

Chapitre 17

Conversion de signaux – Modulation de l'énergie Perturbation et compatibilité électromagnétique

INTRODUCTION	3
1. LES FONCTIONS DE CONVERSION	4
1.1. La commutation	4
1.2. La temporisation	15
1.3. L'amplification	18
1.4. La comparaison	22
1.5. Le suiveur	24
1.6. L'additionneur – Le soustracteur	25
1.7. Le dérivateur – L'intégrateur	27
1.8. Exercices à résoudre	28
2. LES MODULATEURS D'ENERGIE	30
2.1. Le gradateur	31
2.2. Le redresseur non commandé	34
2.3. Le redresseur commandé	39
2.4. L'onduleur assisté	42
2.5. L'onduleur autonome	44
2.6. Le hacheur	46
2.7. Exercices à résoudre	50
3. LES PERTURBATIONS DES RESEAUX	52
3.1. Définitions	52
3.2. Effets des harmoniques	53
3.3. Perturbations sur le réseau triphasé	54

4. LA COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE	55
4.1. Définitions	55
4.2. Nature des perturbations	56
4.3. Origine des perturbations	56
4.4. Transmission des perturbations	57
4.5. Effets des perturbations	58
5. CORRECTION DES EXERCICES	61
5.1. Correction des exercices paragraphe 1.8	61
5.2. Correction des exercices paragraphe 2.7	63

Travail personnel



INTRODUCTION

La mise au point de semi-conducteurs de puissance a permis le développement considérable de l'électronique de puissance qui se situe à la frontière entre les domaines de l'électrotechnique (les courants forts) et l'électronique (les courants faibles).

De nos jours l'électronique de puissance assure toutes les fonctions de conversion d'énergie et permet facilement la modulation de l'énergie.

Dans ce chapitre nous allons étudier les fonctions de conversion des signaux en vue de modifier les caractéristiques électriques d'un signal :

- La fonction **commutation** c'est à dire l'autorisation ou l'interdiction de passage d'un courant
- La fonction **temporisation** c'est à dire la création d'un retard dans le traitement d'un signal
- La fonction **amplification** c'est à dire l'augmentation de la puissance pour traitement d'un signal
- La fonction **comparaison** c'est à dire la confrontation de deux grandeurs électriques
- La fonction **suiveur** c'est à dire l'adaptation d'un signal aux contraintes du circuit
- La fonction **additionneur** c'est à dire l'addition de deux grandeurs électriques
- La fonction **soustracteur** c'est à dire la soustraction de deux grandeurs électriques
- La fonction **dérivateur** c'est à dire l'amélioration du temps de réponse d'un signal
- La fonction **intégrateur** c'est à dire la diminution du temps de réponse d'un signal

Ensuite nous allons étudier les modulateurs d'énergie permettant de gérer l'énergie nécessaire pour la commande des systèmes électriques :

- Le **gradateur** qui transforme l'énergie alternative fixe en énergie alternative variable
- Le **redresseur non commandé** qui transforme l'énergie alternative fixe en énergie continue fixe
- Le **redresseur commandé** qui transforme l'énergie alternative fixe en énergie continue variable
- L'**onduleur assisté** qui transforme l'énergie continue en énergie alternative fixe
- L'**onduleur autonome** qui transforme l'énergie continue en énergie alternative variable
- Le **hacheur** qui transforme l'énergie continue en énergie continue variable

Nous verrons enfin que l'utilisation de plus en plus fréquente de ces modulateurs est une source importante de **perturbations sur les réseaux** électriques et qu'il est donc nécessaire de prendre quelques précautions.

La réglementation mise en place tend à limiter le niveau de ces perturbations et fait l'objet d'une norme : **la compatibilité électromagnétique**.

1. LES FONCTIONS DE CONVERSION

1.1. La commutation

La **commutation** est l'ouverture et/ou la fermeture d'un circuit. Elle autorise ou interdit le passage du courant électrique dans les deux sens **bidirectionnel** ou seulement dans un seul sens **unidirectionnel**. La solution technologique est assurée par des composants électroniques de puissance qui jouent le rôle d'**interrupteurs statiques** (pas d'usure mécanique).

Ce sont des composants à semi-conducteurs **commandables** ou **non-commandables**.

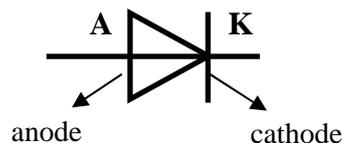
Nous distinguerons quatre composants qui sont :

- la diode
- le thyristor
- le transistor
- le triac

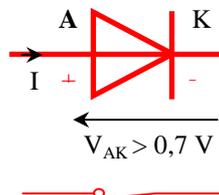
1.1.1. La diode

En électronique de puissance, on ne prendra en compte que la diode à jonction utilisée comme diode de redressement.

Symbole



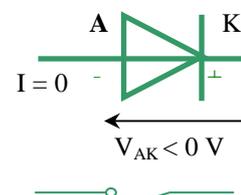
La diode utilisée en sens direct & la diode utilisée en sens inverse



Sens direct : la diode passante provoque une petite chute de tension V_F elle se comporte presque comme un interrupteur fermé

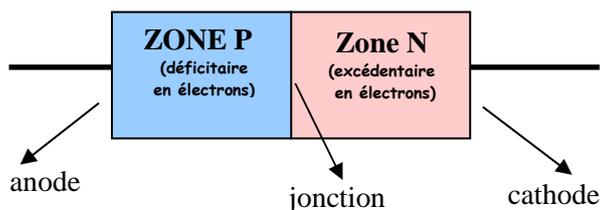
en sens direct l'indice est F pour forward en sens inverse l'indice est R pour Reverse

La diode est un **composant unidirectionnel**



Sens inverse : la diode bloquée peut être assimilée à un interrupteur ouvert

Constitution d'une diode à jonction



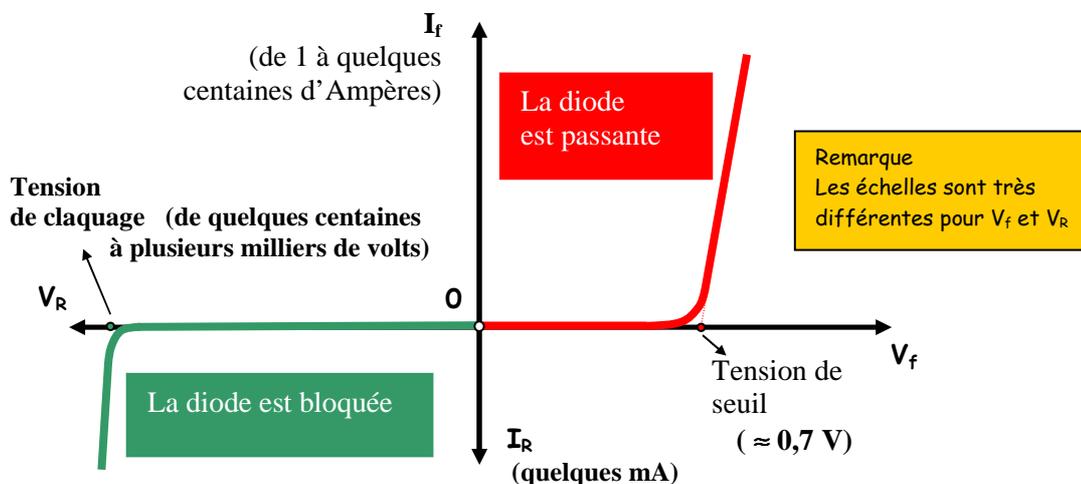
On « dope » la zone P avec des atomes trivalents (Bore, Alu) qui sont receveurs ou déficitaires (ils leur manquent un électron sur la couche périphérique).

Dans la zone N, on utilise des atomes pentavalents (phosphore,arsenic) qui sont donneurs ou excédentaires (un électron supplémentaire à la périphérie).

Le courant passera de P vers N, mais pas en sens inverse.

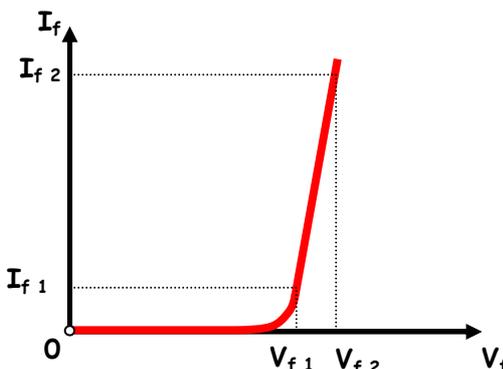
Caractéristiques d'une diode :

En direct : $I_f = f(V_f)$ & en inverse : $I_R = f(V_R)$



En sens direct, la pente de la partie verticale est due à la « résistance dynamique » de la diode :

$$R_d = \frac{V_{f2} - V_{f1}}{I_{f2} - I_{f1}} = \frac{V_{f2} - V_{fseuil}}{I_{f2}}$$



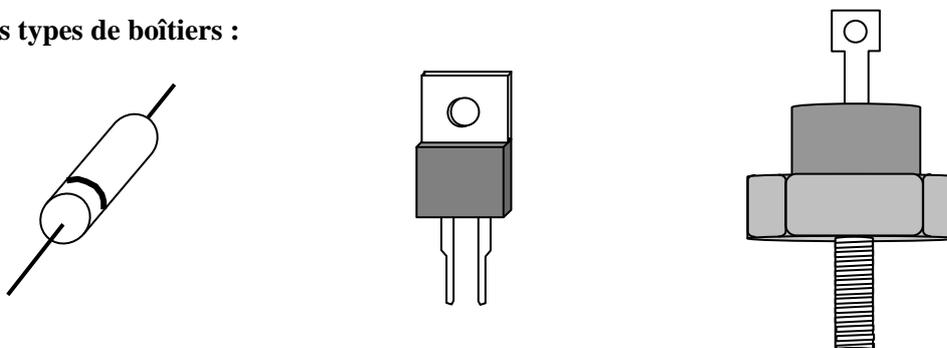
Les grandeurs fondamentales

Les trois critères principaux de choix d'une diode sont :

- I_0 le courant direct moyen
- V_{RRM} la tension inverse de crête répétitive
- Le type de boîtier

Celui-ci peut-être en verre, en matière plastique ou métallique. Dans ce cas, si l'on ne précise pas, la cathode est reliée au boîtier. Si l'anode est au boîtier, la référence est suivie du suffixe (R).

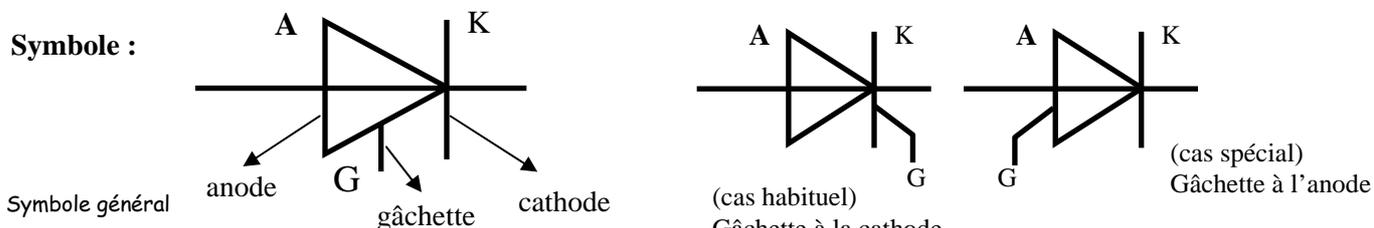
Quelques types de boîtiers :



1.1.2. Le thyristor

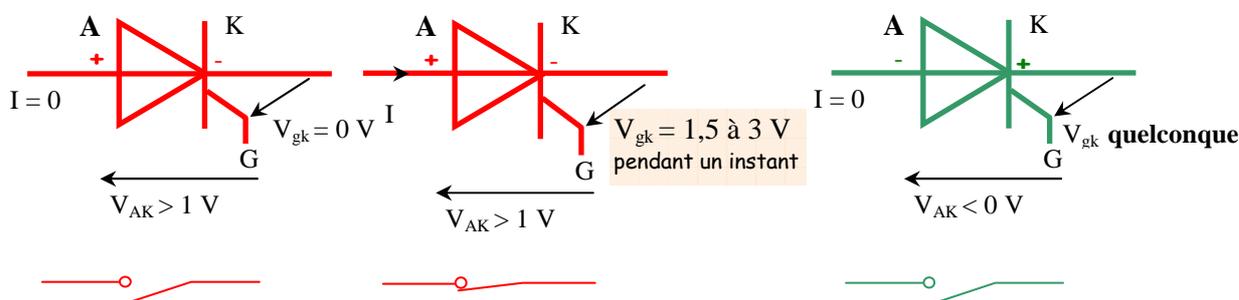
Le thyristor est une diode à jonction à amorçage commandée par une gâchette.

