

L' électronique de puissance au service de la vitesse variable



Ce cours utilise de nombreux ouvrages et sites web sur lesquels j' ai repris des photos ou des diagrammes.
Je tiens à remercier toutes les personnes qui directement et/ou indirectement ont contribué à l'enrichissement de ce cours.

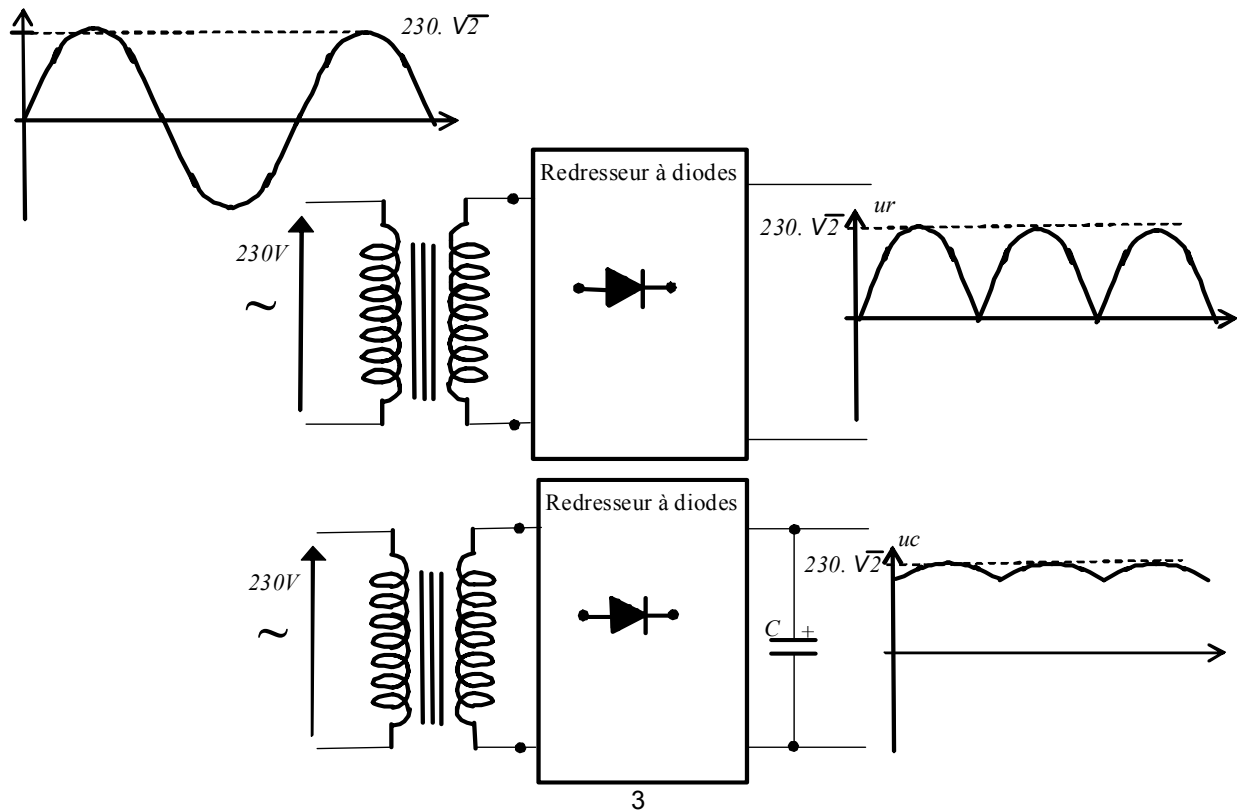


Plan

- * Besoins en matière d'alimentation des machines à courant continu
- * Mise en évidence de la nécessité de travailler en commutation
- * Modalités d'obtention par commutation de tensions ou de courants de formes données

Alimentation

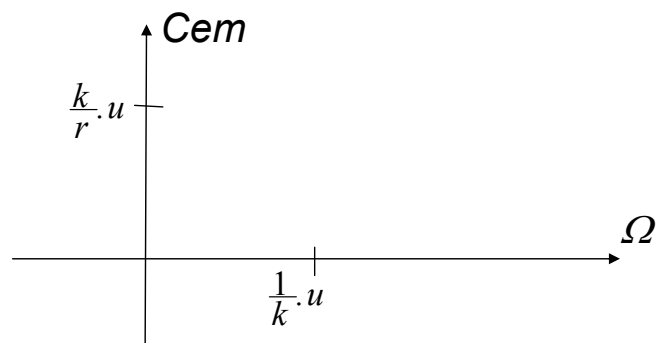
A partir d'une tension de signe alternatif, comment générer une tension de signe constant qui sera appliquée aux bornes de l'induit de la mcc ?



Rappel sur la vitesse variable des MCC

Si la tension aux bornes de l'induit est constante, la vitesse sera constante. La mcc fonctionne en régime permanent.

$$\text{Rappel } u(t) = e(t) + r \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$



Si l'on souhaite avoir une autre valeur de la vitesse (ou une valeur variable de la vitesse), il faut un dispositif d'alimentation qui varie la tension (d'alimentation aux bornes de l'induit de la mcc).

Applications des entraînements à vitesse variable

* Deux grands domaines d'application

- Applications où la vitesse variable est une condition intrinsèque de fonctionnement du procédé
 - Traction électrique
 - entraînement de laminoirs, de fours à ciment et d'une manière générale toutes lignes de la métallurgie, du textile, du caoutchouc, du papier
 - Les machines outils et la robotique

- Entraînement de pompes et compresseurs

5

Intérêt économique

- ☒ Gain en énergie (on agit sur l'alimentation et non sur les pertes)
 - exemple pompe à vitesse constante + vanne vs. pompe à vitesse variable
- ☒
- ☒ Allongement de la durée de vie des moteurs
 - réduction des échauffements au démarrage
 -
 -
- ☒ La souplesse, flexibilité, précision et rapidité des régulations permettent un accroissement de la productivité

Quelques inconvénients...

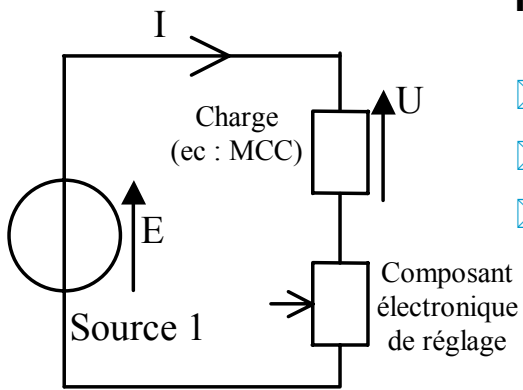
- ☒ Le courant dans le moteur n'est plus tout à fait continu
- ☒

- ☒ Ondes électromagnétiques rayonnées

6

Nécessité de travailler en commutation

Montage série



- ☒ Puissance fournie par la source :
- ☒ Puissance absorbée par la charge :
- ☒ Puissance à gérer par le composant :

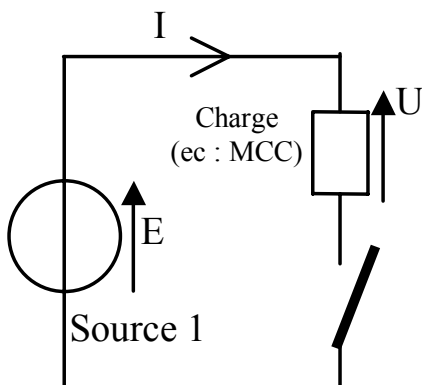
- ☒ Deux possibilités pour minimiser la puissance dans le composant électronique

- ☒ Le composant électronique de puissance ne peut travailler que comme un interrupteur

7

Nécessité de travailler en commutation

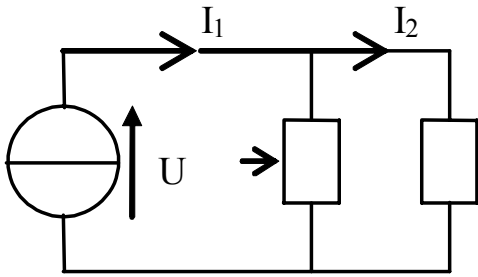
Montage série



8

Nécessité de travailler en commutation

Montage parallèle



- ☒ Puissance fournie par la source :
- ☒ Puissance absorbée par la charge :
- ☒ Puissance à gérer par le composant :

- ☒ Deux possibilités pour minimiser la puissance dans le composant électronique

= 0 \Leftrightarrow Circuit ouvert

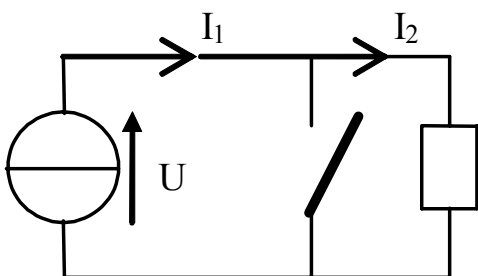
\Leftrightarrow Court-circuit

- ☒ Le composant électronique de puissance ne peut travailler que comme un interrupteur

9

Nécessité de travailler en commutation

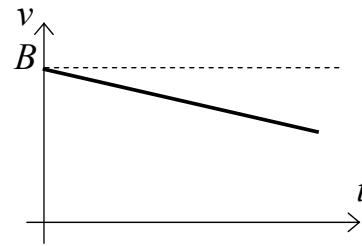
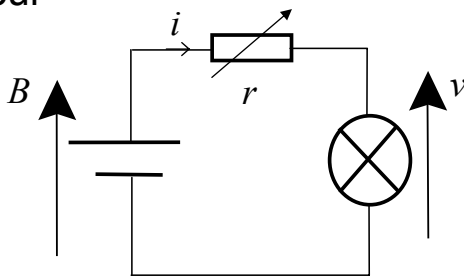
Montage parallèle



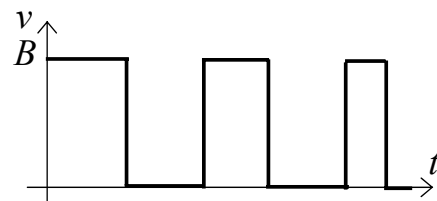
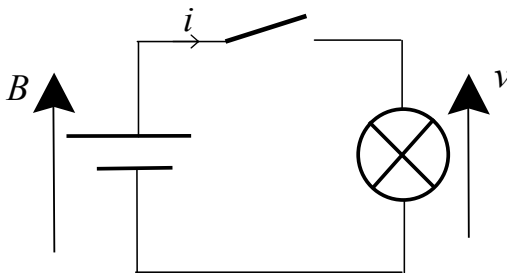
10

En résumé : deux moyens

- Réalise l'adaptation du transfert énergétique d'un générateur à un récepteur



- Pertes par effet Joule très important (et donc très coûteuses)
- La conversion est réalisée de manière discontinue

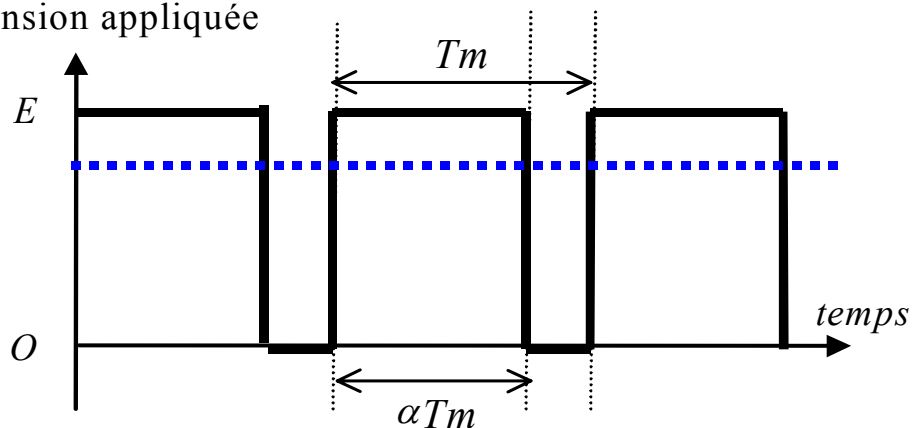


• Même tension en valeur moyenne

11

Comment dans ces conditions, obtenir une tension continue ?

