant l'une des deux phases (de durée $\alpha \cdot T$ ou $(1-\alpha) \cdot T$) en roue libre (T_1 et T_2 fermés) selon le sens de rotation désiré (cf. TD sur le pilotage d'un pont en H L298N).

c) Ondulation de courant dans les hacheurs

Le hachage du signal crée une ondulation de l'intensité, c'est-à-dire une variation de celle-ci, qui peut être néfaste pour certains composants électroniques, ainsi que pour la MCC. Cette ondulation de courant dépend du type de hacheur utilisé et d'autres paramètres.

Dans un hacheur série :

Lorsque la batterie alimente le moteur, on a le schéma de fonctionnement ci-contre.

Loi des mailles aux bornes de la MCC :

$$v_s = \dots$$

On peut découper le fonctionnement en deux phases, cycliques, de période totale T :

- en phase 1, de durée « $\alpha.T$ », le moteur est alimenté par la batterie, et sa tension vaut alors : $v_s = \dots$
on a alors l'équation différentielle de i_s : \dots
- en phase 2, de durée « $(1-\alpha).T$ », le moteur est en « roue libre », et sa tension vaut alors : $v_s = \dots$
on a alors l'équation différentielle de i_s : \dots

De plus, on pourra utiliser l'équation moyennée sur une période T :

$$\text{avec } \langle v_s \rangle = \dots \quad \text{et} \quad \langle \frac{di_s}{dt} \rangle = \dots \quad (\langle i_s \rangle \text{ est constant car le régime est établi}) \Rightarrow \dots$$

Il existe différentes méthodes pour déterminer l'ondulation de courant Δi_s . On **linéarise souvent l'intensité** i_s car la constante de temps (et donc $\tau_{R5\%}$) de la MCC est bien plus grande que la période de modulation T .

Méthode 1 : Résolution complète des équations différentielles

Cette méthode permet d'obtenir la valeur exacte de l'ondulation Δi (idéale), que l'on peut linéariser ensuite.

Résolution des équas diffs avec conditions limites : $i_{s1}(\alpha.T) = i_{s2}(0) = i_{sMAX}$ et $i_{s1}(0) = i_{s2}((1-\alpha).T) = i_{sMIN}$:

$$(1) \Rightarrow i_{s1} = K_1 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{U-E}{R} \quad \text{et} \quad (2) \Rightarrow i_{s2} = K_2 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{E}{R} \quad \text{avec : } K_1 = \frac{U}{R} \cdot \frac{\left(e^{-\frac{R}{L}(1-\alpha)T} - 1\right)}{\left(1 - e^{-\frac{R}{L}T}\right)} \quad \text{et} \quad K_2 = \frac{U}{R} \cdot \frac{\left(1 - e^{-\frac{R}{L}\alpha T}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{R}{L}T}\right)}$$

$$\text{Ondulation de courant } \Delta i_s = i_{sMAX} - i_{sMIN} = \frac{U}{R} \cdot \frac{\left(e^{-\frac{R}{L}T} - e^{-\frac{R}{L}\alpha T} - e^{-\frac{R}{L}(1-\alpha)T} + 1\right)}{\left(1 - e^{-\frac{R}{L}T}\right)} \quad \text{puis DL d'ordre 2 : } \Delta i_s = \frac{U.T.\alpha.(1-\alpha)}{L}$$

Méthode 2 : On considère que l'intensité varie linéairement (la plus simple)

i_{s1} et i_{s2} (les intensités des phases 1 et 2) sont des droites de pente : $\frac{di_{s1}}{dt} = \dots$ et $\frac{di_{s2}}{dt} = \dots$
que l'on remplace dans les équations différentielles (1) et (2), en les moyennant :

(1) moyennée : \dots

(2) moyennée : \dots

Or \dots

$$\Rightarrow \Delta i = \frac{U.T.\alpha.(1-\alpha)}{L}$$

Méthode 3 : On néglige la résistance interne R du moteur (souvent proposée aux concours)

En réalité on néglige le terme $R.i(t)$ par rapport à $L.di(t)/dt$ ce qui revient à poser $R \approx 0$ dans les équas diffs :

$$(1) \Rightarrow L \cdot \frac{di_{s1}}{dt} = U - E \quad \Rightarrow \quad \frac{di_{s1}}{dt} = \dots$$