Symbole :



Le thyristor

utilisé en sens direct & le thyristor utilisé en sens inverse



Sens direct : le thyristor reste bloqué jusqu'à ce qu'une petite tension V_{GK} soit appliquée à la gâchette, alors il se comporte comme une diode

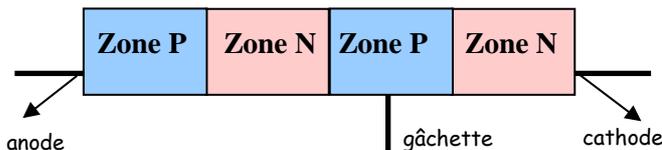
Sens inverse : le thyristor est bloqué il est assimilé à un interrupteur ouvert

Le thyristor est, lui aussi, un **composant unidirectionnel**

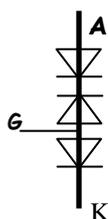
THYRISTOR PASSANT : 2 conditions
 $V_{AK} > 1 \text{ V}$ et bref courant de gâchette I_g

BLOPAGE D'UN THYRISTOR : 2 conditions
 $V_{AK} < 0 \text{ V}$ OU $I_{AK} = 0 \text{ A}$ (extinction de I)

Constitution d'une thyristor PNPN

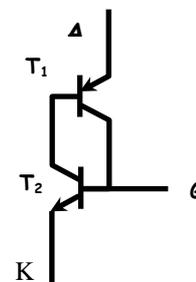


Représentations équivalentes



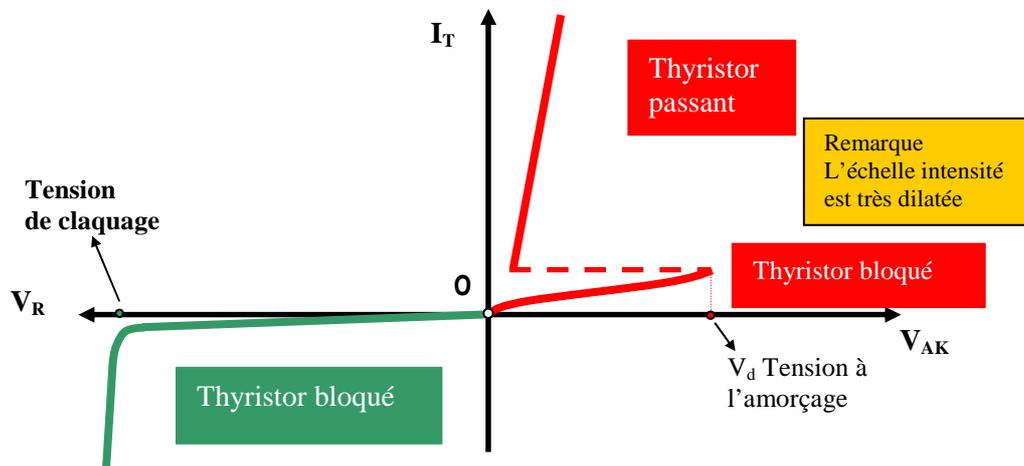
Avec trois diodes

- 1) La gâchette n'est pas alimentée T_2 est bloqué donc la base de T_1 n'est pas reliée au - (K) : T_1 est bloqué aussi.
- 2) On envoie une impulsion + sur G, T_2 est passant La base de T_1 est reliée par T_2 à la cathode (-) T_1 devient passant, donc son collecteur envoie du + sur la gâchette, même quand celle-ci n'est plus alimentée. T_1 et T_2 restent passants



Avec deux transistors bipolaires PNP et NPN

Caractéristique du thyristor : $I_T = f(V_{AK})$ pour un courant de gâchette I_g donné

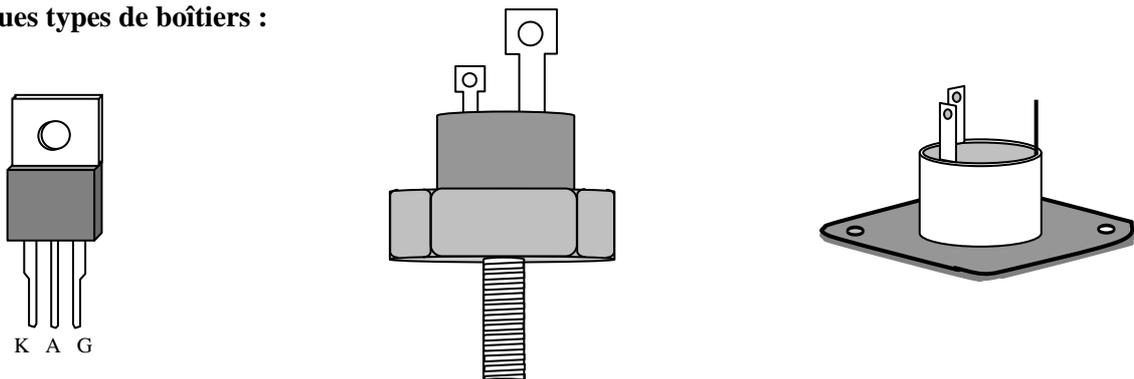


Les grandeurs fondamentales

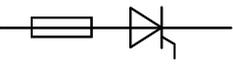
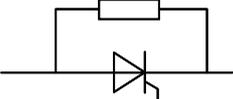
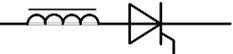
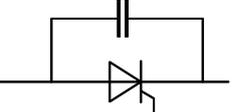
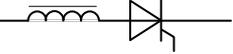
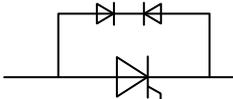
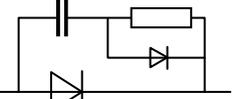
Les critères principaux de choix d'un thyristor sont :

- I_0 le courant direct moyen à l'état passant
- $I_{T(RMS)}$ le courant efficace à l'état passant
- V_{RRM} la tension inverse de crête répétitive
- V_{DRM} la tension directe de crête répétitive à l'état bloqué
- Les temps d'amorçage et de désamorçage

Quelques types de boîtiers :



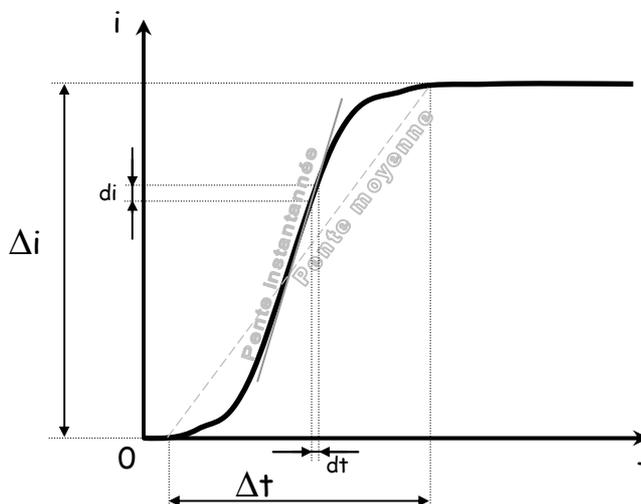
Remarques particulières d'utilisation :**Protection d'un thyristor**

contre les Surintensités	contre les Surtensions	contre les amorçages trop rapides di / dt	contre les blocages trop rapides dv / dt
 Fusible rapide	 Demi conducteur GEMOV	 Inductance en série	 Condensateur
 Inductance en série	 Thyrector		 Condensateur + résistor

di/dt représente la « pente instantanée » de la montée en courant et $\Delta i / \Delta t$ la pente moyenne.

La pente instantanée ne doit pas être trop raide.

Pour la tension, c'est la même chose pour dv / dt .

**Amorçage d'un thyristor**

Deux problèmes : la synchronisation en cas d'amorçage à fréquence constante.

l'isolement du circuit gâchette / circuit principal

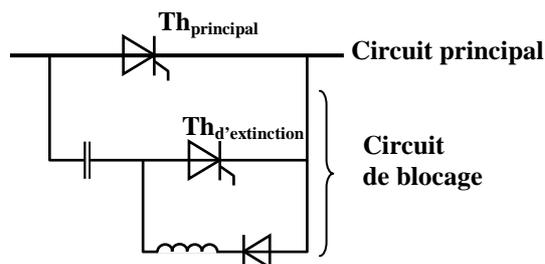
Pour l'isolement on utilise dans le circuit de commande un transformateur d'isolement ou un transformateur d'impulsions.

La tension V_{gt} de gâchette se situe entre 1,5 et 3 V environ selon les thyristors.

Blocage d'un thyristor

Seuls les thyristors GTO (gate turn off) peuvent être bloqués par une impulsion négative sur la gâchette alors qu'ils sont passants.

Pour les autres, le blocage se fait par suppression du courant dans le circuit principal (extinction naturelle), ou par mise sous tension inverse (extinction forcée) à l'aide d'un circuit de blocage.

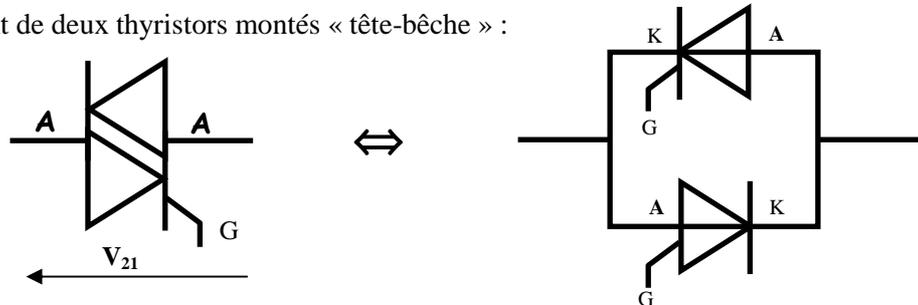


1.1.3. Le triac

Triac est l'abréviation de *TRI*ode *AL*ternative *C*urrent.