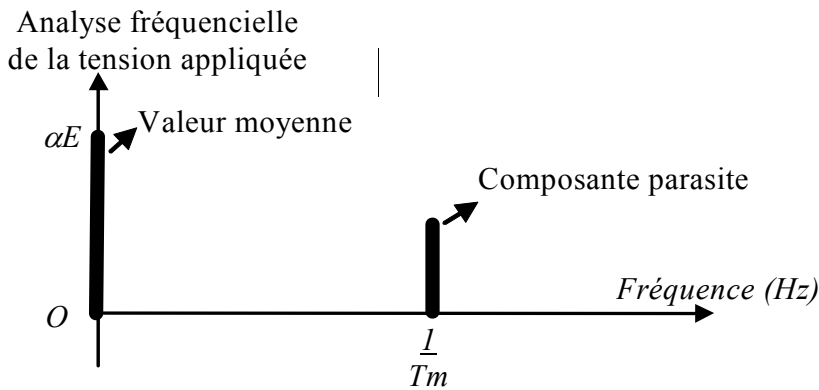
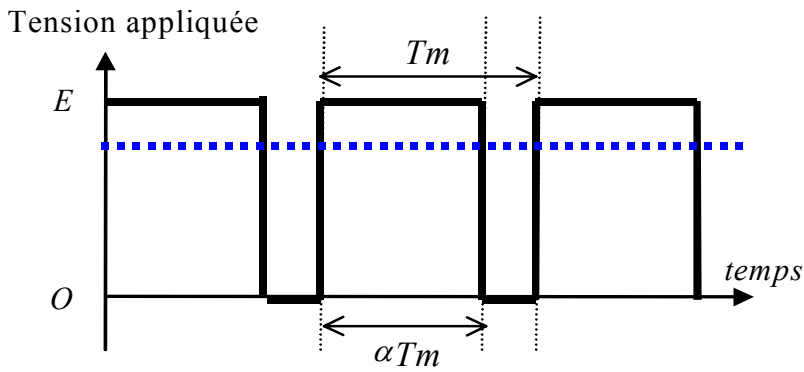
U : Tension appliquée



☒ La tension appliquée comporte :

- une composante utile : la valeur moyenne αE
- une composante parasite à la fréquence $f = 1/T_m$

12



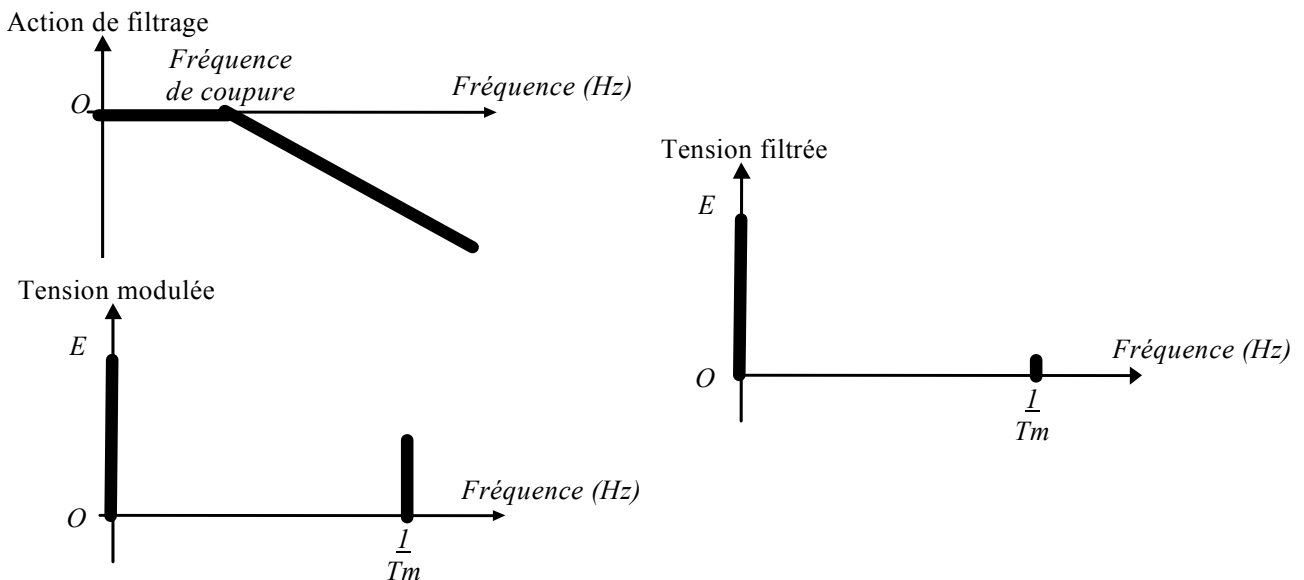
13

Filtrage de la composante parasite

☒ 1^{ère} possibilité : ajouter un circuit passif (RC, RL, LC)

☒ 2^{ème} possibilité : profiter des caractéristiques de la charge :

un moteur DC constitue un filtre RL du premier ordre (fréquence de coupure \approx quelques centaines de Hz à quelques kHz)

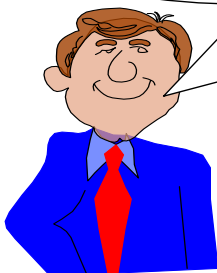


14

Les interrupteurs de l'électronique de puissance



Ce cours utilise de nombreux ouvrages et sites web sur lesquels j'ai repris des photos ou des diagrammes. Je tiens à remercier toutes les personnes qui directement et/ou indirectement ont contribué à l'enrichissement de ce cours.



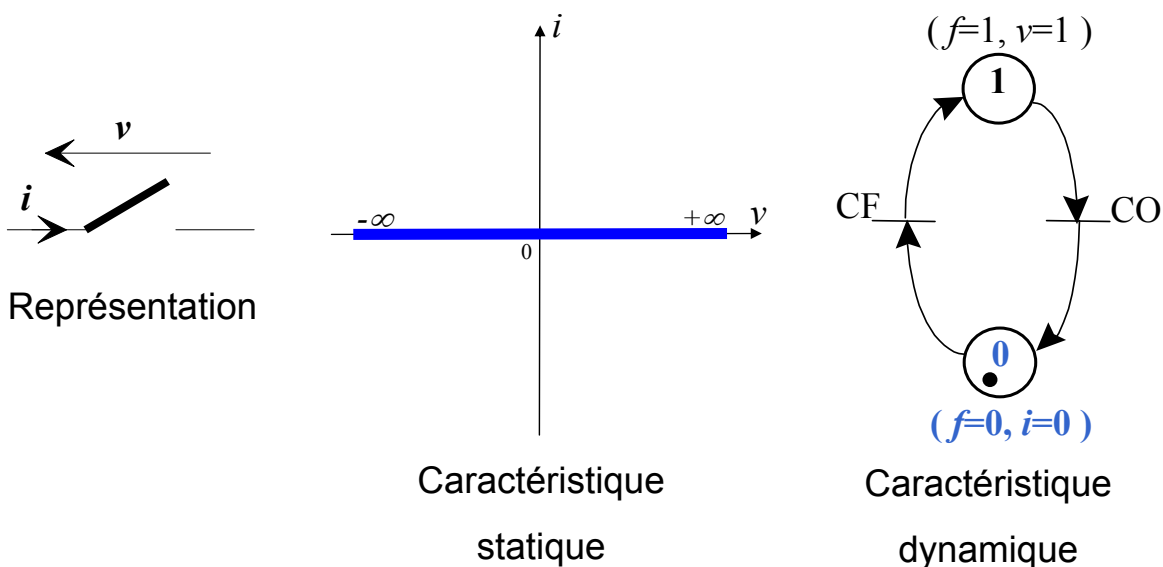
Les interrupteurs de l'électronique de puissance

- ✉ L'interrupteur idéal
- ✉ L'interrupteur non commandable : la fonction diode
- ✉ L'interrupteur commandé à la fermeture et à l'ouverture : la fonction transistor
- ✉ Les interrupteurs synthétisés

17

L' interrupteur dipôle idéal

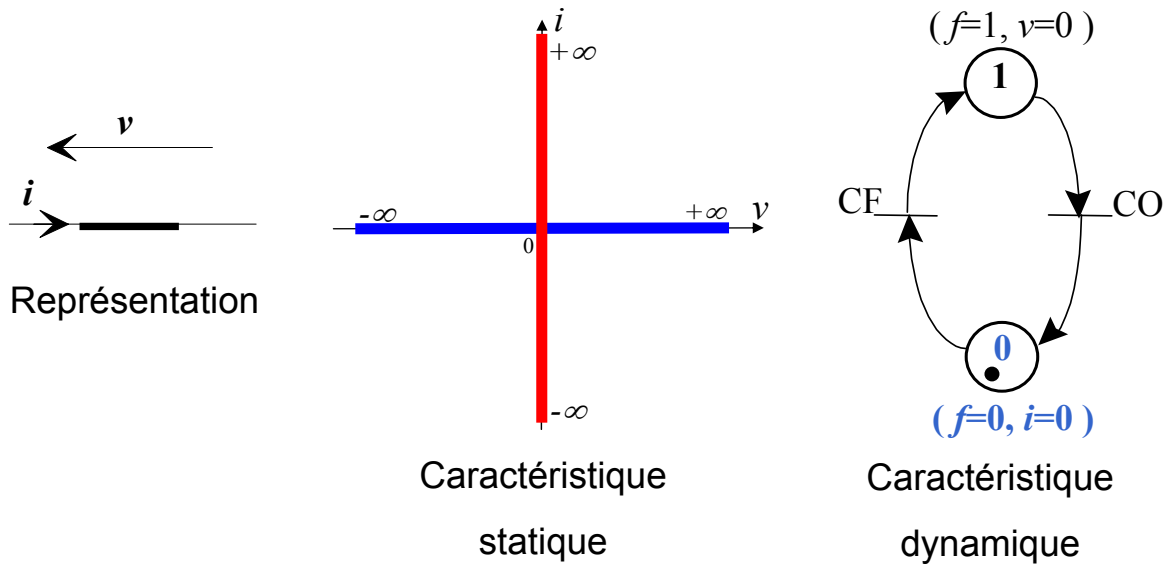
- Courant nul à l'état bloqué (ouvert)



18

L' interrupteur dipôle idéal

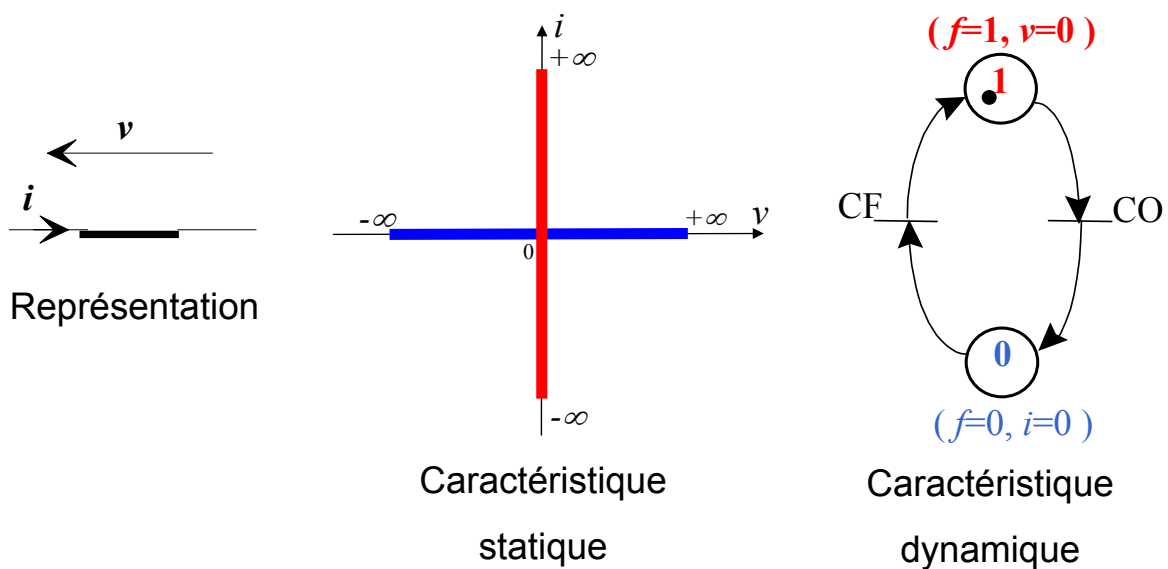
- Courant nul à l'état bloqué (ouvert)
- Chute de tension nulle à l'état passant (fermé)



19

L' interrupteur dipôle idéal

- Courant nul à l'état bloqué
- Chute de tension nulle à l'état passant
- Passage instantané d'un état à l'autre



20

Synthèse

• Comment faire un interrupteur idéal qui commute à plusieurs kHz ?