Les deux conditions aux limites sur $i_{s1}(t)$ sont, en fonction de i_{MIN} et i_{MAX} : \dots et \dots

$\Rightarrow \dots$

$$\Rightarrow \Delta i_s = i_{MAX} - i_{MIN} = \dots$$

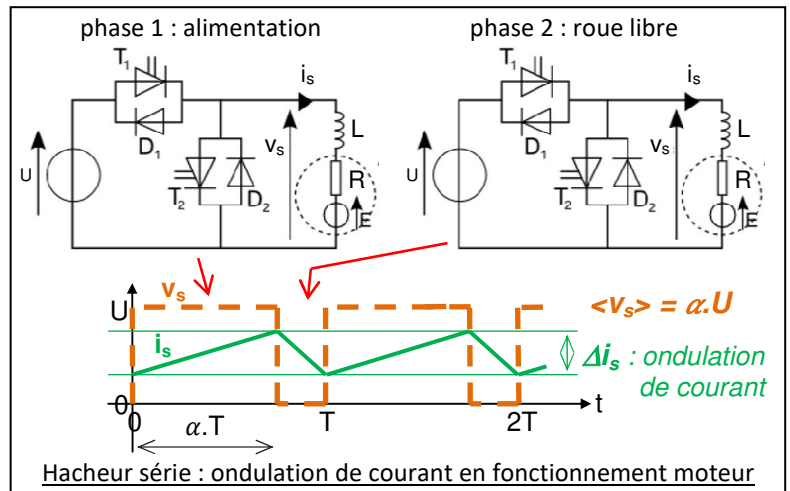
L'équation moyennée (3) permet d'obtenir : $E \approx \dots$

$$\Rightarrow \Delta i_s = \frac{U.T.\alpha.(1-\alpha)}{L}$$

NB1 : Pour **diminuer l'ondulation de courant** Δi_s on peut diminuer la période de hachage T (souvent prise la plus faible possible) ou augmenter l'inductance L : pour cela, on ajoute souvent en série avec la MCC une bobine, nommée **bobine de lissage**, son inconvénient étant l'augmentation du temps de réponse du hacheur.

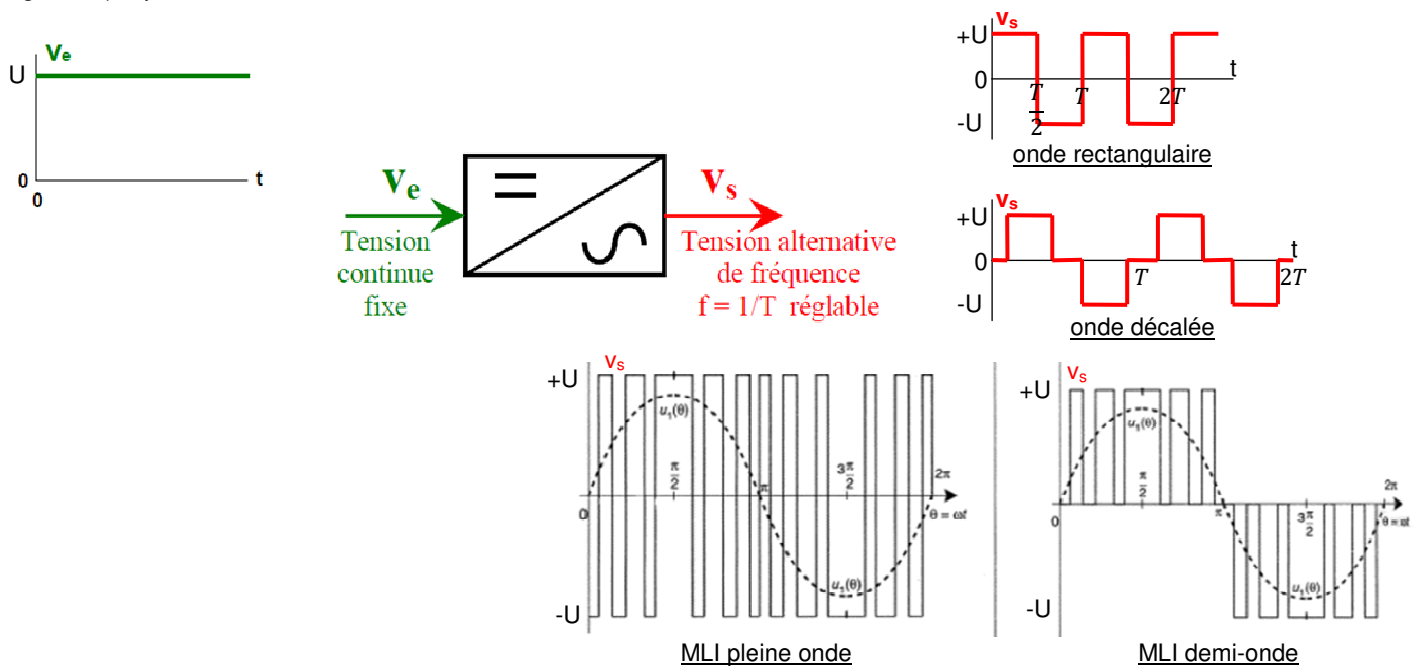
NB2 : $\langle i_s \rangle$ ne peut être déterminée que si l'on connaît la charge (couple C_m) sur la MCC, car $\langle i_s \rangle = k_T.C_m$.