C'est l'équivalent de deux thyristors montés « tête-bêche » :

Symbole :

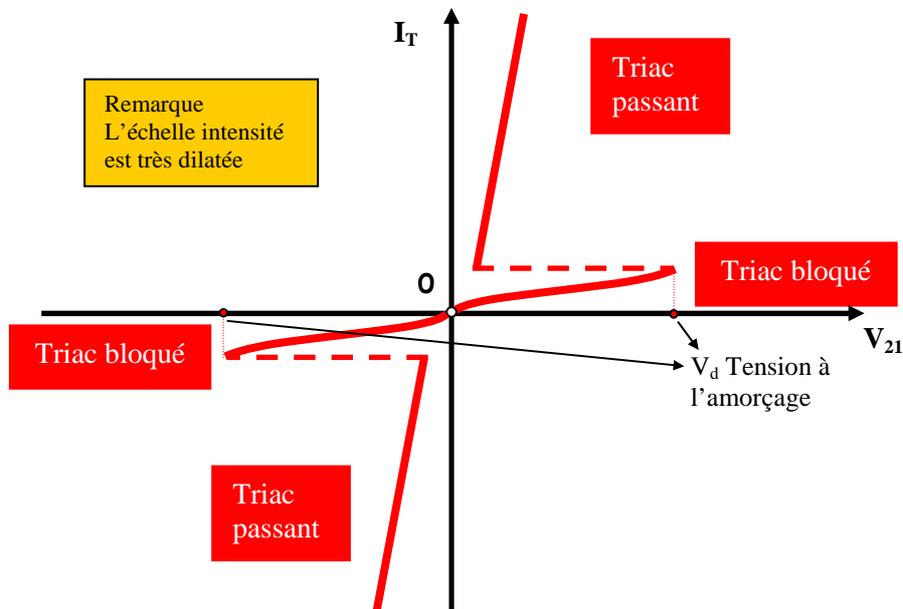


Le triac utilisé en sens direct & le triac utilisé en sens inverse - Amorçage d'un triac

Quelque soit la tension aux bornes du triac, il y a toujours un de ses thyristors dans « le bon sens » pour conduire. L'amorçage ne dépend donc que du courant de gâchette.

Conditions d'amorçage favorables	$V_{21} > 0$	$V_{21} < 0$
	$I_{gt} > 0$	$I_{gt} < 0$

Caractéristique du triac $I_T = f(V_{21})$ pour un courant de gâchette I_g donné



Les grandeurs fondamentales

Les deux critères principaux de choix d'un triac sont :

- $I_{T(RMS)}$ le courant efficace à l'état passant
- V_{RRM} la tension inverse de crête répétitive

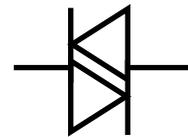
Remarques particulières d'utilisation :**Amorçage d'un triac**

Il peut se faire principalement de trois manières :

- à l'aide d'un DIAC
- avec un transformateurs d'impulsions
- par circuit intégré spécialisé

Qu'est-ce qu'un DIAC ?

Représenté comme deux diodes tête-bêche ou comme un triac sans gâchette, il a la particularité de devenir passant aux environs de 35 – 40 V. On peut alors le considérer comme un court-circuit jusqu'à ce que le courant s'annule ou que la tension s'inverse.

**Utilisations d'un triac**

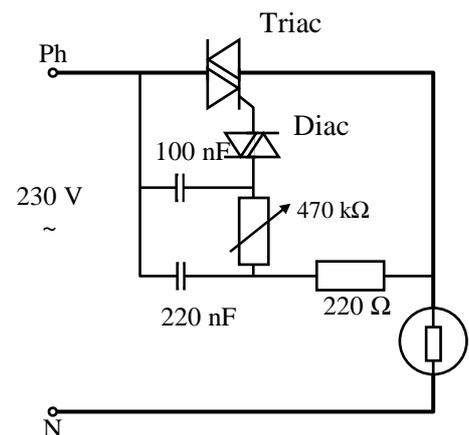
Récepteurs de 1 à 60 A, tensions inverses de 700 à 1000 V.

On l'utilise pour la commande de gradateurs de lumière, de radiateurs électriques, de petits moteurs universels

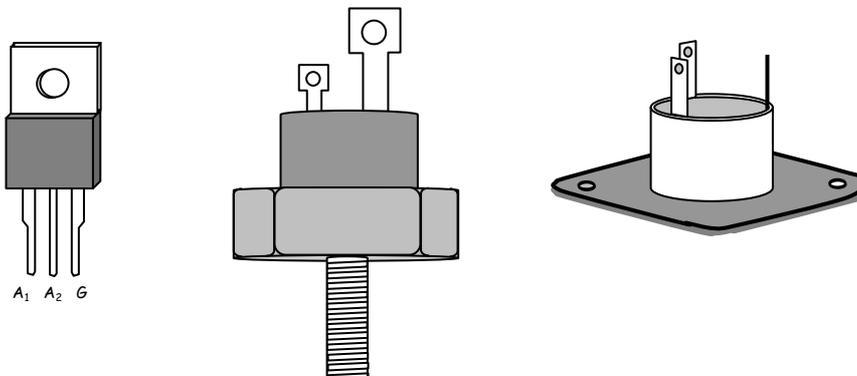
Exemple de commande d'un triac

Un triac peut être commandé par ce genre de circuit :

L'action sur le potentiomètre de 470 kΩ permet de régler l'instant de l'impulsion I_g sur la gâchette ce qui permet d'ajuster le niveau d'éclairage.

**Quelques types de boîtiers**

(les mêmes que pour un thyristor) :



1.1.4. Le transistor

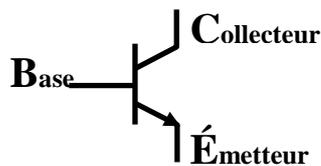
Le transistor joue le rôle d'un interrupteur électronique commandé.

Il existe deux types de transistor :

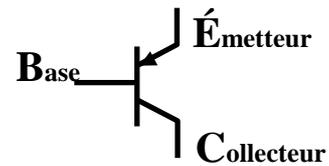
- Le transistor bipolaire commandé par un courant électrique sur la base I_B ;
- Le transistor unipolaire commandé par une différence de potentiel V_{GS} .

➤ le transistor bipolaire

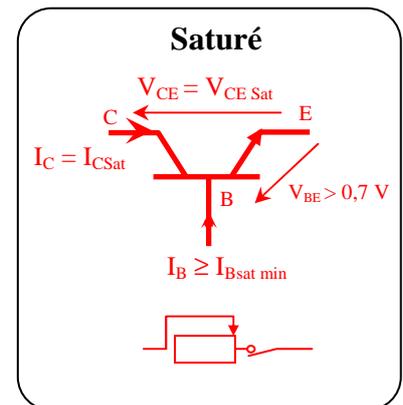
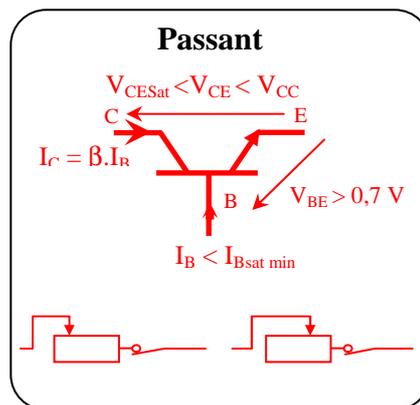
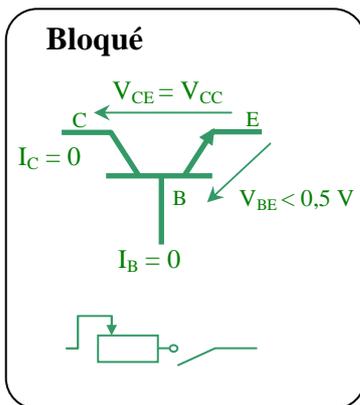
Symbole : Type NPN



Type PNP



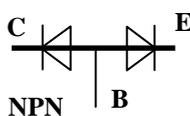
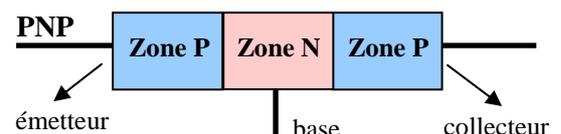
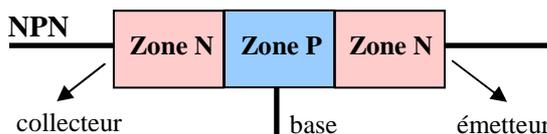
Les trois états du transistor :



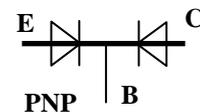
Le transistor est, lui aussi, un **composant unidirectionnel**

BLOPAGE du TRANSISTOR : $V_{BE} < 0,5 \text{ V}$ donc $I_B = 0$ ou $V_C < V_E$ ($V_{CE} < 0$)	POLARISATION $V_{BE} > 0,7 \text{ V}$ donc $I_B > 0$ et $V_C > V_E$ ($V_{CE} > 0$)	SATURATION $V_{BE} > 0,7 \text{ V}$ et $I_B \geq I_{B \text{ Sat min}}$
	$V_{CE} = \text{pleine tension}$ et $I_C = 0$	$V_{CE \text{ Sat}} < V_{CE} < V_{CC}$ et $0 < I_C < I_{C \text{ Sat}}$

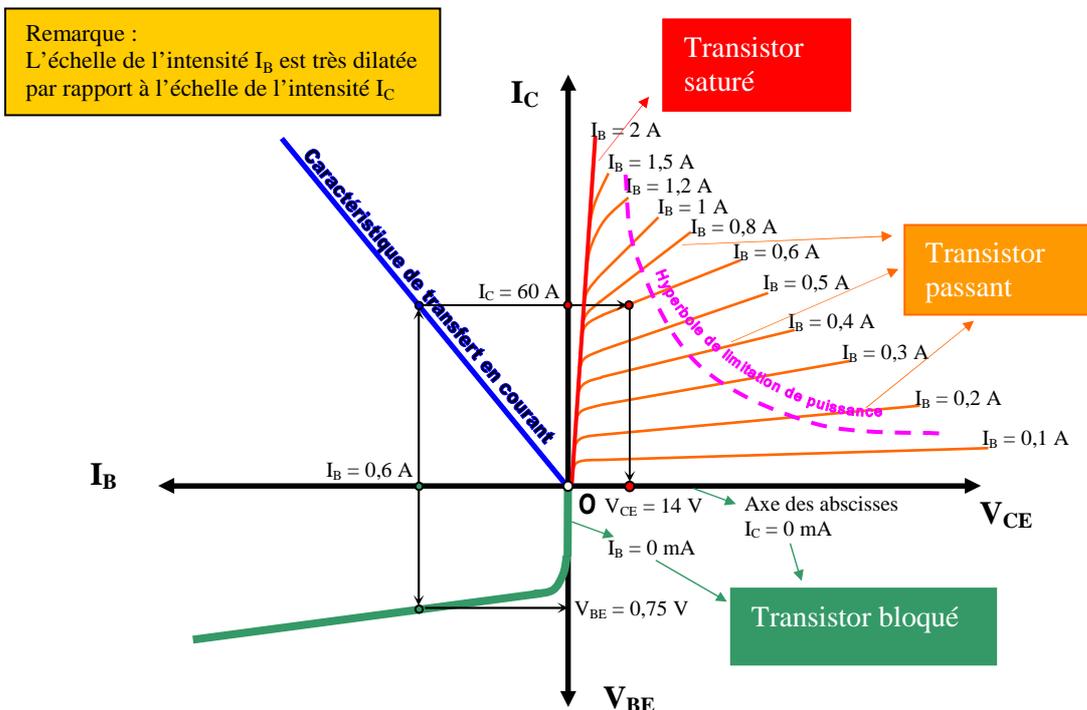
Constitution d'un transistor :



Représentations équivalentes à deux diodes :
Pour tester un transistor, il suffit de vérifier l'état des « diodes » entre B - E et B - C.
NPN : B est une anode, PNP : B est une cathode.