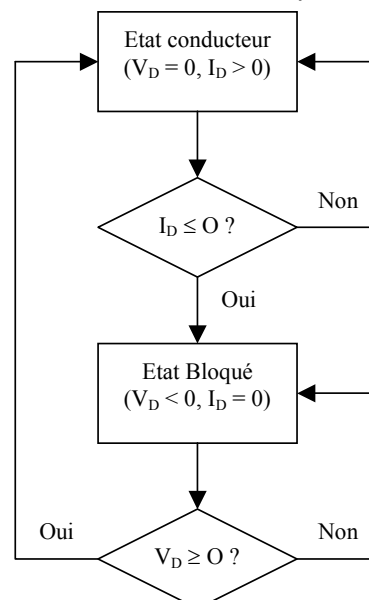
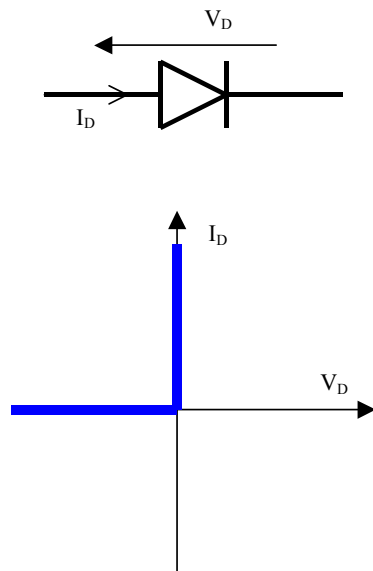
• Un interrupteur idéal est synthétisé en utilisant des transistors et des diodes

21

La fonction diode

✉ Un interrupteur à ouverture et à fermeture spontanée

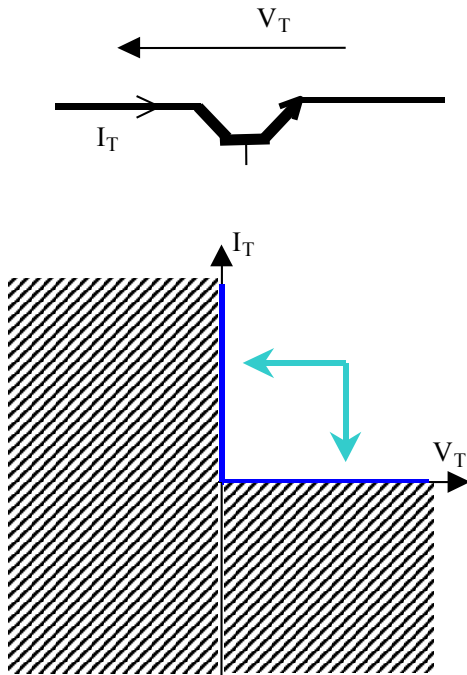
- il s'ouvre (cesse de conduire) quand le courant qui le traverse s'annule (devient légèrement négatif).
- il se ferme (conduit) quand la tension à ses bornes devient positive (dépasse une certaine valeur appelée tension de seuil).



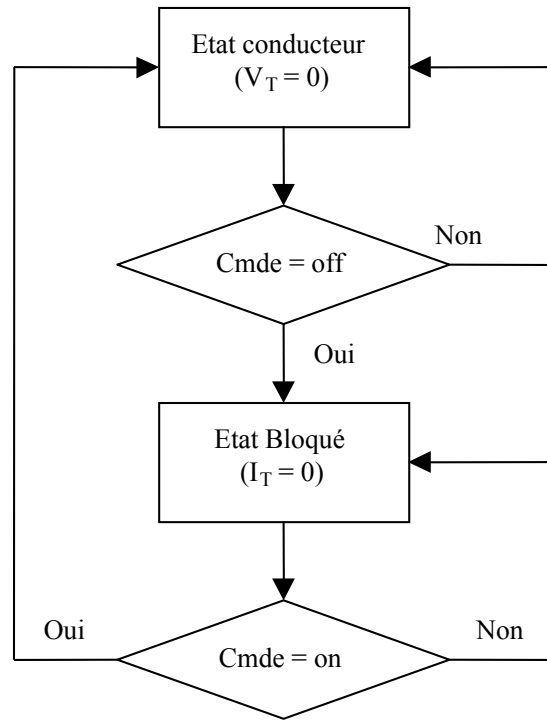
22

La fonction transistor

☒ Un interrupteur à ouverture et à fermeture commandée



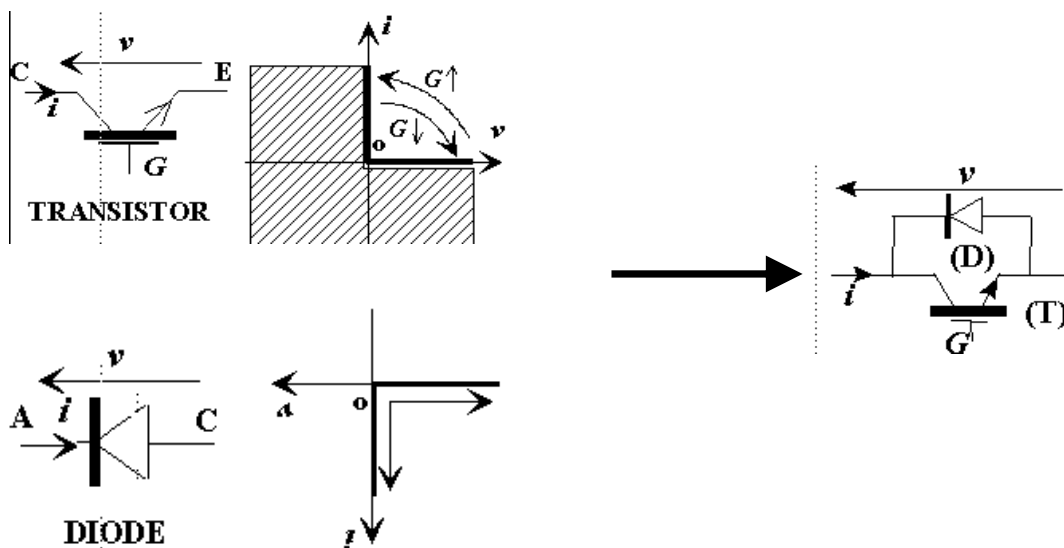
Contrainte : $I_T > 0$ et $V_T > 0$



Interrupteurs synthétisés

☒ On peut créer d'autres interrupteurs électroniques de puissance en combinant les interrupteurs précédents (et leur commande).

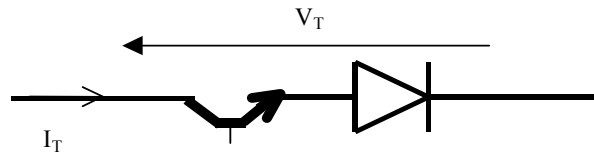
☒ Exemple 1 : transistor + diode anti-parallèle



INTERRUPTEUR BIDIRECTIONNEL EN COURANT

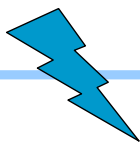
Interrupteurs synthétisés

☒ Exemple 2 : transistor + diode série



25

Les convertisseurs continu-continu (DC-DC)



Les convertisseurs continu-continu

Plan

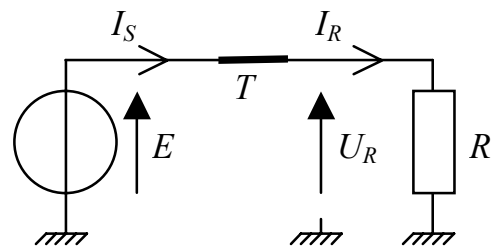
- ☒ Hacheur série
- ☒ Hacheur parallèle
- ☒ Hacheur réversible en courant
- ☒ Hacheur réversible en courant et en tension
- ☒ Application à l'alimentation de moteurs DC

27

Un cas élémentaire : l'interrupteur idéal

☒ On désire alimenter un récepteur (résistif) par une source de tension

- En fermant l'interrupteur T , on connecte le récepteur à la source de tension E

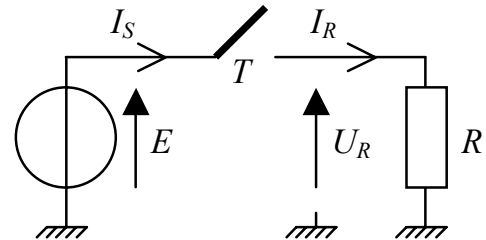


28

Un cas élémentaire : l'interrupteur idéal

☒ On désire alimenter un récepteur (résistif) par une source de tension

- En l'ouvrant, on connecte le récepteur à une source de courant ($I_R = 0$)



29

Un cas élémentaire : le transistor

☒ Commutations :

- Quant T est fermé, le courant qui le traverse est constant et égal à

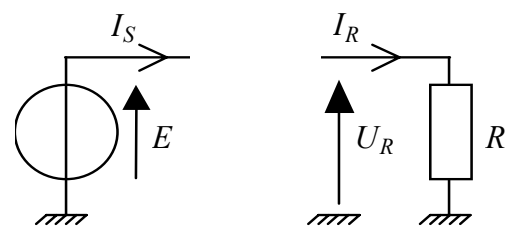
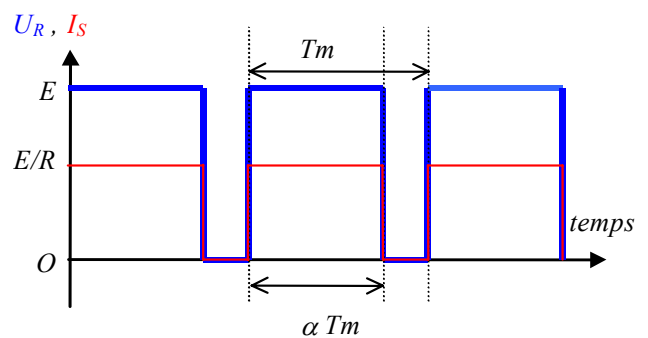
$$I_S = I_R = E/R > 0$$

⇒

- Quant T est ouvert, la tension à ses bornes est constante et égal à

$$E - U_R = E > 0$$

⇒



T doit être un interrupteur entièrement commandé

30

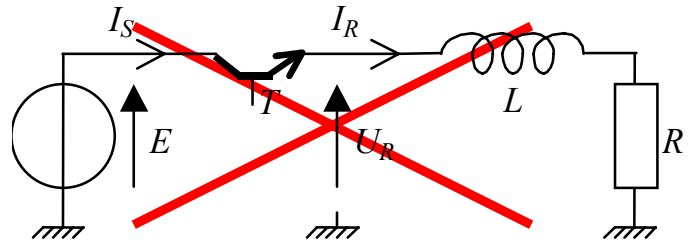
Un cas élémentaire : le transistor

Et si le récepteur est inductif...

☒ Le récepteur est assimilable à une source de courant

⇒ On ne peut ouvrir l'interrupteur T

Annulation d'une source de courant !



Pendant la phase d'ouverture de l'interrupteur T , il faut connecter le récepteur à une autre source de tension

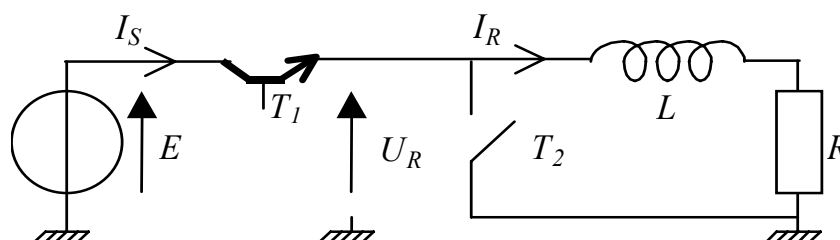
31

Quel type d'interrupteur pour T_2 ?

☒ Un court-circuit est une source de tension « naturelle »

☒ T_2 doit se fermer « automatiquement » quand T_1 s'ouvre pour éviter que la source de courant ne soit ouverte

☒ T_2 doit s'ouvrir « automatiquement » quand T_1 se ferme pour éviter que la source de tension ne soit court-circuitée



32

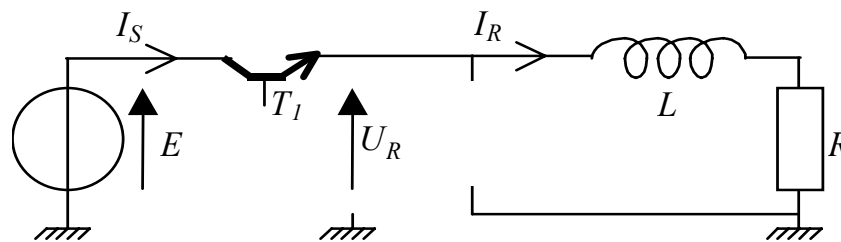
Quel type d'interrupteur pour T_2 ?