NB3 : Inconvénient du **hacheur en pont** piloté par valeur du rapport cyclique α ($<0,5$ ou $>0,5$) : pour avoir des vitesses nulles ou proches : $\alpha \approx 0,5$ ce qui va générer une grande ondulation de courant.



5.2) Onduleur

Ce convertisseur permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement de fréquence et de tension efficace réglables) à partir d'une source de tension constante.



On distingue :

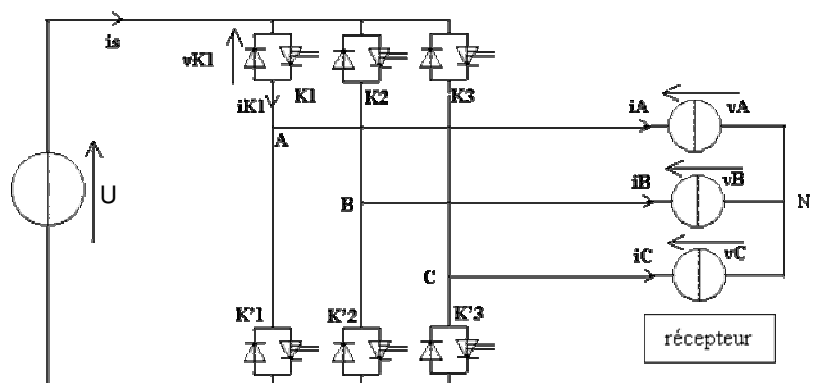
- Les onduleurs :
 - monophasés : un seul signal alternatif en sortie ;
 - triphases : 3 signaux alternatifs décalés de 120° en sortie.
- Les onduleurs :
 - à onde rectangulaire (symétrique) ;
 - en créneaux de largeur variable, ou à onde décalée, permettant de faire aussi varier la tension $V_{s_efficace}$;
 - à modulation de largeur d'impulsions (MLI) qui peuvent délivrer :
 - soit une onde MLI pleine onde (bipolaire),
 - soit une onde MLI demi-onde (unipolaire).

Une fois alterné, le signal a souvent besoin d'être **lissé et/ou filtré**. L'intensité est en général naturellement lissée par l'inductance du récepteur, mais si celle-ci est trop faible, on peut ajouter une bobine de lissage.

Le schéma de principe électrique est le même qu'un hacheur deux ou quatre quadrants (schémas déjà vus), c'est uniquement la commande du **rapport cyclique α** qui change par rapport à un hacheur :

- si le rapport cyclique α est constant :
 - si la fréquence de modulation est « importante » ($> \text{kHz}$) c'est un hacheur : le récepteur fonctionnera comme s'il recevait une tension constante $\langle V_s \rangle$,
 - si la fréquence de modulation est assez faible (dans les 50Hz) c'est un onduleur à onde rectangulaire (voire à onde décalée) ;
- si le rapport cyclique α (de fréquence très élevée) varie de façon sinusoïdale « $\alpha(t) = (1 + \sin(\omega t))/2$ », on obtient des tensions hachées de moyenne sinusoïdale, et des intensités réellement quasi-sinusoïdales car lissées (par au moins l'inductance du récepteur) : c'est un onduleur MLI.