Caractéristique du transistor : $I_C = f(V_{CE})$ pour un courant de base donné



Les grandeurs fondamentales

Les quatre critères principaux de choix d'un transistor sont :

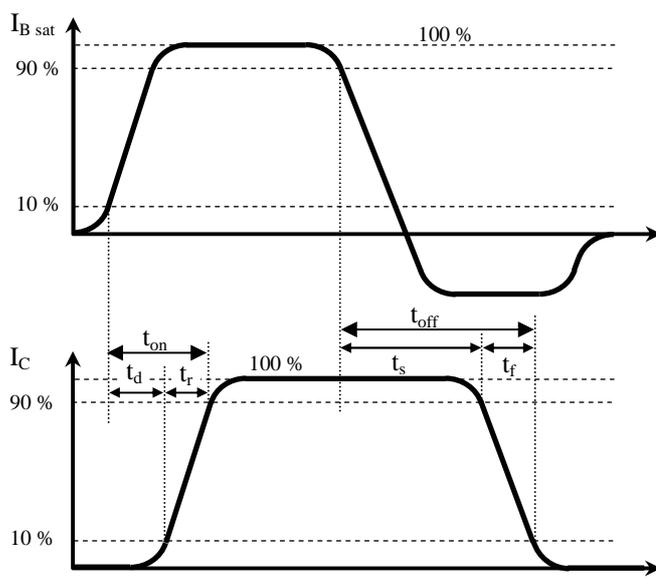
- I_C le courant continu collecteur à l'état passant jusqu'à plusieurs centaines d'ampères
- V_{CE0} la tension collecteur-émetteur à l'état bloqué ($I_B = 0$ mA) jusqu'à 1000 V
- f la fréquence de commutation
- H_{21E} ou β le gain en courant du transistor

Fréquence et temps de commutation

En commutation, un transistor ne réagit pas instantanément : un certain temps est associé à son passage de l'état bloqué à l'état saturé et inversement.

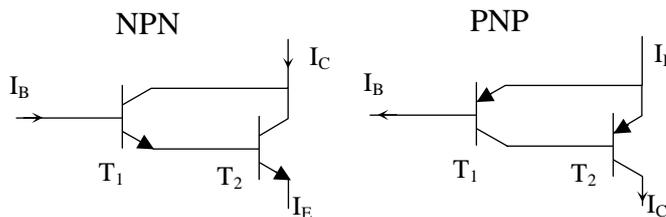
- t_d : temps de retard (d : delay)
- t_r : temps de montée (r : rise)
- t_{on} : temps de mise en action $t_{on} = t_d + t_r$
- t_s : temps de stockage
- t_f : temps de descente (f : fall)
- t_{off} : temps de disparition $t_{off} = t_s + t_f$

Plus les temps de commutation sont courts, plus la fréquence pourra être élevée.



Montage Darlington :

Un transistor de puissance nécessite un courant de base important (gain beaucoup moins élevé que les petits transistors). Pour compenser cet inconvénient, on utilise un montage avec deux transistors en « cascade » appelé montage Darlington.



Dans ce cas, on obtient $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$

Point de fonctionnement et échauffement d'un transistor :

L'échauffement d'un transistor est dû à la puissance P_d qu'il dissipe :

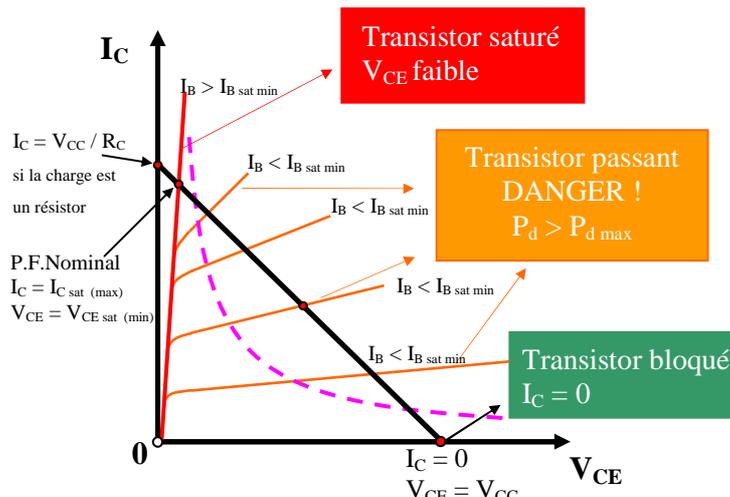
$$P_d = V_{CE} \cdot I_C + V_{BE} \cdot I_B$$

$V_{BE} \cdot I_B$ étant négligeable, si $P_{d \max}$ est la puissance à ne pas dépasser, on peut écrire :

$$I_{C \max} = P_{d \max} / V_{CE}$$

qui est l'équation d'une hyperbole.

En commutation, le point de fonctionnement ne fait que traverser la zone « interdite »

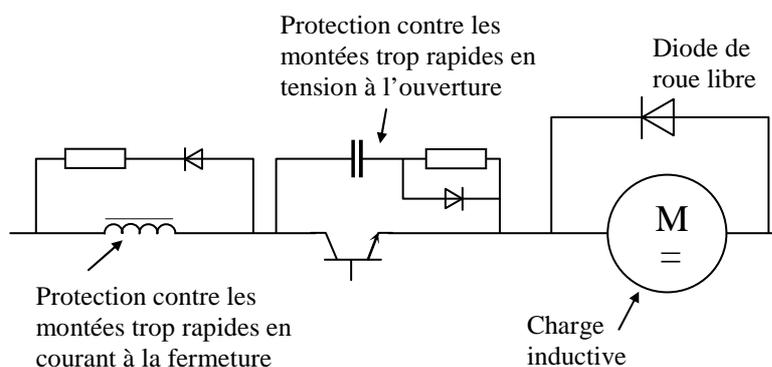


Protection d'un transistor

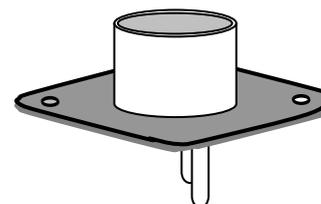
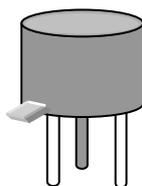
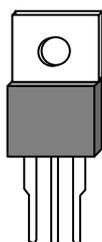
À l'ouverture du circuit, la charge inductive crée une surtension appelée « effet de self ».

Comme pour le thyristor les di/dt et dv/dt trop importants peuvent aussi endommager le transistor.

Ces circuits de protection sont désignés sous l'abréviation « C.A.L.C. » qui veut dire circuit d'aide à la commutation.



Quelques types de boîtiers :



➤ le transistor unipolaire

Principaux types :

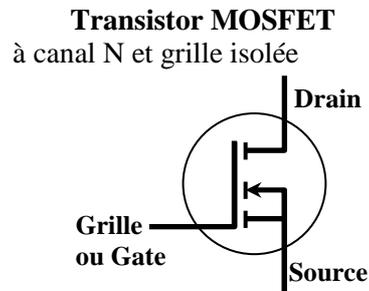
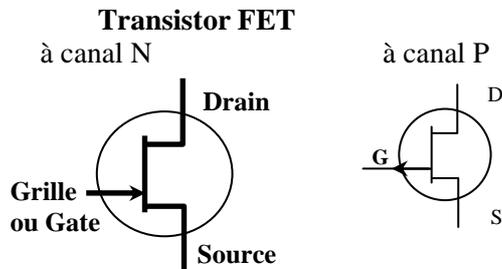
Transistor à jonction à effet de champ :

transistor FET (Field Effect Transistor)

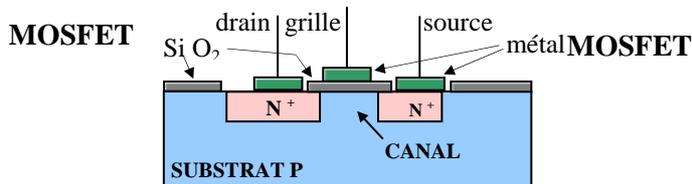
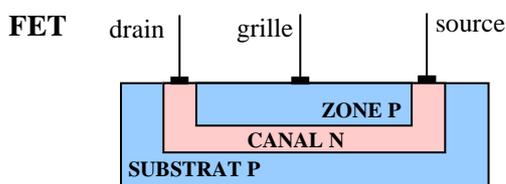
Transistor MOS à enrichissement ou appauvrissement :

transistor MOS (Metal Oxyde Semiconducteur)

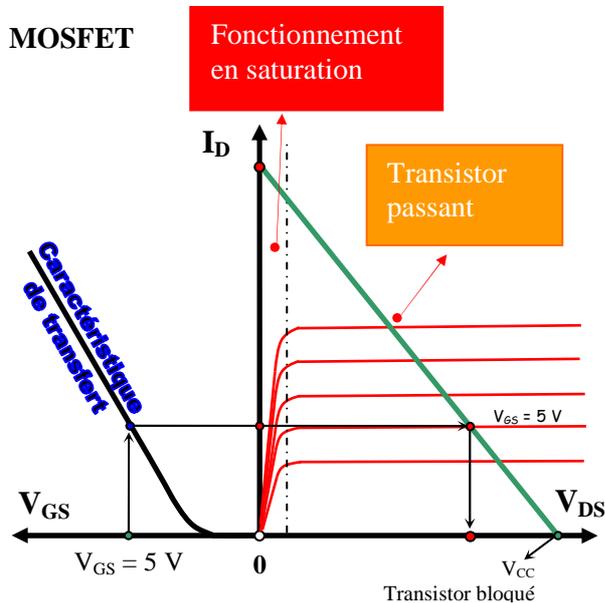
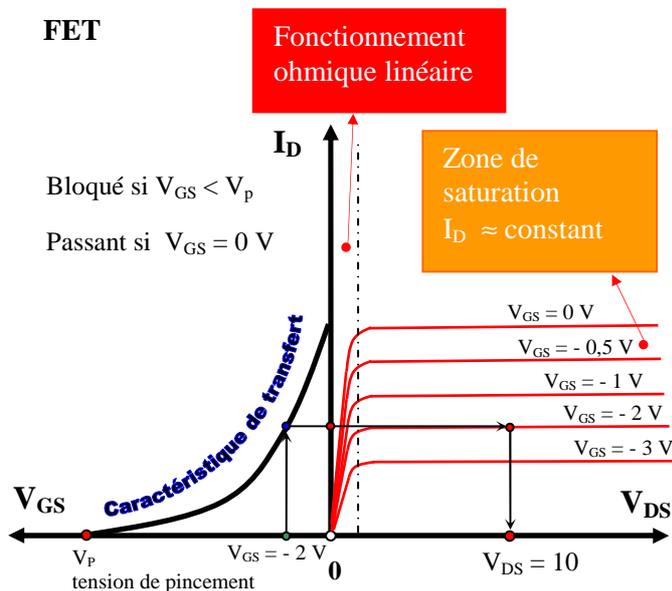
Symboles :



Constitution d'un transistor :



Courbes caractéristiques d'un transistor unipolaire :



Les grandeurs fondamentales :

Les critères principaux de choix d'un transistor sont :

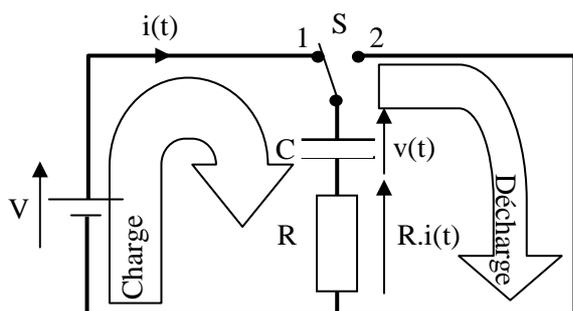
- I_D le courant continu de drain à l'état passant jusqu'à plusieurs centaines d'ampères
- V_{DS} la tension drain - source à l'état bloqué jusqu'à 1000 V
- f la fréquence de commutation beaucoup plus élevée que pour un transistor bipolaire

1.2. La temporisation

La **temporisation** est l'attente lors de l'ouverture et/ou la fermeture d'un circuit. Elle retarde la commande ou la coupure du signal électrique.