☒ T_2 doit être à ouverture et fermeture spontanée

⇒

☒ Vérification des conditions d'ouverture et de fermeture :

- quand T_1 se ferme, la source E est **a priori** court-circuitée et le courant dans la diode T_2 tente de s'inverser ⇒ elle s'ouvre automatiquement
- quand T_1 s'ouvre le courant I_R **a priori** chute, la tension $U_R = RI_R + Ldi_R/dt$ devient négative, donc celle aux bornes de la diode positive ⇒ elle se ferme automatiquement

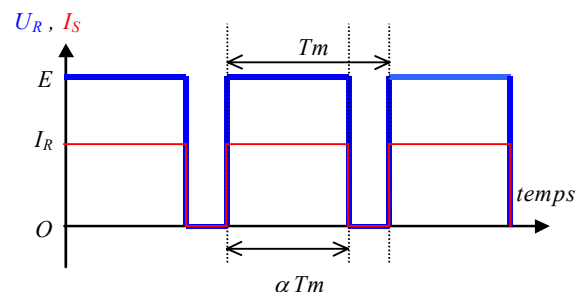
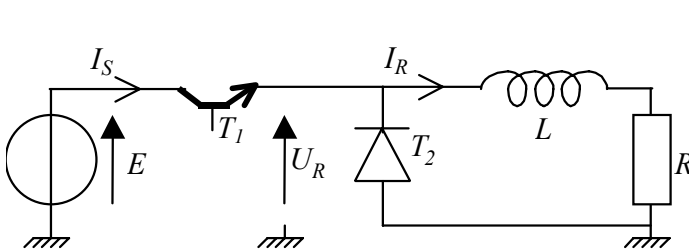


33

Le hacheur série

☒ Si T est passant pendant une durée $\alpha \cdot Tm$ au cours d'une période Tm :

- La tension moyenne aux bornes du récepteur vaut
- Le courant moyen fourni par le générateur vaut



☒ Le hacheur série est un convertisseur qui conserve l'énergie :

☒ Le hacheur série est un hacheur dévolteur

La tension moyenne aux bornes du récepteur est *inférieure* à celle de la source

⇒ Le courant moyen dans le récepteur est *supérieur* à celui de la source

34

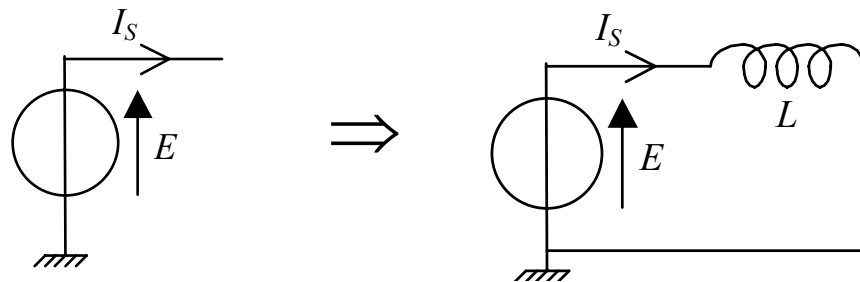
Comment obtenir une tension supérieure à celle de la source ?

- ✉ En « hachant » la tension imposée par la source, on obtient une tension de récepteur inférieure et un courant supérieur à ceux de la source.
- ✉ Et si on hachait le courant imposé par une source, obtiendrait-on un courant inférieur et une tension supérieure (hacheur survolteur) ?

35

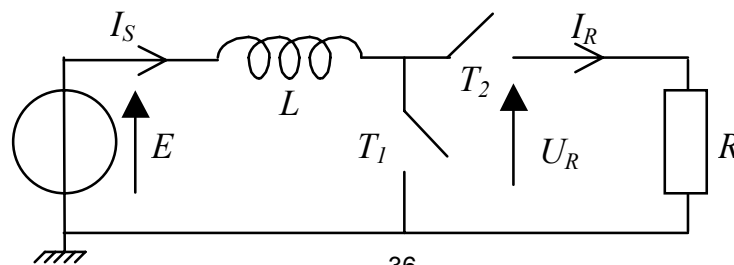
Première étape

- ✉ Transformer la source de tension en source de courant



Deuxième étape

- ✉ Hacher le courant de source :
 - entre 0 et $\alpha \cdot T_m$, envoyer le courant vers le récepteur
 - entre $\alpha \cdot T_m$ et T_m , court-circuiter la source

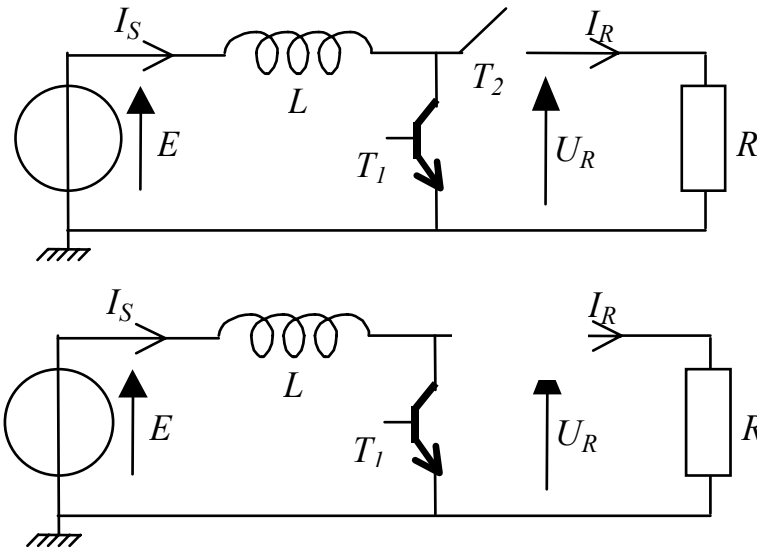


36

Troisième étape

☒ Choisir les interrupteurs :

- T_1 ne peut être une diode (il ne pourrait jamais s'ouvrir)
- T_2 doit se fermer quand T_1 s'ouvre
- T_2 doit s'ouvrir quand T_1 se ferme



37

Troisième étape

☒ Vérification des conditions de commutation :

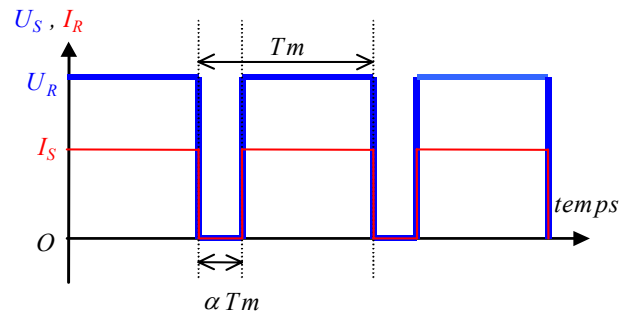
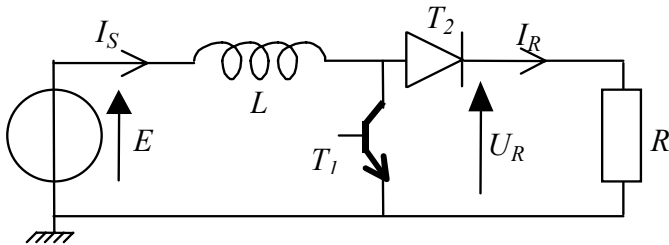
- Quand T_1 s'ouvre, la tension aux bornes de la diode est positive
 - ⇒ elle conduit
 - ⇒ ⇒ $V_D = 0$
- Quand T_1 se ferme, le courant I_S passe entièrement dans T_1 (chemin de moindre résistance) et I_R dans la diode T_2 s'annule

Le hacheur parallèle

☒ Si T est passant pendant une durée $\alpha \cdot T_m$ au cours d'une période T_m :

- Le courant moyen dans le récepteur vaut :

- La tension moyenne aux bornes de la source vaut :



☒ Le hacheur parallèle est un convertisseur qui conserve l'énergie :

☒ Le hacheur série est un [hacheur survolteur](#)

Le courant moyen dans le récepteur est *inférieur* à celui de la source

⇒ La tension moyenne aux bornes du récepteur est *supérieure* à celle de la source

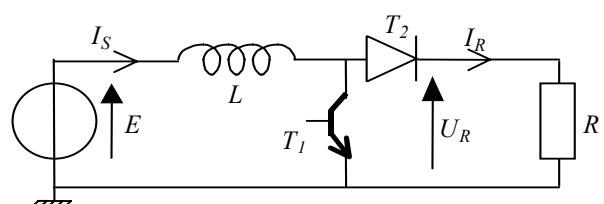
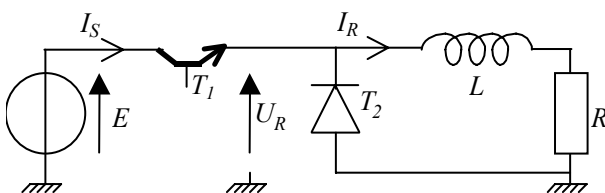
39

Réversibilité en puissance

☒ Les hacheurs série et parallèle sont irréversibles en puissance

☒ L'un peut transmettre une puissance d'une source de tension E vers un récepteur de tension E' ($E' < E$)

☒ L'autre peut transmettre une puissance d'une source de tension E' vers un récepteur de tension E ($E' < E$)

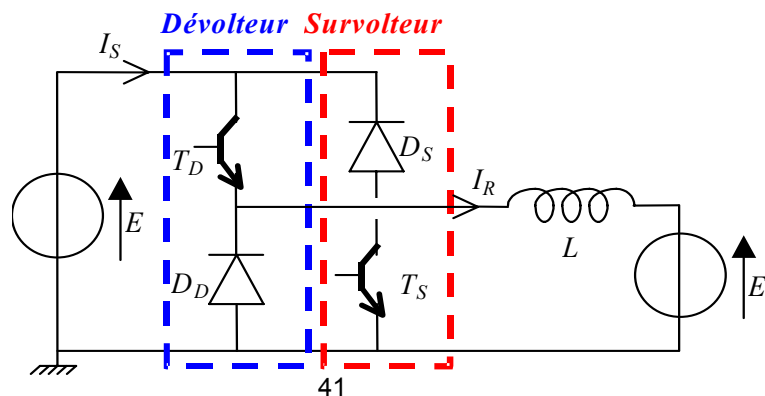


Réversibilité en puissance

☒ Idée : associer un hacheur série et un hacheur parallèle pour obtenir un hacheur réversible en puissance.

☒ Fonctionnement :

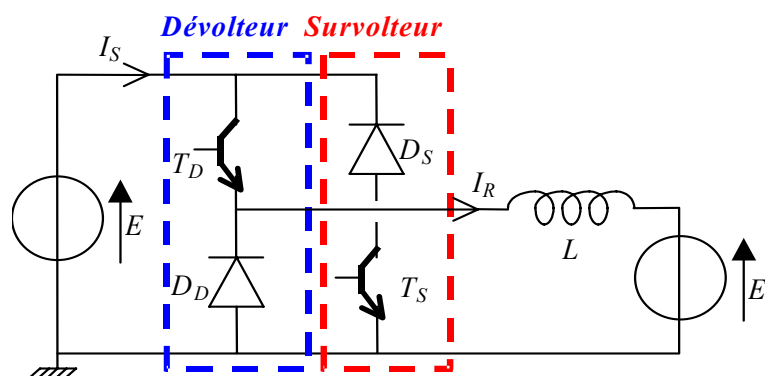
- La tension du récepteur (E') est inférieure à celle de la source (E)
- Quand $I_R > 0$, la puissance va de la source vers le récepteur \Rightarrow seul le hacheur dévolteur fonctionne
- Quand $I_R < 0$, la puissance va du « récepteur » vers la « source » \Rightarrow seul le hacheur survolteur fonctionne



Réversibilité en puissance

☒ Fonctionnement :

- Les tensions aux bornes de la source (E) et récepteur (E') sont toujours positives
 - Seul les courants sans le récepteur (I_R) et dans la source (I_S) peuvent changer de sens
- \Rightarrow On parle donc d'un hacheur réversible en courant

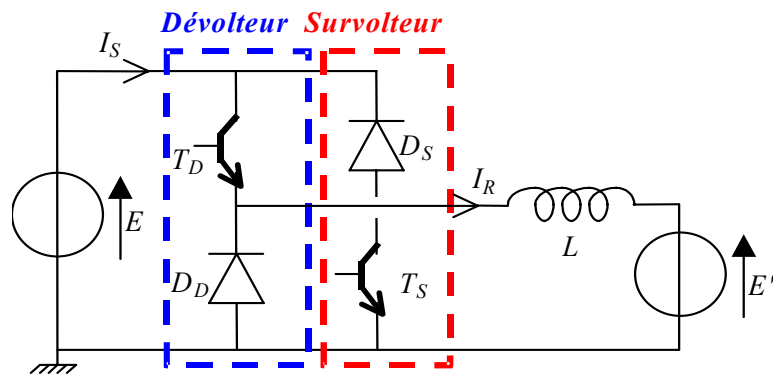


Hacheur réversible en courant

☒ Si $I_R > 0$, on a : $E' = \langle U_R \rangle$

☒ Si $I_R < 0$, on a : $E' = \langle U_S \rangle$

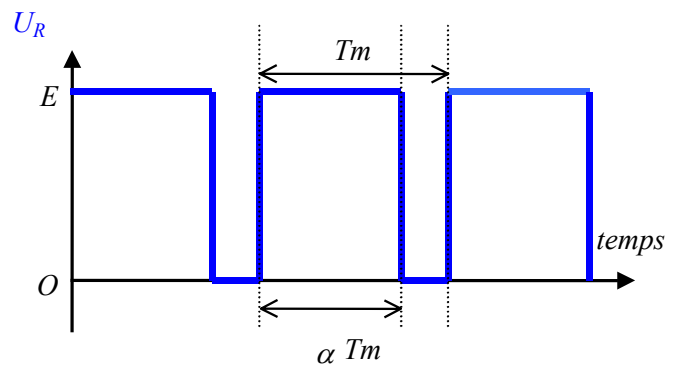
☒ Pour garder la même relation entre E et E' , $\forall I_R$ il faut et il suffit d'avoir : $\alpha_{D\acute{e}v} = 1 - \alpha_{Sur}$