Pour un **onduleur triphasé**, il suffit d'alimenter trois phases en monophasées, décalées de $2\pi/3$. Exemple ci-contre du schéma d'un onduleur triphasé en pont (le récepteur peut être un moteur triphasé par exemple).



5.3) Redresseur

a) Généralités

Un redresseur transforme une puissance électrique alternative en puissance continue. Il redresse les alternances négatives de la tension d'entrée pour que la valeur moyenne de la tension en sortie soit non-nulle.

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

On distingue :

- Le redressement :
 - monophasé : un seul signal alternatif en entrée ;
 - triphasé : 3 signaux alternatifs décalés de 120° en entrée.
- Le redressement :
 - simple alternance : il ne fait que couper l'alternance négative ;
 - double alternance : il inverse le signe de l'alternance négative pour en faire une alternance positive (équivalent à l'opération mathématique « valeur absolue »).
- Le redressement :
 - non commandé : constitué d'interrupteurs non commandés, donc de diodes ;
 - commandé : constitué d'interrupteurs commandés (en général thyristors pour les grandes puissances, ou transistors sinon) et éventuellement de diodes. La commande du redressement permet de faire varier la tension moyenne de sortie u .

Une fois redressé, le signal a souvent besoin d'être **lissé et/ou filtré**. L'intensité est en général naturellement lissée par l'inductance du récepteur, mais si celle-ci est trop faible, on peut ajouter une bobine ou un condensateur de lissage.

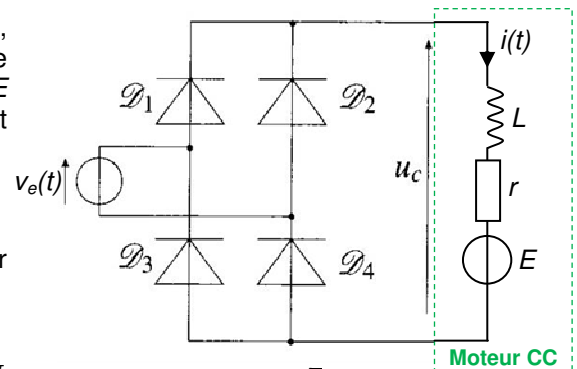
b) Principe du redressement : détail du pont de diodes ou « pont de Graetz »

On étudie le pont de diodes représenté ci-contre (pont de Graetz), alimentant, en régime établi, un moteur CC modélisé par une inductance L , une résistance interne r et une force électro-motrice E telle que $\omega_m = k_E \cdot E$. On rappelle que le couple C_m du moteur est proportionnel à l'intensité i ($i = k_T \cdot C_m$).

La tension d'entrée est sinusoïdale de valeur efficace V :

$$v_e(t) = V\sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad V = 230 \text{ V} ; \omega = 314 \text{ rad/s (50Hz)}$$

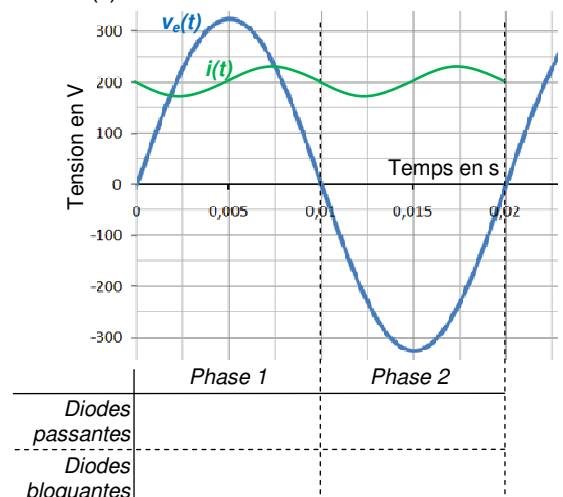
- En assimilant le moteur à une source idéale de courant, indiquer sous le chronogramme les diodes passantes et bloquantes.
- Tracer sur le chronogramme l'allure de la tension de sortie $u_c(t)$.



On donne la tension moyenne aux bornes du moteur : $\langle u_c \rangle = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{T}{2}} V\sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt = \frac{2 \cdot V\sqrt{2}}{\pi}$

- En négligeant la résistance interne r , déterminer E et ω_m , puis la forme de $i(t)$.

...