La solution technologique est assurée par la charge ou la décharge d'un condensateur associé à des composants électroniques spécifiques qui jouent le rôle d'**oscillateurs** ou par **comptage** numérique. Ce sont des circuits intégrés utilisés comme **monostables** ou comme **bistables**.

1.2.1. Le circuit RC



Le temps de charge et de décharge dépend du produit RC appelé constante de temps :

R en ohms
C en farads
 τ en secondes

$$\tau = R.C$$

Nous avons vu que dans un circuit constitué d'un condensateur C en série avec une résistance R et alimenté par une tension continue V, le condensateur se charge à travers la résistance et la tension à ses bornes augmente progressivement jusqu'à atteindre V.

De même, dans un circuit RC fermé sur lui-même, le condensateur C se décharge à travers la résistance R et la tension à ses bornes diminue progressivement jusqu'à atteindre 0 V. Le temps de charge ou de décharge dépend de la constante de temps du circuit.

L'inverseur S est en réalité remplacé par une bascule susceptible de passer d'un état à l'autre en fonction de deux niveaux de tension appelés que l'on appelle seuils de déclenchement.

Les courbes universelles de charge et de décharge d'un condensateur C à travers une résistance R donnent l'allure de la tension aux bornes du condensateur $v(t)$ en pourcentage de la tension V aux bornes du générateur en fonction du temps t exprimé par rapport à la constante de temps RC.

1.2.2. L'oscillateur

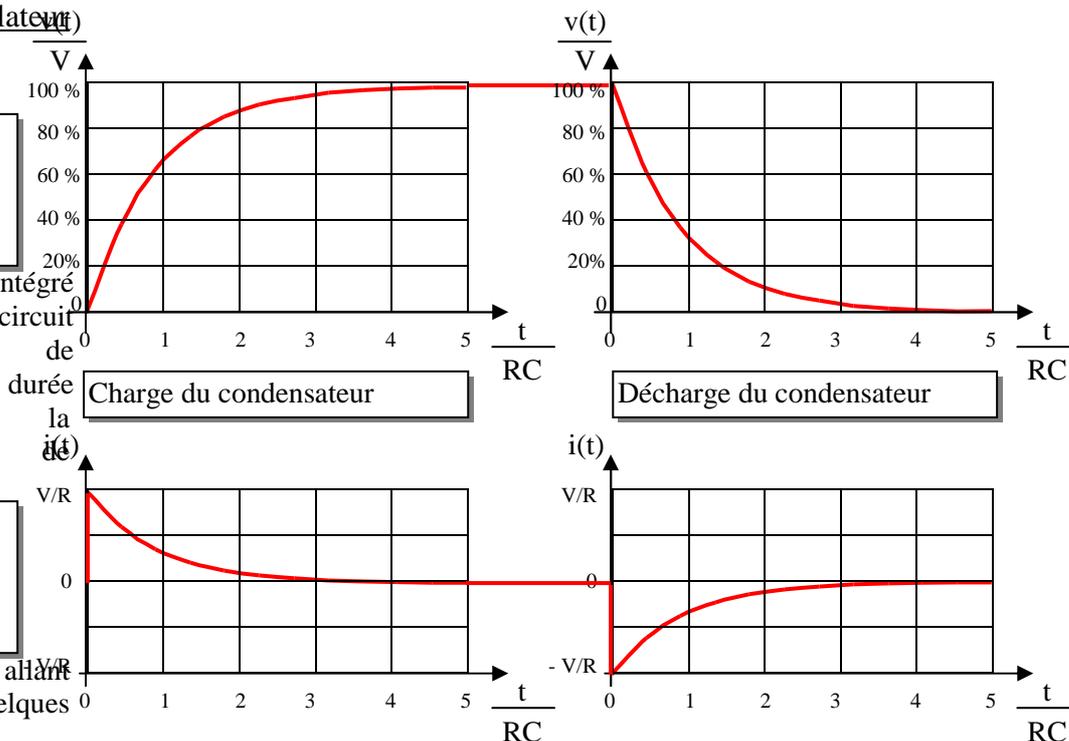
NE555

Allure de la tension aux bornes du condensateur

Le circuit intégré NE555 est un circuit monostable de longue durée permettant la réalisation

Allure de l'intensité du courant dans la résistance

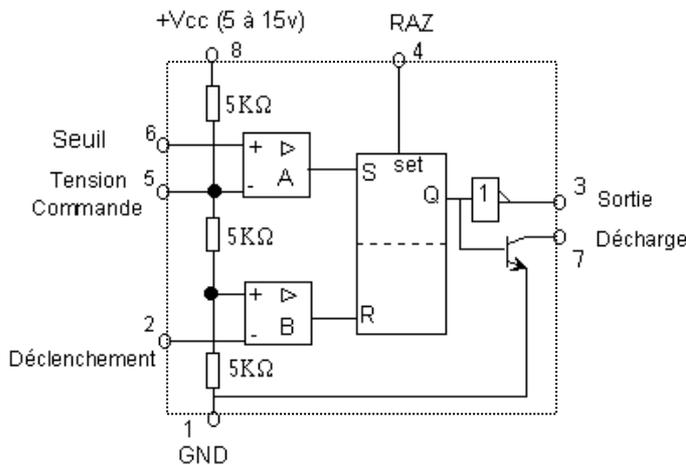
temporisation allant de quelques



microsecondes à quelques heures.

Ce circuit intégré comporte deux amplificateurs opérationnels montés en comparateur, une bascule RS une porte inverseuse et un transistor pour la décharge.

Schéma de principe interne :



Boîtier vu de dessus :

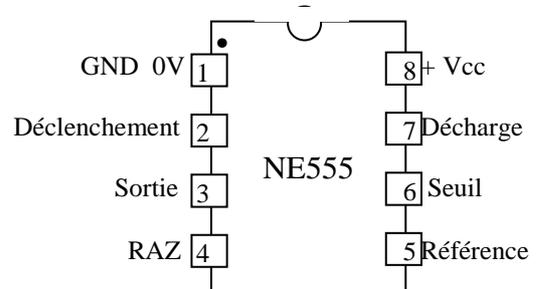


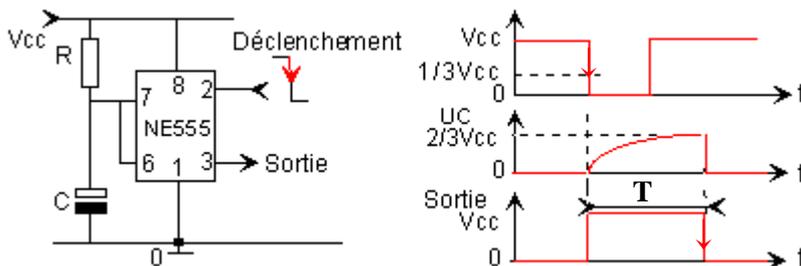
Table de vérité de la bascule :

S	R	RAZ	Q
1	0	0	0
1	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0

Montage en monostable :

Un monostable est un montage qui possède un état de repos.

Une impulsion négative sur la borne 2 fait permuer le comparateur B et met à 1 la sortie de la bascule qui commande le transistor de décharge du condensateur ; La durée de temporisation correspond au temps que met le condensateur pour se charger de 0 V jusqu'à 2/3 de Vcc détecté par le comparateur A

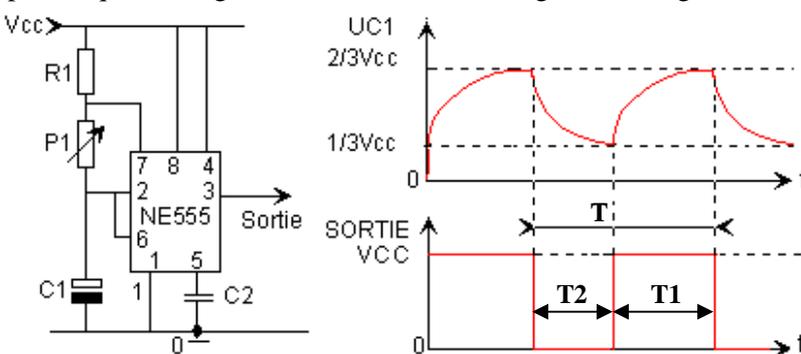


La durée de l'impulsion de sortie dépend de la valeur de R et de C :

$$T = 1,1 R.C$$

Montage en astable :

Un stable est un montage qui possède pas d'état de repos. Dès sa mise sous tension il produit un signal périodique (horloge). C'est une suite de charge et décharge de condensateur entre deux seuils fixes.



C1 se charge à travers R1 et P1 et se décharge à travers P1

$$T1 = 0,7 (R1 + P1).C1$$

$$T2 = 0,7 .P1.C1$$

$$T = T1 + T2 \text{ c'est la période}$$

Le rapport cyclique est le rapport α tel que :

$$\alpha = T1 / T$$

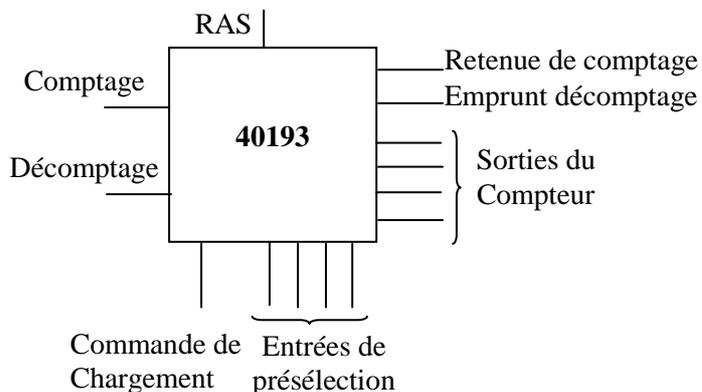
1.2.3. Le compteur numérique

Un compteur est un circuit intégré permettant le comptage ou le décomptage d'impulsions présentes sur son entrée, la durée du comptage fixant la durée de temporisation.

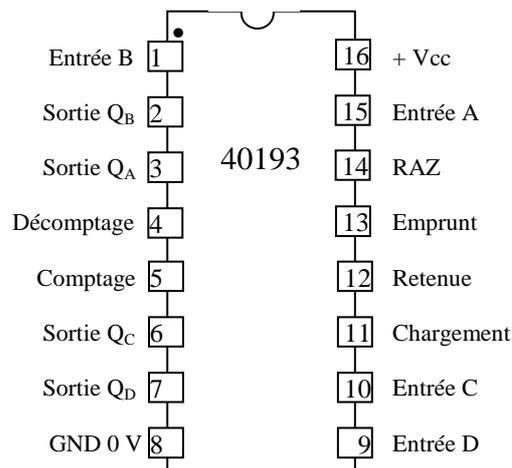
Un compteur peut être binaire ou décimal, synchrone ou asynchrone, à présélection.