43

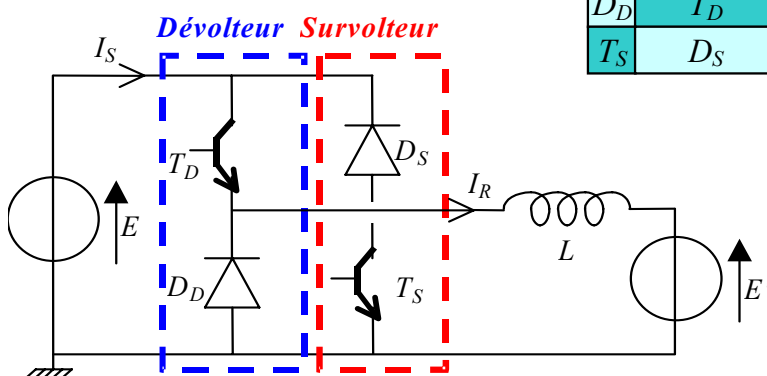
Hacheur réversible en courant

☒ Commande complémentaire:



D_D	T_D	D_D	T_D	D_D	T_D	D_D
T_S	D_S	T_S	D_S	T_S	D_S	T_S

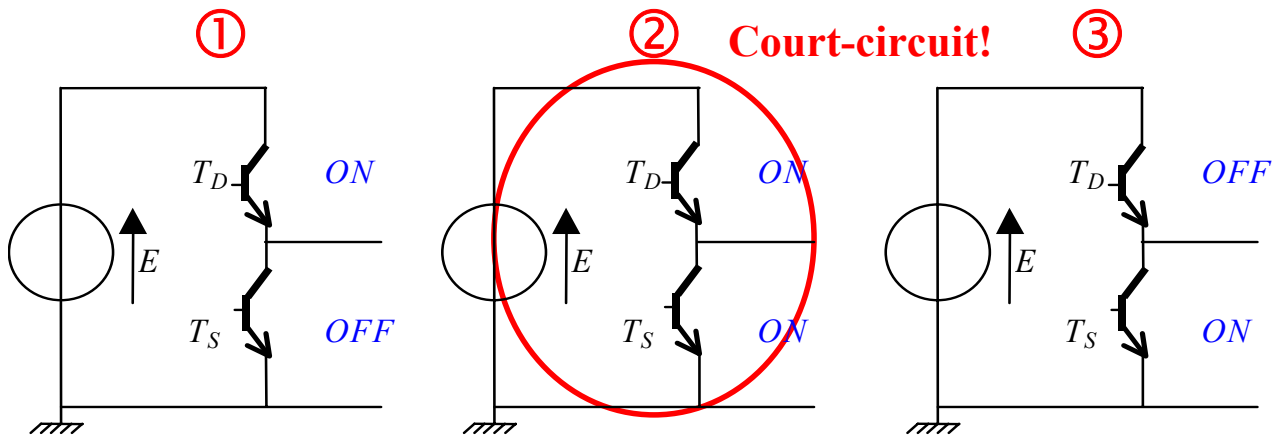
↔ ou



44

Problématique des temps morts

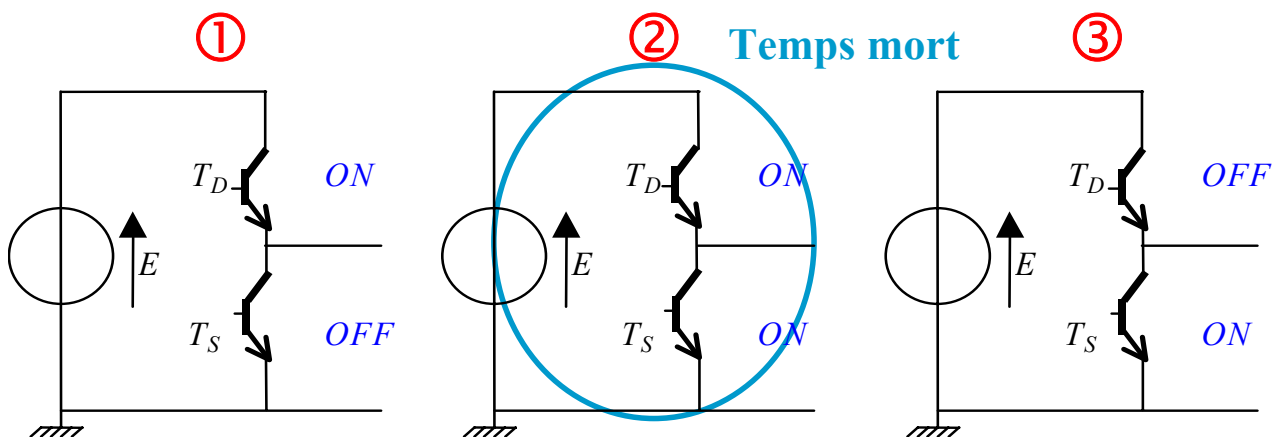
- ☒ Les commutations ne sont jamais instantanées
- ☒ Le temps de mise en conduction est souvent plus court que le temps de blocage
- ☒ Que se passe-t-il en cas de commande complémentaire ?



45

Problématique des temps morts

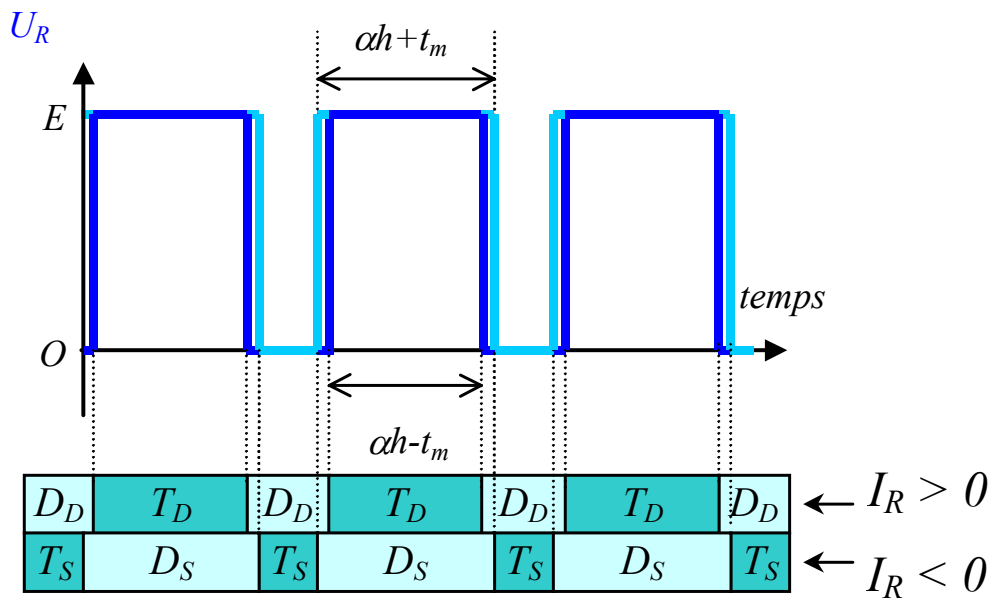
- ☒ Il est donc nécessaire de retarder la mise en conduction des transistors, pour s'assurer que leurs transistors complémentaires aient eu le temps de se bloquer



46

Conséquences

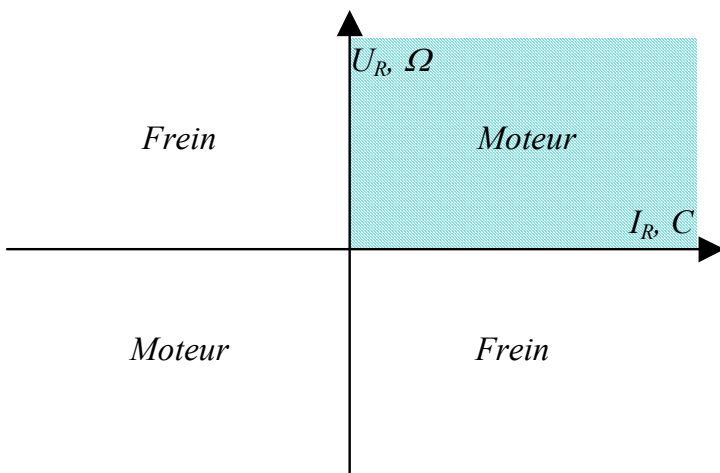
- ⊗ La tension U_R aux bornes du « récepteur » n'est pas rigoureusement la même selon le signe de I_R !



47

Application à l'alimentation de moteurs DC

- ⊗ Alimentation par un convertisseur non réversible
⇒ fonctionnement 1 quadrant



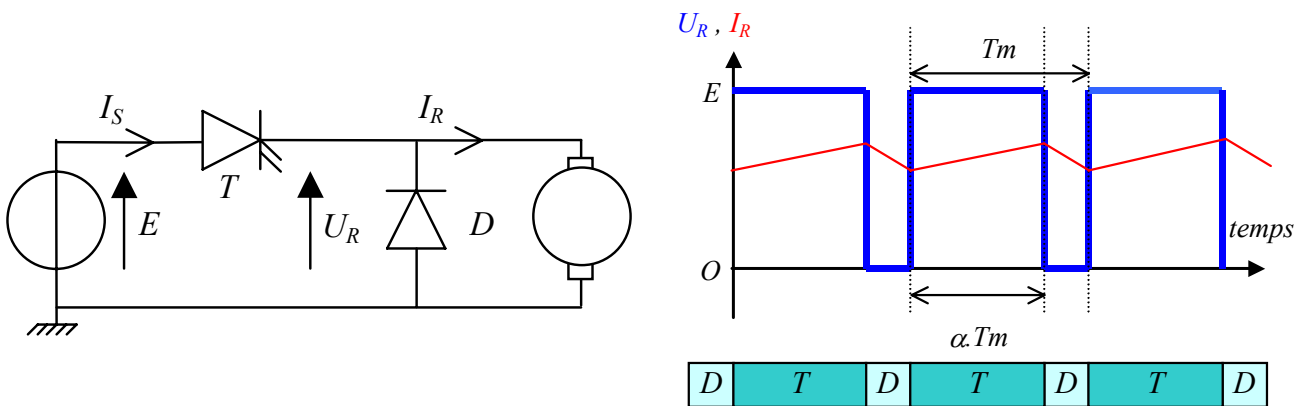
- Fonctionnement dans un seul sens (pas de marche arrière possible).
- Pas de freinage possible (arrêt en roue libre ou par frein extérieur)

48

Application à l'alimentation de moteurs DC

☒ Valeur de la tension aux bornes du moteur

- Si le courant dans le moteur ne s'annule jamais (cas de la conduction continue) : $\langle U_R \rangle = \alpha.E$

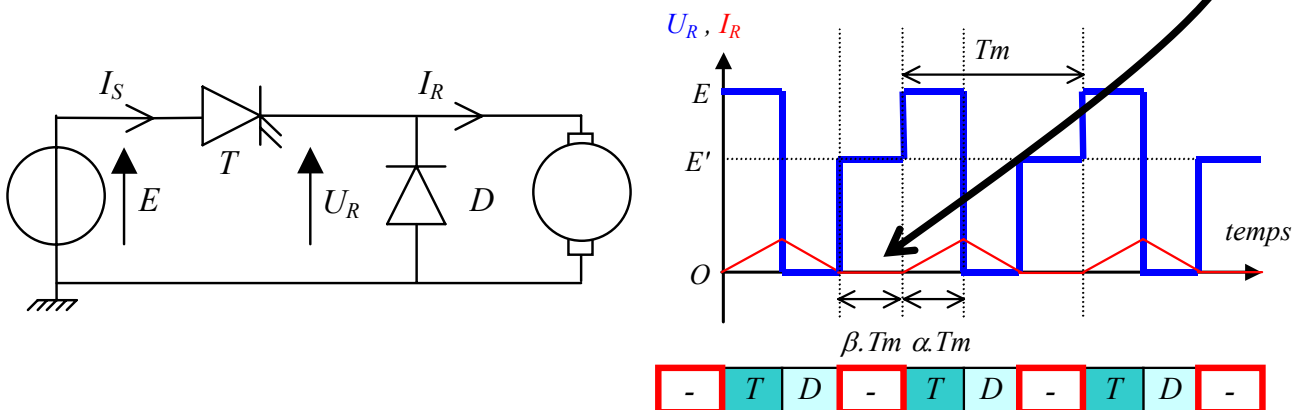


49

Application à l'alimentation de moteurs DC

☒ Valeur de la tension aux bornes du moteur

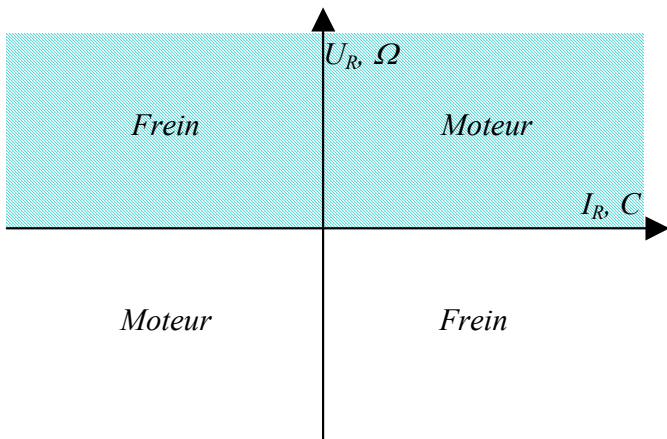
- Si le courant dans le moteur s'annule (cas de la conduction discontinue) :
- ⇒ on ne contrôle plus directement la tension aux bornes de la charge