On peut en déduire l'ondulation de courant $\Delta i = i_{MAX} - i_{MIN}$. Elle est proportionnelle à « $1/L$ » : plus l'inductance est grande, plus l'ondulation de courant est faible, plus le courant est lissé. Un exemple est donné sur le chronogramme : on peut valider l'hypothèse de l'assimilation du moteur à une source -idéale de courant.

...

$$\text{AN : } t_{M1} = 0,69/\omega = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad t_{M2} = (\pi - 0,69)/\omega = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ s} ; \Delta i = \dots$$

c) Schémas de principe des différents redresseurs

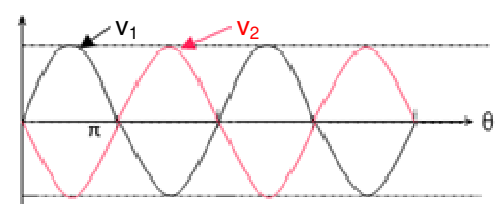
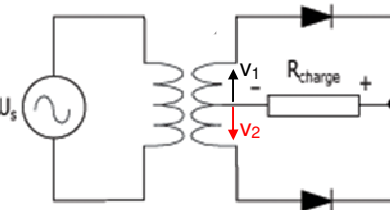
Redressement non commandé

| Redresseur monophasé- simple alternance- | | |
|--|--|--------------------|
| Schéma de montage | Grandeurs caractéristiques Valeur moyenne de u : $u_{\text{moy}} = V\sqrt{2}/\pi$ Valeur efficace de u : $U = V\sqrt{2}/2$ Tension maximale supportée par la diode : $V_{D\text{max}} = V\sqrt{2}$ | Courbes |
| Redresseur monophasé- double alternance- | | |
| Schéma de montage PD2 | Grandeurs caractéristiques Valeur moyenne de u : $u_{\text{moy}} = 2V\sqrt{2}/\pi$ Valeur efficace de u : $U = V$ Tension maximale supportée par la diode : $V_{D\text{max}} = V\sqrt{2}$ | |
| Schéma de montage P2 | Grandeurs caractéristiques Valeur moyenne de u : $u_{\text{moy}} = 2V\sqrt{2}/\pi$ Valeur efficace de u : $U = V$ Tension maximale supportée par la diode : $V_{D\text{max}} = 2V\sqrt{2}$ | |
| Redresseur triphasé | | |
| Schéma de montage P3 | Grandeurs caractéristiques Valeur moyenne de u : $u_{\text{moy}} = 3\sqrt{3} V\sqrt{2}/2\pi$ Valeur efficace de u : $U = V\sqrt{[1 + (\sin 2\pi/3) / 2\pi/3]}$ Tension maximale supportée par la diode : $V_{D\text{max}} = \sqrt{3} \cdot V\sqrt{2}$ | |
| Schéma de montage PD3 | Grandeurs caractéristiques Valeur moyenne de u : $u_{\text{moy}} = 3\sqrt{3} V\sqrt{2}/\pi$ Valeur efficace de u : $U = \sqrt{3} V\sqrt{[1 + (\sin \pi/3) / \pi/3]}$ Tension maximale supportée par la diode : $V_{D\text{max}} = \sqrt{3} \cdot V\sqrt{2}$ | |

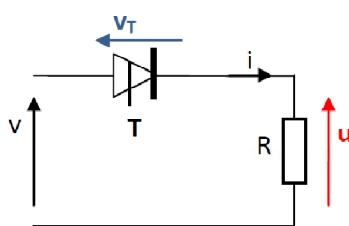
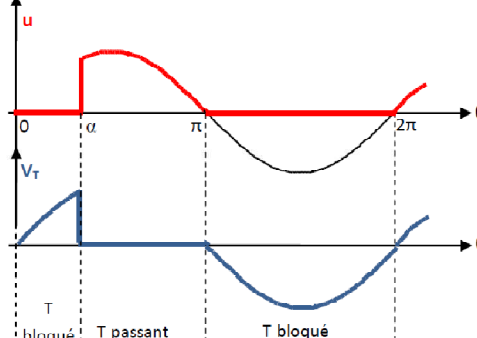
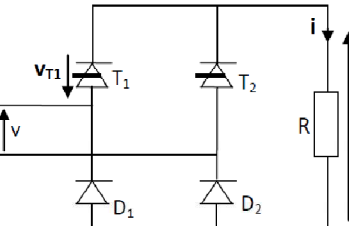
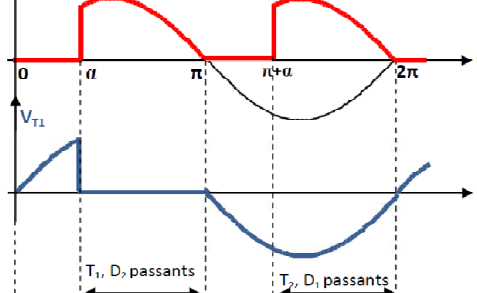
v : Tension d'entrée sinusoïdale de valeur efficace V : $v(t) = V\sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ avec $\omega = \theta = \frac{d\theta}{dt}$