Exemple du compteur décompteur binaire synchrone 4 bits SN 74193 ou CMOS 40193

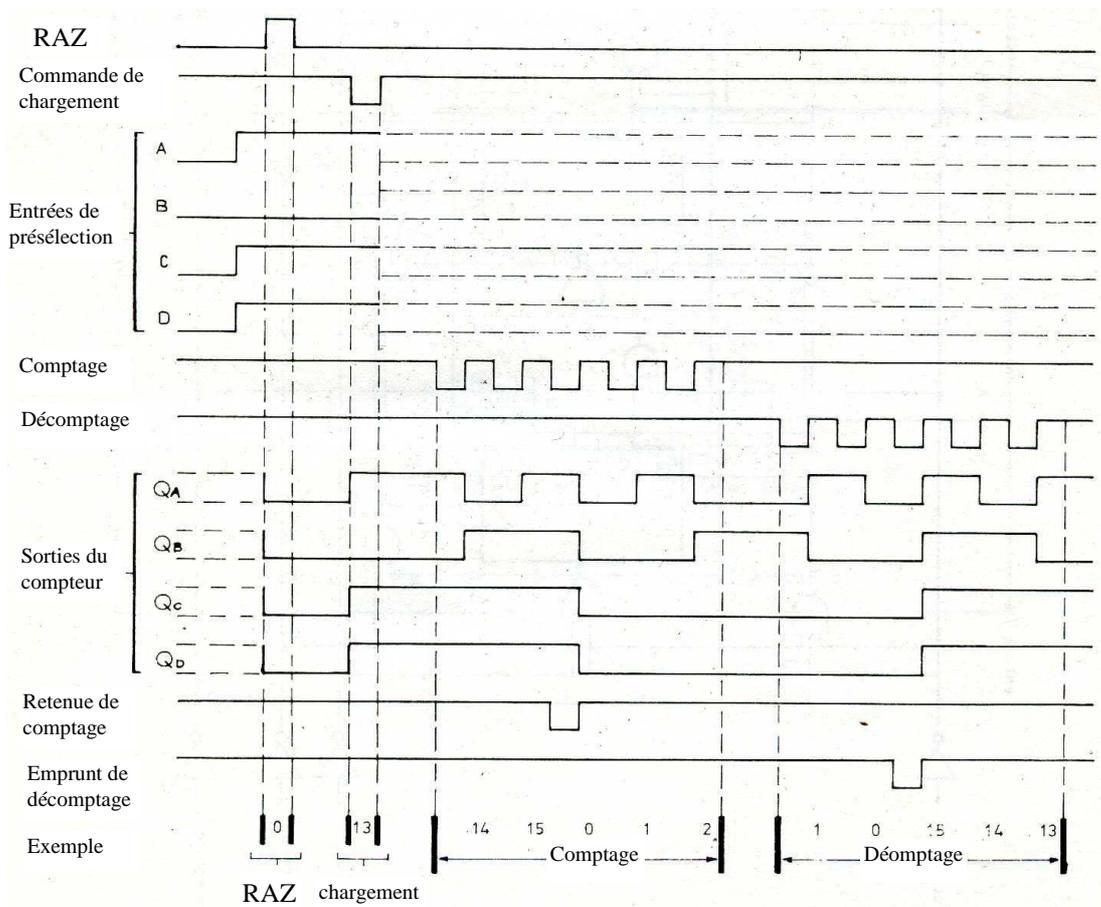
Schéma de principe interne :



Boîtier vu de dessus :



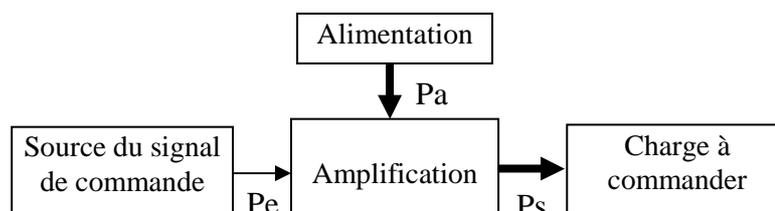
Utilisation :



1.3. L'amplification

L'**amplification** est la fonction nécessaire entre l'étage de commande de faible puissance et l'étage de sortie de puissance élevée.

C'est un dispositif qui délivre la puissance nécessaire au bon fonctionnement de la charge dans la limite de la puissance disponible sur l'alimentation et du rendement de l'amplificateur.



La puissance fournie à la charge par l'amplificateur est P_s

La puissance absorbée par l'amplificateur est $P_e + P_a$

Le rendement de l'amplificateur est le rapport de la puissance fournie sur la puissance absorbée.

1.3.1. Le transistor bipolaire

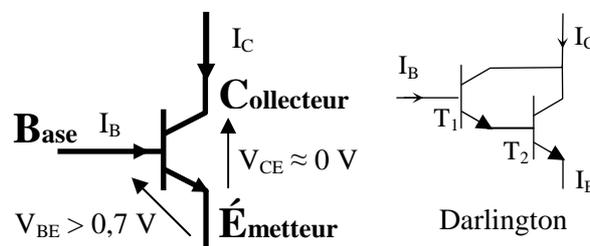
Nous avons vu que le transistor bipolaire est un **amplificateur de courant**.

- Pour un transistor type NPN, lorsque la tension V_{BE} est supérieure à 0,7 V, le transistor est passant voire saturé ($V_{CE} \approx 0$ V). Le courant électrique I_B présent sur la base commande le passage d'un courant électrique I_C du collecteur vers l'émetteur proportionnel à I_B mais très nettement amplifié.

Le gain en courant β est de l'ordre de 100.

Cela signifie que $I_C = \beta \cdot I_B$

Pour les transistors de puissance on augmente l'amplification en branchant deux transistors en « cascade » appelé montage Darlington : la conduction de T_1 entraîne la conduction de T_2 et $I_C = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot I_B$

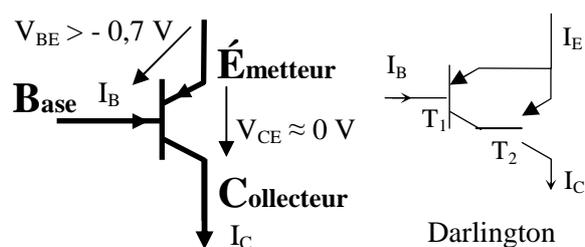


- Pour un transistor type PNP, lorsqu'on a la tension $V_{BE} > -0,7$ V ou bien $V_{EB} > 0,7$ V, le transistor est passant voire saturé (V_{CE} négatif mais ≈ 0 V). Le courant électrique I_B présent sur la base commande le passage d'un courant électrique I_C de l'émetteur vers le collecteur proportionnel à I_B mais très nettement amplifié.

Le gain en courant β est de l'ordre de 100.

Cela signifie que $I_C = \beta \cdot I_B$

Pour les transistors de puissance on augmente l'amplification en branchant deux transistors en « cascade » appelé montage Darlington : la conduction de T_1 entraîne la conduction de T_2 et $I_C = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot I_B$



1.3.2. L'amplificateur opérationnel

L'amplificateur opérationnel est un **amplificateur de tension**.

Définition :

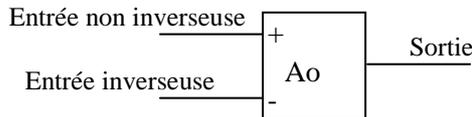
Le terme amplificateur opérationnel désignait à l'origine un circuit amplificateur utilisé pour la réalisation d'opérations mathématiques : addition, soustraction ...

Les amplificateurs opérationnels rentrent aujourd'hui dans la constitution de nombreux circuits permettant de résoudre les problèmes de traitement du signal.

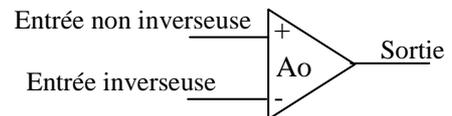
On va considérer l'amplificateur opérationnel comme une boîte ayant une sortie et deux entrées : une entrée repérée + dite non inverseuse car une variation de tension appliquée sur cette entrée entraîne une variation de même sens de la tension de sortie ;

une entrée repérée - dite inverseuse car une variation de tension appliquée sur cette entrée entraîne une variation en sens inverse de la tension de sortie.

Symboles :



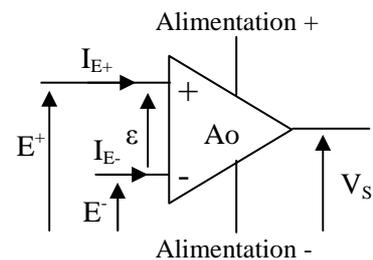
ou :



Principe :

On peut décomposer le contenu de cette boîte en deux circuits :

- Un comparateur qui effectue la différence de potentiel entre les tensions présentes sur les deux entrées. Cette différence est notée $\varepsilon = E^+ - E^-$
- Un amplificateur qui amplifie énormément cette différence pour donner une tension de sortie V_S proportionnelle à ε telle que $V_S = A_o \cdot \varepsilon$



Si le potentiel de l'entrée E^+ est supérieur au potentiel de l'entrée E^- , la différence ε est positive et donc le potentiel de la sortie est de signe positif.

Si le potentiel de l'entrée E^+ est inférieur au potentiel de l'entrée E^- , la différence ε est négative et donc le potentiel de la sortie est de signe négatif.

Les grandeurs fondamentales :

L'amplificateur opérationnel a trois caractéristiques électriques fondamentales:

- Le gain en tension A_o : c'est le gain propre de l'amplificateur opérationnel :
En pratique le gain est très grand : $10^3 < A_o < 10^6$

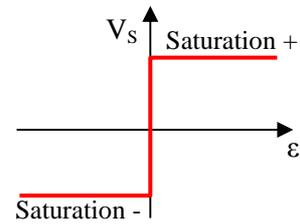
$$A_o = \frac{V_S}{\varepsilon} = \frac{V_S}{E^+ - E^-}$$

- L'impédance d'entrée : c'est l'impédance présente entre les deux entrées de l'amplificateur :
En pratique l'impédance d'entrée est très grande : $10^6 < Z_E < 10^{12} \Omega$
- L'impédance de sortie : c'est l'impédance interne de l'amplificateur générateur de tension :
En pratique l'impédance de sortie est très faible : $Z_S = \text{quelques } \Omega$

Remarques particulières d'utilisation :

Au niveau de l'utilisation courante, on admettra que les grandeurs fondamentales sont parfaites :

- Le gain en tension A_o est infini ($A_o = \infty$) et donc $\varepsilon \approx 0 \rightarrow E^+ \approx E^-$
- L'impédance d'entrée est infinie ($Z_E = \infty$) et donc $I_{E+} \approx I_{E-} \approx 0$; pas de courants rentrants
- L'impédance de sortie est nulle ($Z_S = 0$) et donc V_S est maximale (saturation)

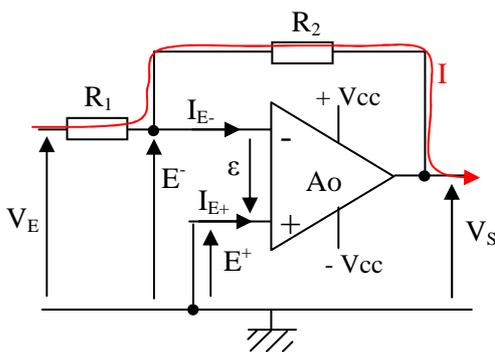


Un tel système est dit non linéaire (saturation + ou saturation -). Il sera utilisé en comparateur. Les niveaux de saturation sont sensiblement les niveaux des tensions données par les alimentations, l'une positive, l'autre négative. Le point milieu des alimentations constitue la masse du montage.

Pour pouvoir agir sur le gain de l'amplificateur, il est nécessaire de travailler en régime linéaire. Pour cela il faut utiliser des systèmes de contre réaction (bouclage de la sortie sur l'entrée inverseuse).