50

Alimentation par un hacheur réversible en courant

☒ Fonctionnement 2 quadrants (Coupe/courant positif ou négatif)



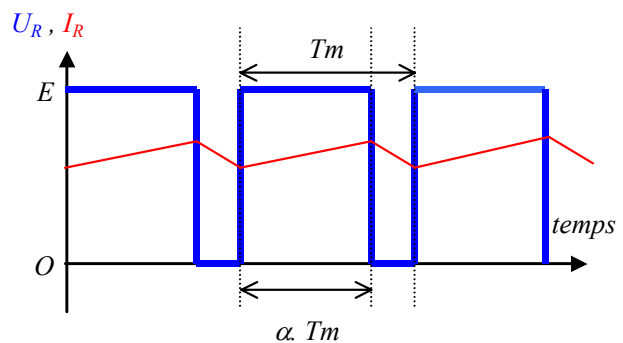
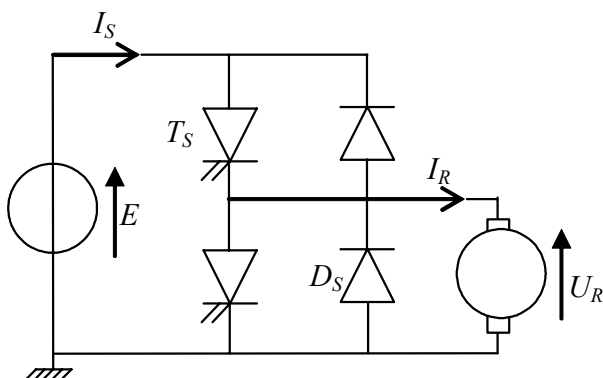
- Fonctionnement dans un seul sens (pas de marche arrière possible).
- Freinage possible (si le générateur est réversible en courant!)
- Pas de problème lié à une conduction discontinue

51

Alimentation par un hacheur réversible en courant

☒ Si commande complémentaire:

$$\langle U_R \rangle = \alpha \cdot E, \quad \forall I_R$$



D ₂	T ₁	D ₂	T ₁	D ₂	T ₁	D ₂	↔ ou
T ₂	D ₁	T ₂	D ₁	T ₂	D ₁	T ₂	

52

Alimentation par un hacheur réversible en courant

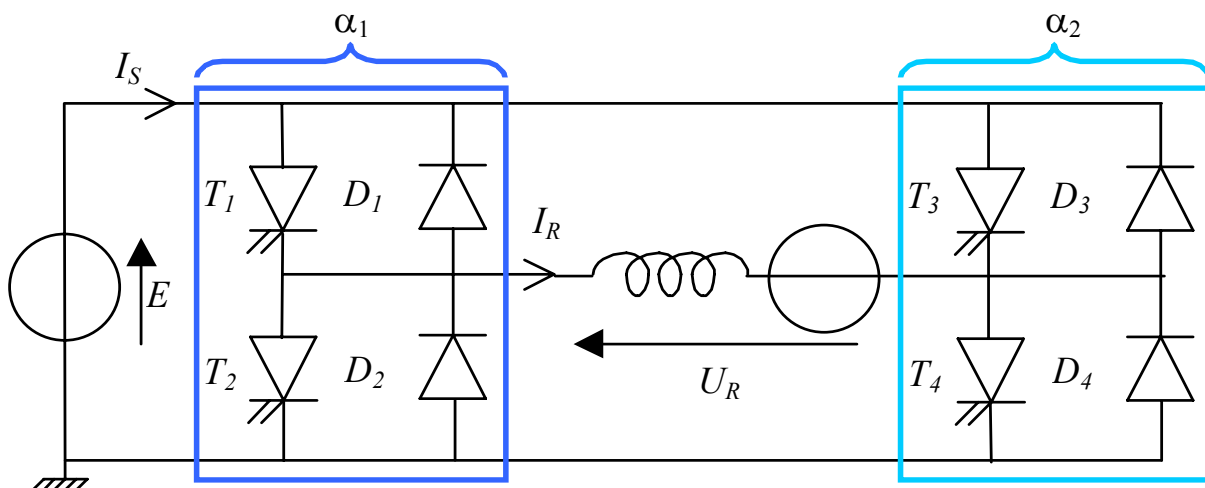
- ☒ Nécessité de maintenir un taux d'ondulation du courant raisonnable
- ☒ Nécessité de continuer à filtrer la tension d'alimentation
- ☒ Si le générateur de tension n'est pas réversible, prévoir un système de dissipation

53

Hacheur réversible en courant et en tension

- ☒ Idée : deux hacheurs réversibles en courant
- ☒ Valeur de la tension aux bornes de la charge

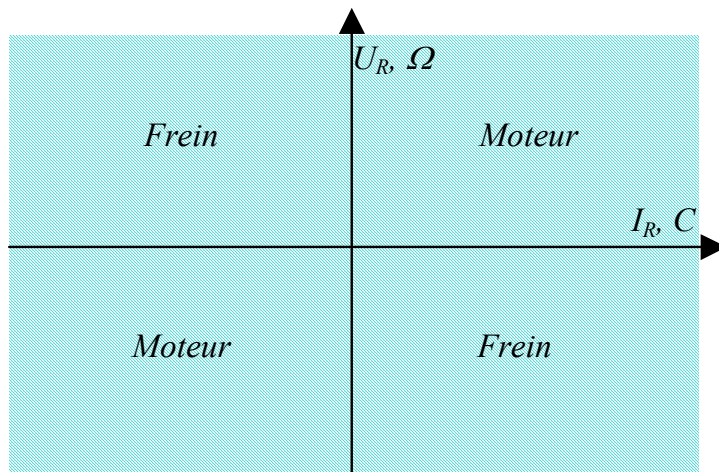
$$\langle U_R \rangle = \alpha_1 \cdot E - \alpha_2 \cdot E$$



54

Alimentation par un hacheur réversible en courant et en tension

☒ Fonctionnement 4 quadrants



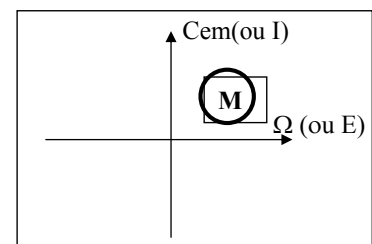
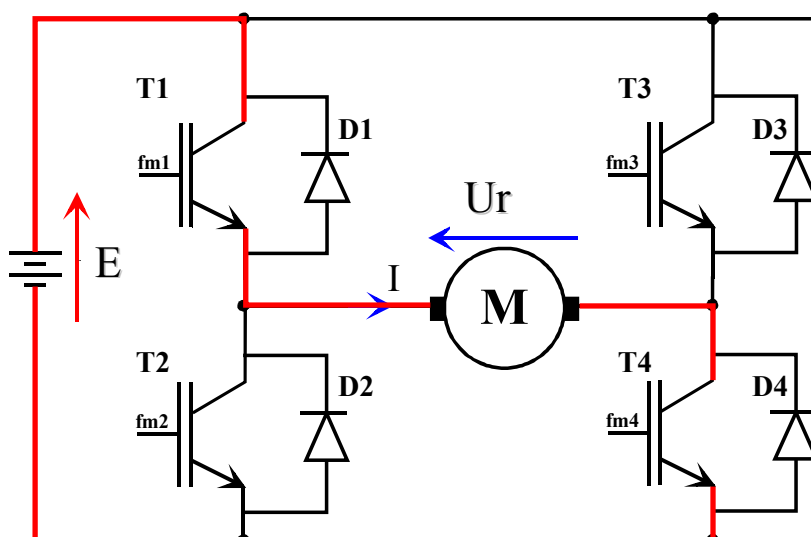
- Fonctionnement dans les deux sens (marche avant / marche arrière).
- Freinage possible (si le générateur est réversible en courant!)
- Pas de problème lié à une conduction discontinue

55

Cas d'une alimentation trois niveaux

☒ Il est possible d'utiliser le hacheur réversible en courant et en tension de façon à lui faire délivrer aux bornes de la charge:

- soit une tension +E



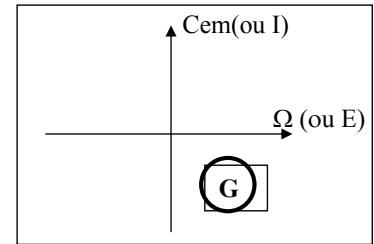
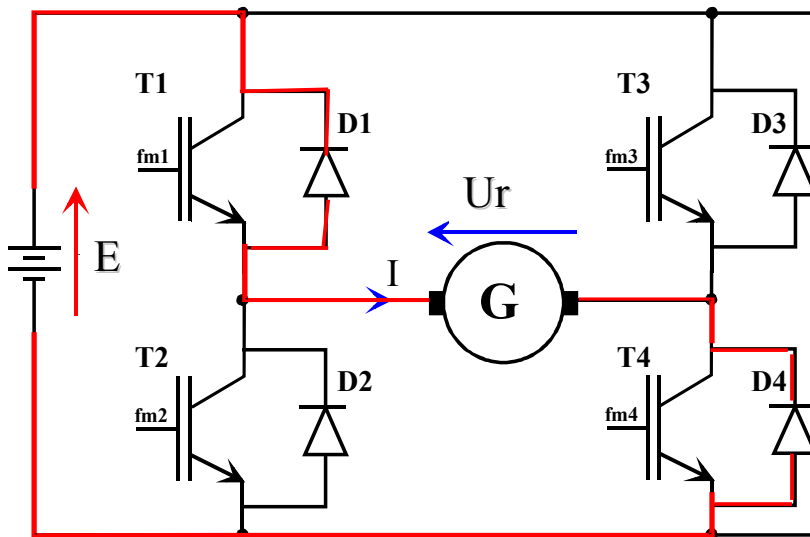
- T1, T4 fermés
- T2, T3 ouverts
- D1, D4 ouvertes
- D2, D3 ouvertes

56

Cas d'une alimentation trois niveaux

☒ Il est possible d'utiliser le hacheur réversible en courant et en tension de façon à lui faire délivrer aux bornes de la charge:

- soit une tension $+E$



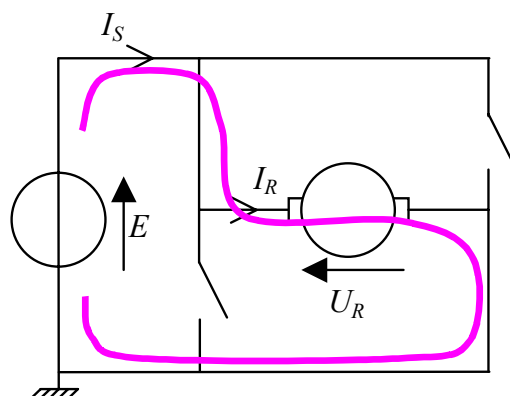
T1, T4 fermés
T2, T3 ouverts
D1, D4 ouvertes
D2, D3 ouvertes

57

Cas d'une alimentation trois niveaux

☒ Il est possible d'utiliser le hacheur réversible en courant et en tension de façon à lui faire délivrer aux bornes de la charge:

- soit une tension $+E$



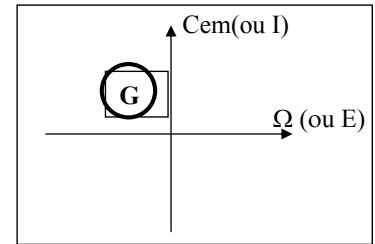
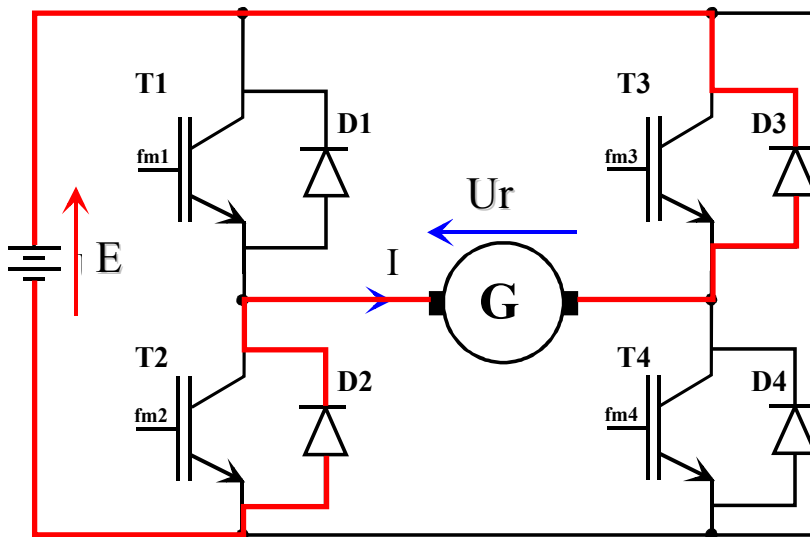
Quelque soit le sens de I_s