$v_1 = v$; $v_{2,3}$ décalées

* : Détail du transformateur à point milieu :



Redressement commandé monophasé

| Redresseur commandé - simple alternance- | | |
|--|--|--|
| Schéma de montage  <p>$\alpha = \text{l'angle de retard à l'amorçage}$</p> | Grandeurs caractéristiques Valeur moyenne de u : $u_{\text{moy}} = V\sqrt{2}/\pi \cdot (1 + \cos \alpha)/2$ Valeur efficace de u : $U = V\sqrt{2}/2 \cdot \sqrt{(1 - \alpha/\pi + \sin 2\alpha/2\pi)}$ Tension maximale supportée par le thyristor : $V_{T\text{max}} = V\sqrt{2}$ | Courbes  |
| Redresseur commandé - double alternance – pont mixte | | |
| Schéma de montage  <p>$\alpha = \text{l'angle de retard à l'amorçage}$</p> | Grandeurs caractéristiques Valeur moyenne de u : $u_{\text{moy}} = 2V\sqrt{2}/\pi \cdot (1 + \cos \alpha)/2$ Valeur efficace de u : $U = V\sqrt{2} \cdot \sqrt{(1 - \alpha/\pi + \sin 2\alpha/2\pi)}$ Tension maximale supportée par le thyristor : $V_{T\text{max}} = V_{D\text{max}} = V\sqrt{2}$ | Courbes  |

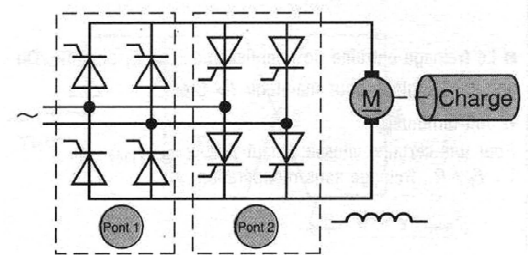
Il existe d'autres redresseurs commandés, en remplaçant les diodes par des thyristors.

Par exemple : redresseur commandé triphasé à pont mixte (moitié thyristor, moitié diodes) ou « tout thyristors ».

Autre exemple : Double pont complet à thyristors.

Les deux ponts complets sont reliés tête-bêche d'où un fonctionnement possible dans les 4 quadrants.

Attention : les deux ponts ne doivent pas être commandés en même temps (risque de court-circuit). La commande des deux ponts de puissance est associée à une logique de réversibilité qui assure la validation de la commande d'un seul des deux ponts selon le quadrant de fonctionnement désiré.



5.4) Exemples d'application des redresseurs et onduleurs

a) Onduleur seul

Alimentation des dispositifs de chauffage par induction (fréquence de sortie de quelques centaines de Hz).

Alimentation du réseau national à partir d'un panneau solaire photovoltaïque (qui fournit une tension continue).

Alimentation d'un moteur synchrone à partir d'un courant continu (ex : TGV Thalys, Toyota Prius).

b) Redresseur seul

Alimentation des appareils fonctionnant sur batterie.

Résistances chauffantes munies de deux puissances : via un interrupteur, une diode simple-alternance permet d'obtenir la moitié de la pleine puissance (ex : sèche-cheveux, petit radiateur soufflant).

c) Redresseur puis onduleur

Variateur de vitesse pour moteur à courant alternatif (mono ou triphasé, synchrone ou asynchrone), cf. schéma ci-contre.

Alimentations de sûreté : un redresseur permet d'alimenter la batterie de secours qui prend le relais en cas de (micro-) coupure.

Cela permet aussi de filtrer les parasites du réseau (ex : centres de serveurs informatiques, centres hospitaliers).