Amplification de tension en régime linéaire :

➤ Exemple du montage inverseur



- $\varepsilon \approx 0 \rightarrow E^+ \approx E^- = 0$ (E^+ à la masse)
- $I_{E+} \approx I_{E-} \approx 0$ (pas de courants rentrants)

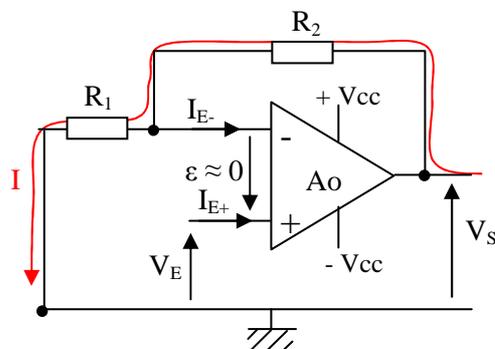
On peut donc dire que l'entrée - est au potentiel de la masse. On dit que c'est une masse virtuelle. On peut également dire que R_1 et R_2 sont parcourues par le même courant I .

Les lois d'ohm aux bornes de R_1 et de R_2 donnent :
 $V_E - E^- = R_1 \cdot I$ et $E^- - V_S = R_2 \cdot I$ avec $E^- = 0$ V
 Donc $I = V_E / R_1 = -V_S / R_2$

L'expression de la sortie par rapport à l'entrée donne :
 Le signe - traduit bien le fait que le montage est inverseur.
 Le rapport des résistance R_2 / R_1 donne le gain :
 Si $R_2 > R_1$ le montage est **amplificateur** ; Si $R_2 < R_1$ le montage est **atténuateur**.

$V_S = - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_E$	$Z_E = R_1$
	$Z_S = 0$

➤ Exemple du montage non inverseur



On applique les mêmes remarques :

Les lois d'ohm aux bornes de R_1 et de R_2 donnent :
 $V_S - E^- = R_2 \cdot I$ et $E^- = R_1 \cdot I$ avec $E^- = V_E$
 Donc $I = (V_S - V_E) / R_2 = V_E / R_1$
 $\rightarrow V_S / R_2 = V_E / R_1 + V_E / R_2$
 $\rightarrow V_S = V_E (R_2 / R_1) + V_E$

L'expression de la sortie par rapport à l'entrée donne :

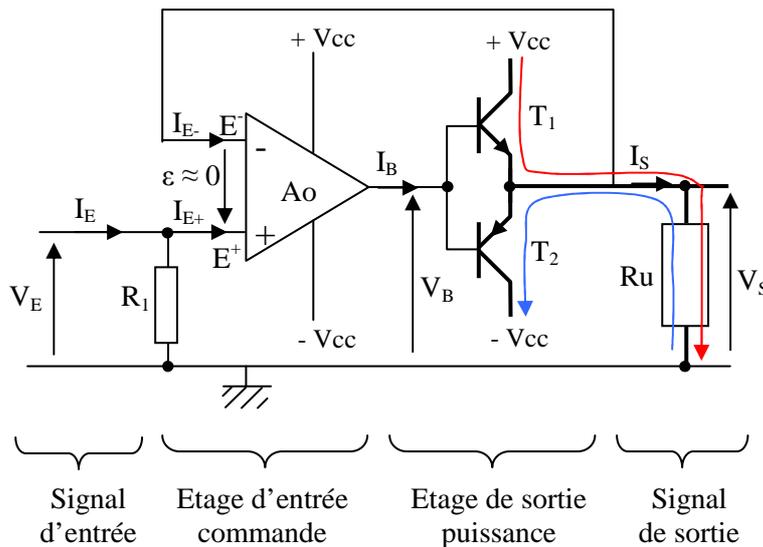
$V_S = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_E$	$Z_E = \infty$
	$Z_S = 0$

Le montage est **toujours amplificateur**.

1.3.3. L'amplificateur de puissance

Exemple d'un amplificateur de puissance

L'amplificateur de puissance est la combinaison d'un amplificateur de tension et d'un amplificateur de courant. Pour cela nous allons associer un amplificateur opérationnel et deux transistors bipolaires complémentaires NPN et PNP alimentés par deux tensions symétriques.

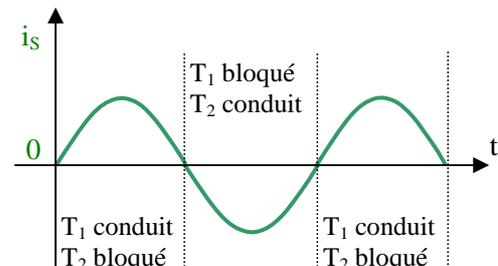
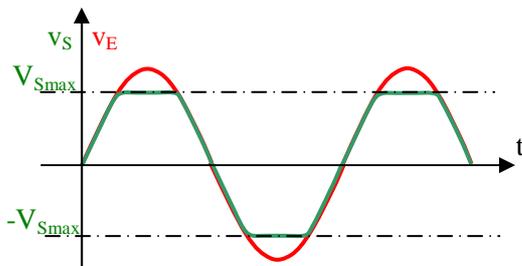


Dans ce montage, l'amplificateur opérationnel fonctionne en régime linéaire car la sortie du montage est reliée à l'entrée inverseuse (boucle fermée ou contre réaction). On a $\varepsilon \approx 0$ donc à chaque instant $V_S = V_E \rightarrow$ régime linéaire.

Le courant traversant la charge est fourni par l'étage de sortie :
 Lorsque $V_B > 0$, le courant $I_B > 0$, alors T_1 conduit et T_2 bloqué
 $\rightarrow I_S > 0$ et $I_S = \beta_1 \cdot I_B$
 Lorsque $V_B < 0$, le courant $I_B < 0$, alors T_2 conduit et T_1 bloqué
 $\rightarrow I_S < 0$ et $I_S = \beta_2 \cdot I_B$

Un tel montage fonctionne lorsqu'on applique sur l'entrée une tension continue positive ou négative et donc aussi lorsqu'on applique sur l'entrée une tension alternative.

La tension de sortie V_S est identique à la tension d'entrée V_E jusqu'à la limite fixée des alimentations. On dit alors qu'il y a saturation



Bilan des puissances :

- L'amplification en puissance est donnée par le rapport $A_p = P_S / P_E = V_S \cdot I_S / V_E \cdot I_E = R_u^2 \cdot I_S / R_1^2 \cdot I_E$
- Le rendement du montage est donnée par le rapport $\eta = P_S / (P_E + P_a) \approx P_S / P_a$
 La puissance du signal d'entrée P_E est très faible devant la puissance des alimentations P_a .
- La puissance perdue est essentiellement dissipée par effet thermique dans les deux transistors de l'étage de sortie. Pour limiter cet échauffement il est nécessaire de monter ces transistors sur des dissipateurs thermiques appelés aussi radiateurs.

1.4. La comparaison

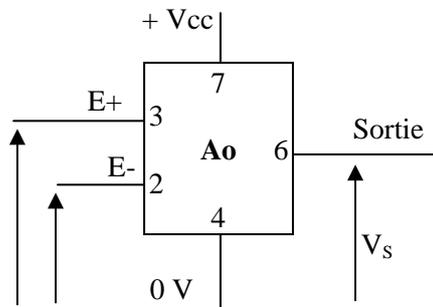
La **comparaison** établit un rapport d'égalité entre deux données. Ces données peuvent être deux signaux analogiques ou bien deux mots numériques. La comparaison permet de définir laquelle de ces données est supérieure ou inférieure à l'autre.

La solution technologique est assurée par l'utilisation d'amplificateurs opérationnels utilisés en régime non linéaire (tout ou rien) pour la comparaison des signaux analogiques ou par l'utilisation de portes logiques élémentaires pour la comparaison binaire.

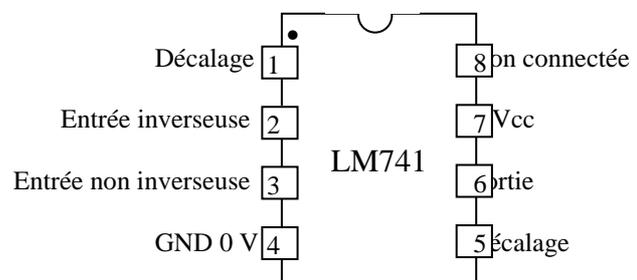
1.4.1. Le comparateur analogique

Nous allons utiliser un amplificateur opérationnel alimenté en tension continue entre 0V et +Vcc. Exemple l'amplificateur opérationnel LM741 couramment utilisé car protégé pratiquement contre toutes les erreurs de manipulation.

Schéma de principe interne :



Boîtier vu de dessus :

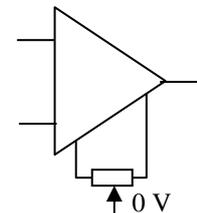


Fonctionnement en comparateur :

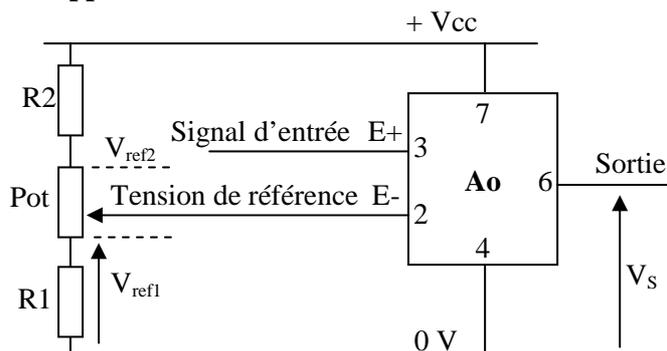
Si on a $E+ > E-$ alors $V_s \approx +V_{cc}$
 Si on a $E+ < E-$ alors $V_s \approx 0V$

Décalage ou offset :

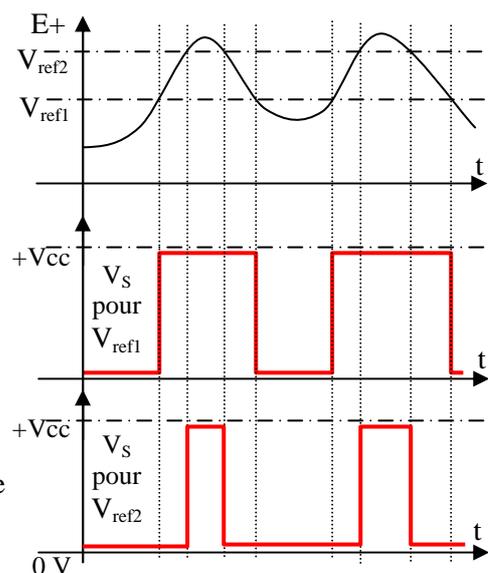
Les deux bornes repérées 1 et 5 servent à compenser ou accentuer un éventuel décalage du 0V d'une entrée par rapport à l'autre.