58

Cas d'une alimentation trois niveaux

☒ Il est possible d'utiliser le hacheur réversible en courant et en tension de façon à lui faire délivrer aux bornes de la charge:

- soit une tension $+E$
- soit une tension $-E$



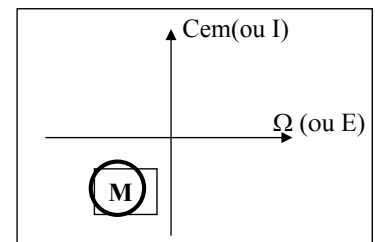
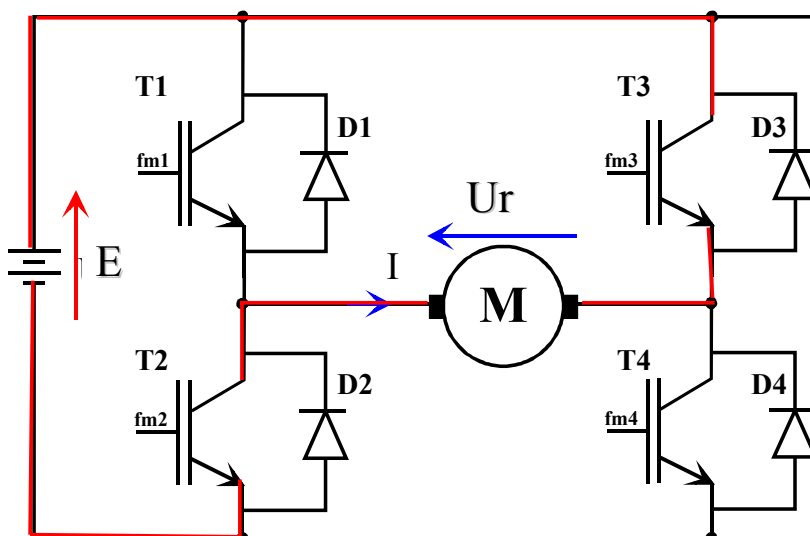
T1, T4 ouverts
T2, T3 ouverts
D1, D4 ouvertes
D2, D3 fermées

59

Cas d'une alimentation trois niveaux

☒ Il est possible d'utiliser le hacheur réversible en courant et en tension de façon à lui faire délivrer aux bornes de la charge:

- soit une tension $+E$
- soit une tension $-E$



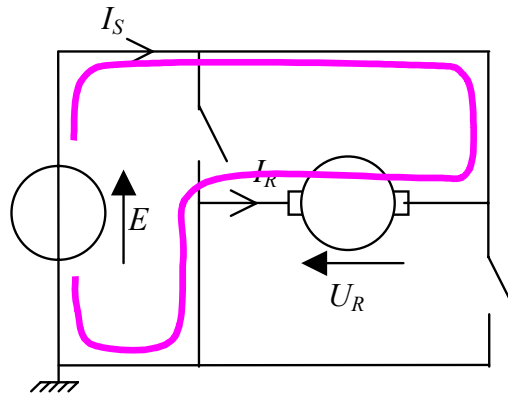
T1, T4 ouverts
T2, T3 ouverts
D1, D4 ouvertes
D2, D3 fermées

60

Cas d'une alimentation trois niveaux

☒ Il est possible d'utiliser le hacheur réversible en courant et en tension de façon à lui faire délivrer aux bornes de la charge:

- soit une tension $+E$
- soit une tension $-E$



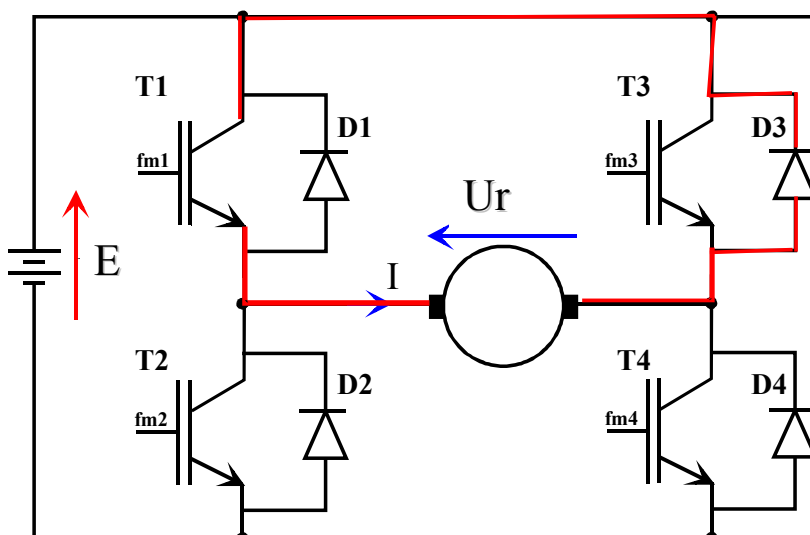
Quelque soit le sens de I_S

61

Cas d'une alimentation trois niveaux

☒ Il est possible d'utiliser le hacheur réversible en courant et en tension de façon à lui faire délivrer aux bornes de la charge:

- soit une tension $+E$
- soit une tension $-E$
- soit une tension nulle



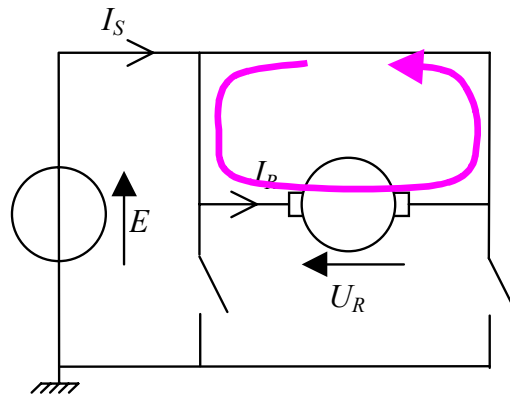
T1, T4 fermés
T2, T3 ouverts
D1, D4 ouvertes
D2, D3 ouvertes

62

Cas d'une alimentation trois niveaux

☒ Il est possible d'utiliser le hacheur réversible en courant et en tension de façon à lui faire délivrer aux bornes de la charge:

- soit une tension $+E$
- soit une tension $-E$
- soit une tension nulle

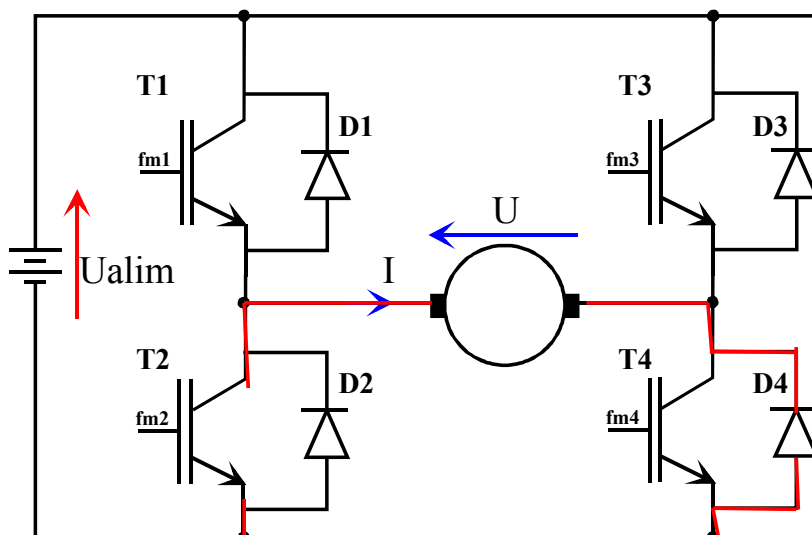


63

Cas d'une alimentation trois niveaux

☒ Il est possible d'utiliser le hacheur réversible en courant et en tension de façon à lui faire délivrer aux bornes de la charge:

- soit une tension $+E$
- soit une tension $-E$
- soit une tension nulle



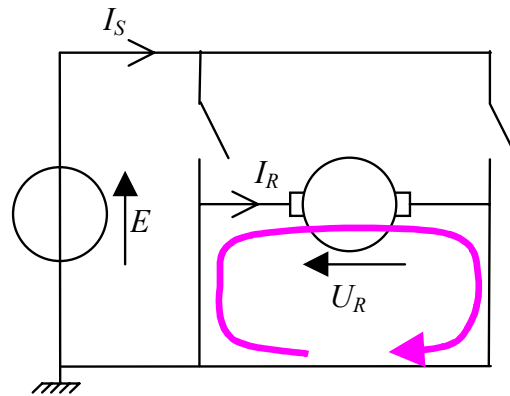
T1, T4 ouverts
T2, T3 fermés
D1, D4 ouvertes
D2, D3 ouvertes

64

Cas d'une alimentation trois niveaux

☒ Il est possible d'utiliser le hacheur réversible en courant et en tension de façon à lui faire délivrer aux bornes de la charge:

- soit une tension $+E$
- soit une tension $-E$
- soit une tension nulle

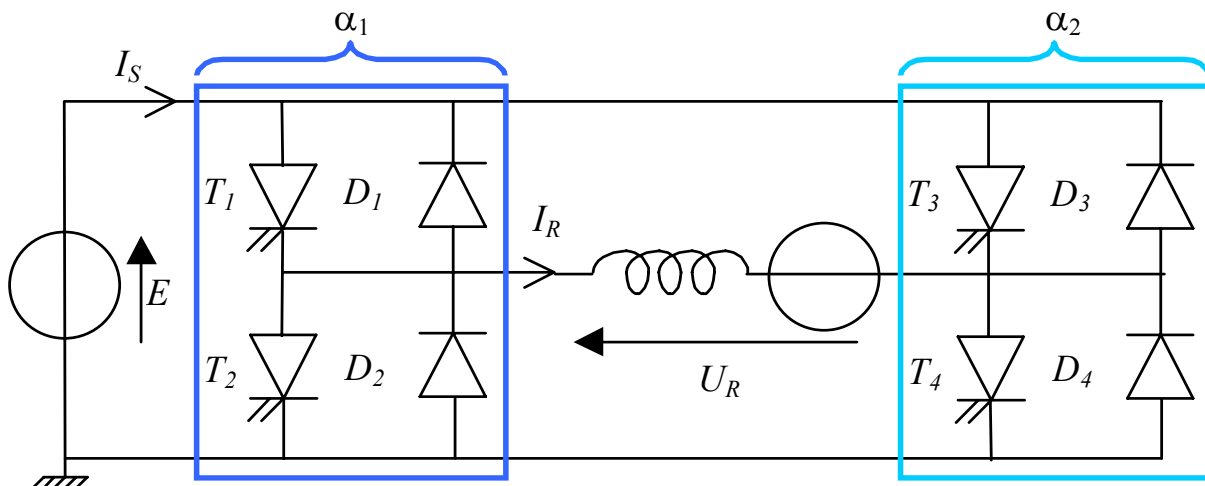


65

Cas d'une alimentation trois niveaux

$U_R \in \{-E, 0, +E\}$ est une tension de signe alternatif !

I_R est de signe alternatif !

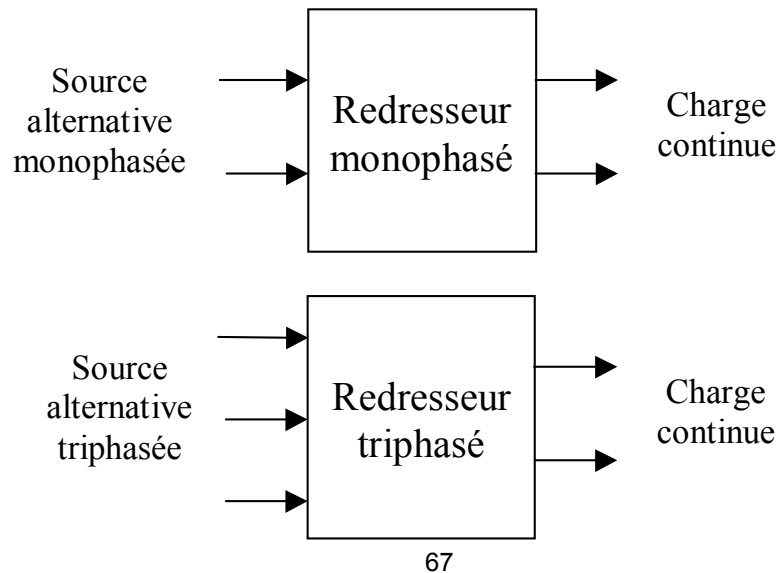


66

Les fonctions de l'électronique de puissance

☒ Redresseur (rectifier)

= conversion de puissance d'une source alternative vers une charge continue

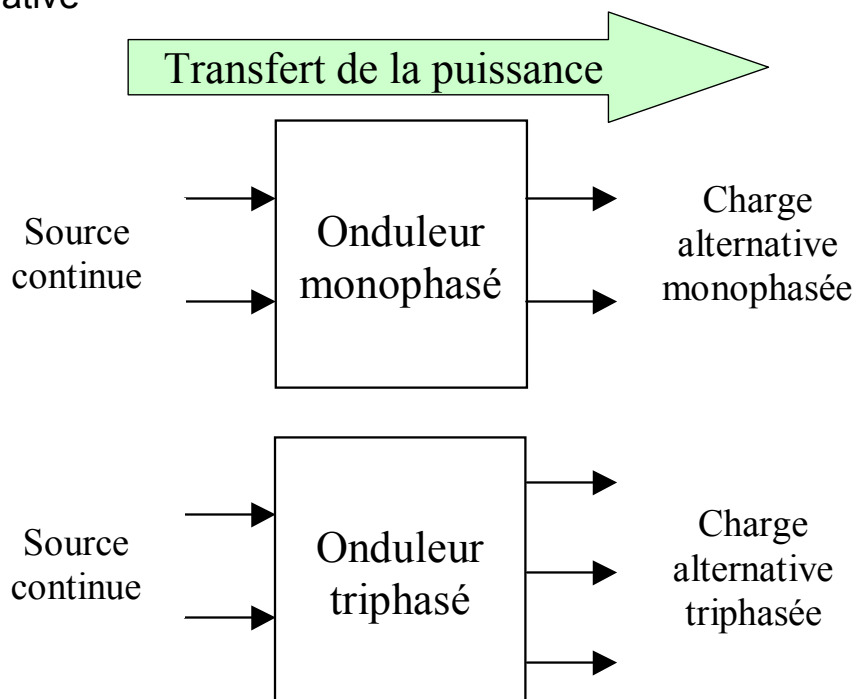


67

Les fonctions de l'électronique de puissance

☒ Onduleur (inverter)

= conversion de puissance d'une source continue vers une charge alternative

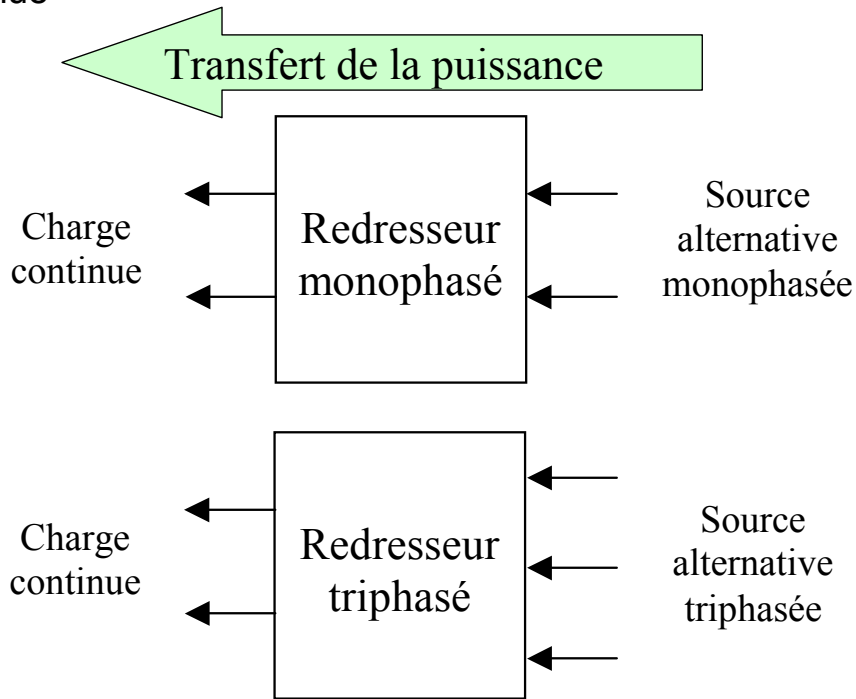


68

Les fonctions de l'électronique de puissance

☒ Redresseur (rectifier)

= conversion de puissance d'une source alternative vers une charge continue

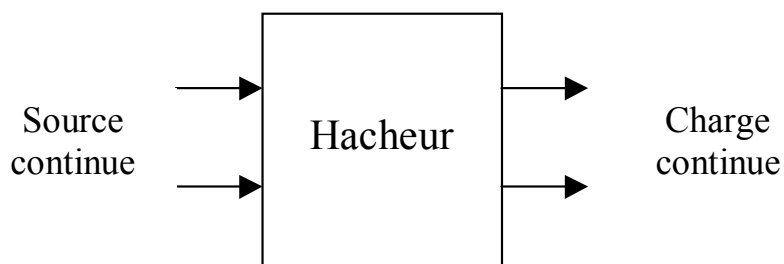


69

Les fonctions de l'électronique de puissance

☒ Hacheur (chopper)

= conversion de puissance d'une source continue vers une charge continue



70

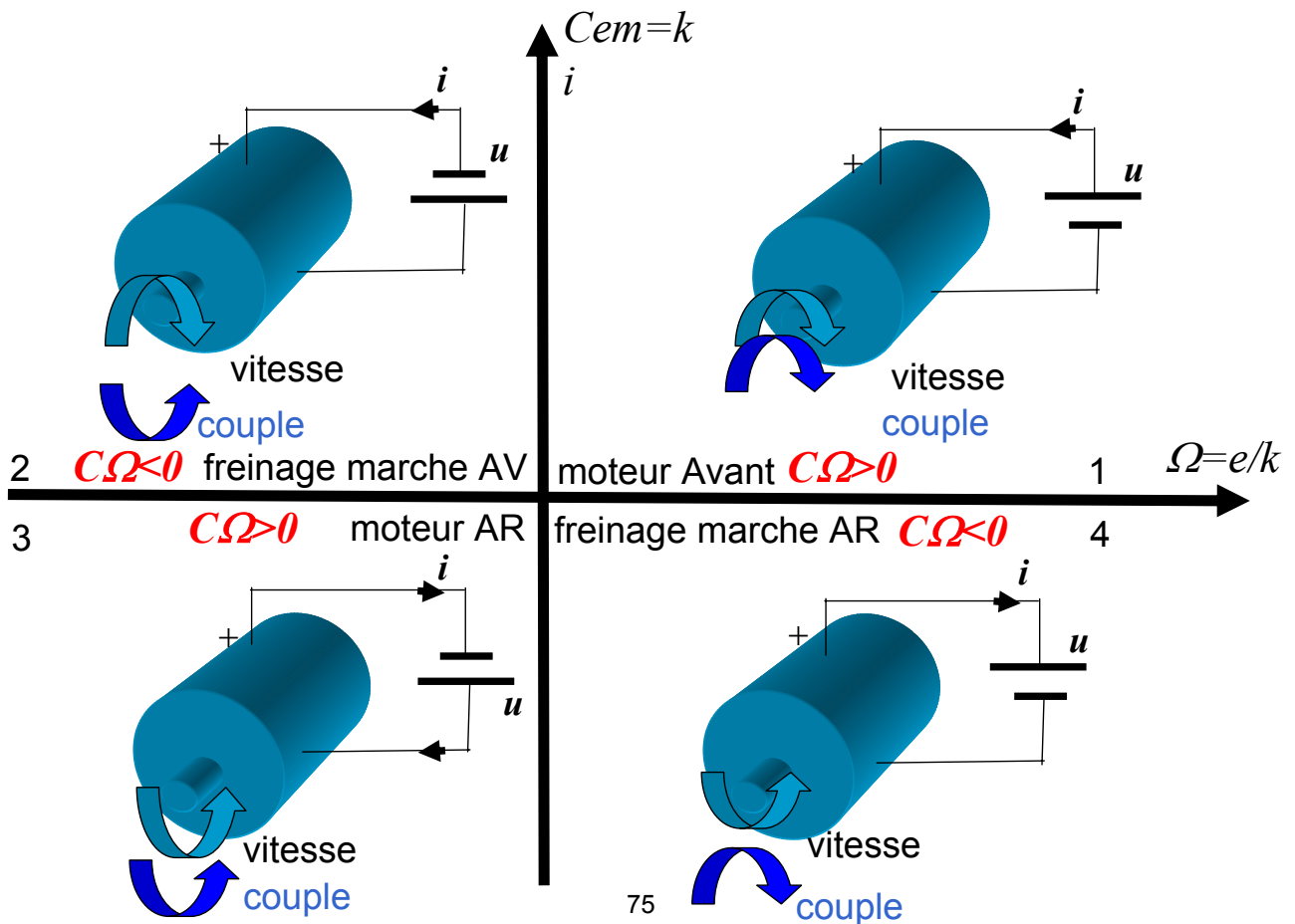
Les fonctions de l'électronique de puissance

✉ Remarque :

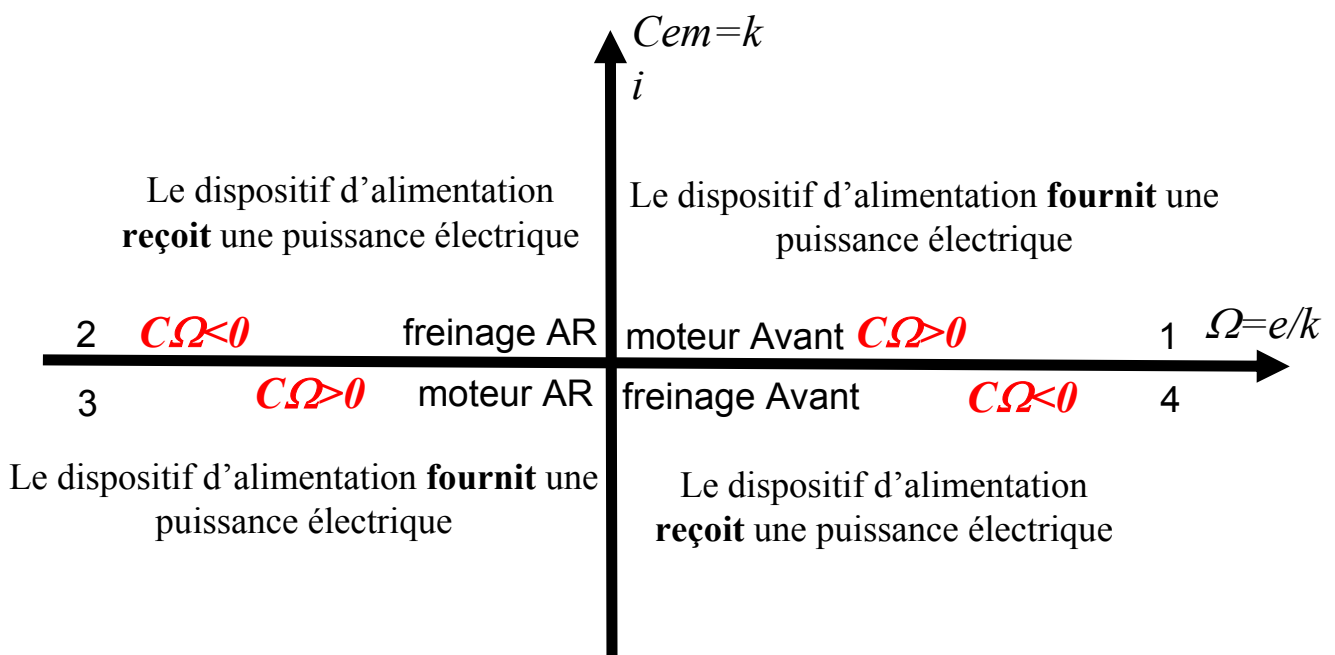
Les définitions précédentes ne caractérisent pas un circuit électronique de puissance mais un mode de fonctionnement (un onduleur réversible peut fonctionner en redresseur)

✉ Cependant, certains circuits conçus historiquement pour accomplir telle ou telle fonction ont souvent pris le nom de cette fonction

Les quadrants de fonctionnement



Les quadrants de fonctionnement



Pour passer des quadrants $Q1 \leftrightarrow Q4$ ou $Q2 \leftrightarrow Q3$, le dispositif d'alimentation devra être **réversible en courant**.

Pour passer des quadrants $Q1 \leftrightarrow Q2$ ou $Q3 \leftrightarrow Q4$, le dispositif d'alimentation devra être **réversible en tension**.