Application :



Le signal d'entrée est appliqué sur l'entrée non inverseuse
 La tension de référence est appliquée sur l'entrée inverseuse
 Le potentiomètre permet de régler la tension de référence entre les valeurs V_{ref1} et V_{ref2}



1.4.2. Le comparateur logique ou numérique

Principe du comparateur binaire :

Comparer deux bits a et b

Schéma d'un comparateur 2 bits :

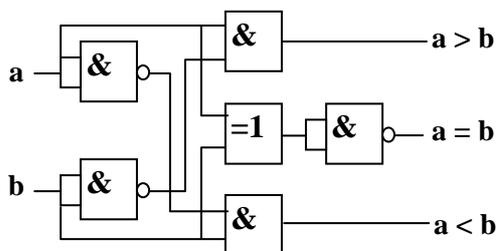


Table de vérité :

a	b	a = b	a > b	a < b
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1
1	0	0	1	0
1	1	1	0	0

↓ ↓ ↓

Fonction logique obtenue	$a \oplus b$	$a \cdot \bar{b}$	$\bar{a} \cdot b$
--------------------------	--------------	-------------------	-------------------

Exemple d'un comparateur logique 4 bits : MC14585

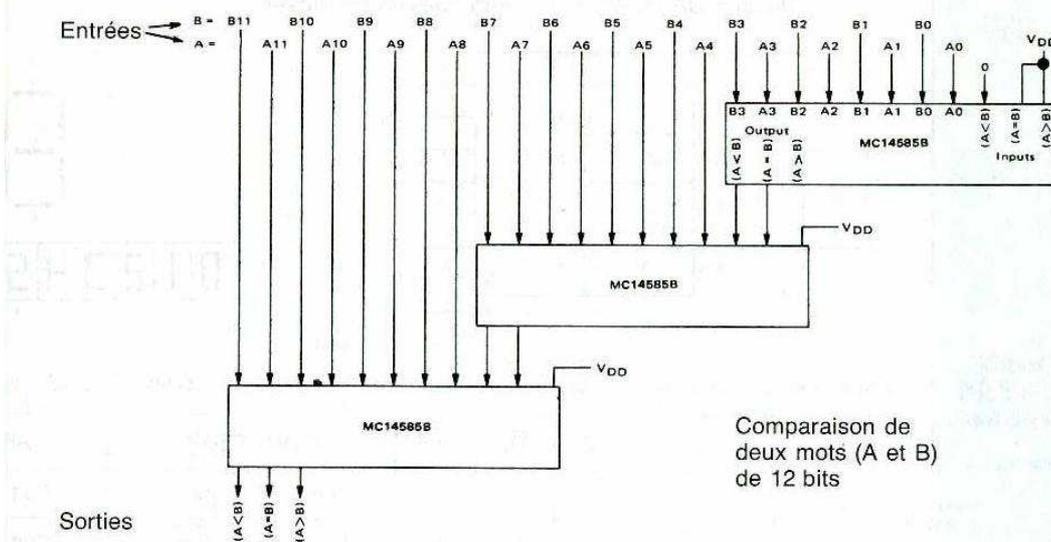
4585 — Comparateur 4 bits
4-bit magnitude comparator

Boîtier DIL 16
 V_{DD} 16
 V_{SS} 8

Table de vérité

entrées de comparaison				entrées en cascade			sorties		
$A_3 \cdot B_3$	$A_2 \cdot B_2$	$A_1 \cdot B_1$	$A_0 \cdot B_0$	$I_A > B$	$I_A < B$	$I_A = B$	$O_A > B$	$O_A < B$	$O_A = B$
$A_3 > B_3$	X	X	X	H	X	X	H	L	L
$A_3 < B_3$	X	X	X	X	X	X	L	H	L
$A_3 = B_3$	$A_2 > B_2$	X	X	H	X	X	H	L	L
$A_3 = B_3$	$A_2 < B_2$	X	X	X	X	X	L	H	L
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 > B_1$	X	H	X	X	H	L	L
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 < B_1$	X	X	X	X	L	H	L
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 > B_0$	H	X	X	H	L	L
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 < B_0$	X	X	X	L	H	L
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 = B_0$	X	L	H	L	L	H
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 = B_0$	H	L	L	H	L	L
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 = B_0$	X	H	L	L	H	L
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 = B_0$	X	H	H	L	H	H
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 = B_0$	L	L	L	L	L	L

Application - Comparateurs 4585 montés en cascade



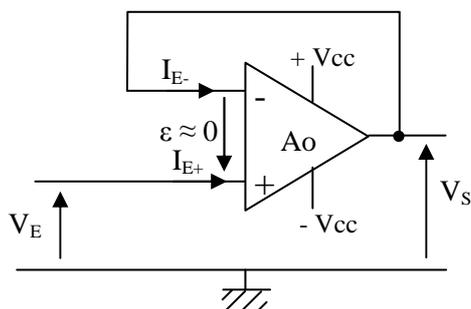
1.5. Le suiveur

Le montage **suiveur** reproduit en sortie un signal identique au signal appliqué sur son entrée.

Sa particularité réside dans le fait que ce montage joue le rôle d'un relais : l'entrée du montage absorbe très peu de courant par contre la sortie peut alimenter plusieurs charges ; Un tel montage permet d'augmenter le facteur de charge (buffer).

La solution technologique est assurée par l'utilisation d'amplificateurs opérationnels utilisés en régime linéaire (avec boucle de contre réaction de la sortie sur l'entrée inverseuse).

1.5.1. Le montage suiveur



La sortie est bouclée sur l'entrée inverseuse de l'amplificateur et le signal d'entrée est appliqué sur l'entrée non inverseuse.

On a $E^- = V_S$ et $E^+ = V_E$

$\varepsilon \approx 0 \rightarrow E^+ \approx E^-$

donc $\rightarrow V_S = V_E$

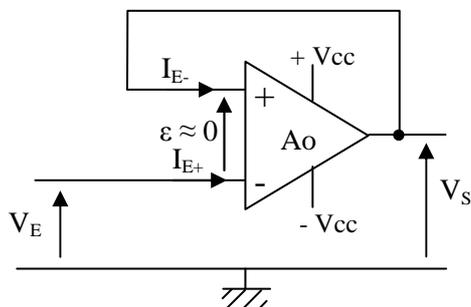
$I_{E^+} \approx I_{E^-} \approx 0$ (pas de courants rentrants) $\rightarrow Z_E = 0$

Montage amplificateur opérationnel $\rightarrow Z_S = 0$

$$V_S = V_E$$

$$Z_E = \infty$$

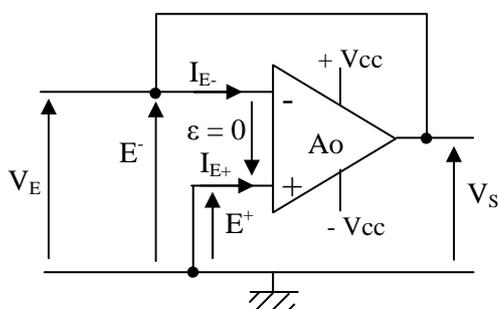
$$Z_S = 0$$



Attention de ne pas confondre le montage suiveur avec le montage ci contre qui fonctionne en régime saturé:

En effet, le signal d'entrée étant appliqué sur l'entrée inverseuse, la sortie varie en sens inverse et le signal ramené sur l'entrée + est opposé au signal d'entrée : la différence sur les entrées est de plus en plus grande jusqu'à saturation de la sortie en positif ou en négatif.

1.5.2. Le montage inverseur



La sortie est bouclée sur l'entrée inverseuse de l'amplificateur mais le signal d'entrée est appliqué sur l'entrée inverseuse.

On a $E^- = -V_S = V_E$ car $E^+ = 0$

$\varepsilon \approx 0 \rightarrow E^+ \approx E^-$

donc $\rightarrow V_S = -V_E$

$I_{E^+} \approx I_{E^-} \approx 0$ (pas de courants rentrants) $\rightarrow Z_E = 0$

Montage amplificateur opérationnel $\rightarrow Z_S = 0$

$$V_S = -V_E$$

$$Z_E = \infty$$

$$Z_S = 0$$

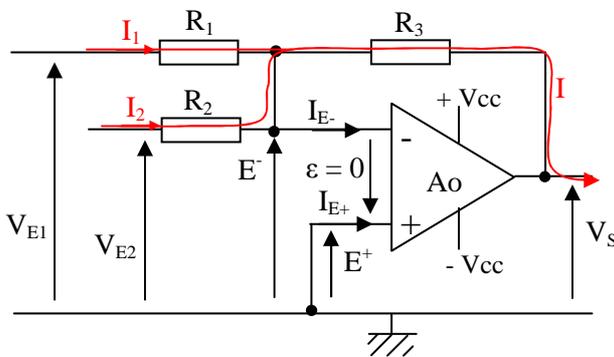
1.6. L'additionneur – Le soustracteur

L'**additionneur** établit la somme de deux données et le **soustracteur** établit la différence entre deux données. Ces données peuvent être deux signaux analogiques ou bien deux mots numériques. L'additionneur et le soustracteur sont donc des circuits nécessitant deux entrées de données et une sortie, résultat de l'opération arithmétique ou logique

La solution technologique est assurée par l'utilisation d'amplificateurs opérationnels linéaires utilisés comme son nom l'indique pour la réalisation d'opérations mathématiques de signaux analogiques ou par l'utilisation de circuits intégrés spécifiques pour l'addition de deux mots numériques.

1.6.1. L'additionneur analogique ou sommateur

Exemple du sommateur inverseur:



- $\epsilon \approx 0 \rightarrow E^+ \approx E^- = 0$ (E^+ à la masse)
- $I_{E^+} \approx I_{E^-} \approx 0$ (pas de courants rentrants)

On peut donc dire que l'entrée - est une masse virtuelle.

On peut également dire que le courant traversant R_3 est la somme des courants traversant R_1 et R_2 : $I = I_1 + I_2$

La loi d'ohm appliquée aux bornes des résistances R_1 , R_2 et R_3 donnent :

$$V_{E1} = R_1 \cdot I_1 ; V_{E2} = R_2 \cdot I_2 \text{ et } -V_S = R_3 \cdot I \text{ avec } I = I_1 + I_2$$

Donc $-V_S / R_3 = V_{E1} / R_1 + V_{E2} / R_2 \rightarrow$

$$V_S = -R_3 \left(\frac{V_{E1}}{R_1} + \frac{V_{E2}}{R_2} \right)$$

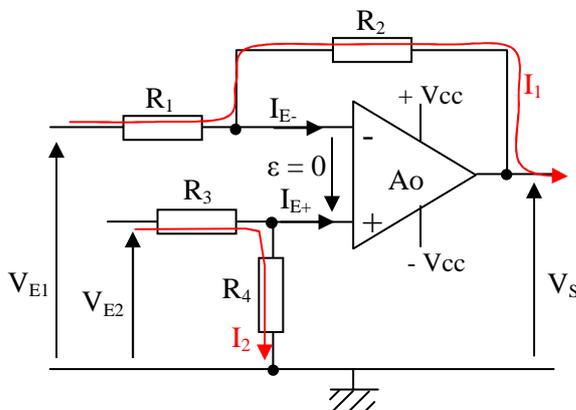
L'expression de la sortie par rapport aux entrées donne :

Le signe - traduit bien le fait que le montage est inverseur.

Si on choisit des résistances telle que $R_1 = R_2 = R_3 = R$ on a :

$$V_S = -(V_{E1} + V_{E2})$$

1.6.2. Le soustracteur analogique



- $\epsilon \approx 0 \rightarrow E^+ \approx E^-$
 - $I_{E^+} \approx I_{E^-} \approx 0$ (pas de courants rentrants)
- $E^+ = R_4 \cdot I_2 = R_4 \cdot V_{E2} / (R_3 + R_4) = E^-$
 $I_1 = (V_{E1} - E^-) / R_1 = (E^- - V_S) / R_2$
 $\rightarrow R_2 \cdot V_{E1} - R_2 \cdot E^- = R_1 \cdot E^- - R_1 \cdot V_S$
 $\rightarrow V_S = E^- \cdot (R_1 + R_2) / R_1 - V_{E1} \cdot R_2 / R_1$

$$V_S = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) V_{E2} - \frac{R_2}{R_1} V_{E1}$$

Si on choisit $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ on a :

$$V_S = V_{E2} - V_{E1}$$

1.6.3. L'additionneur numérique

Principe de base du 1/2 additionneur binaire :

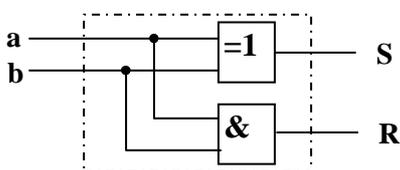
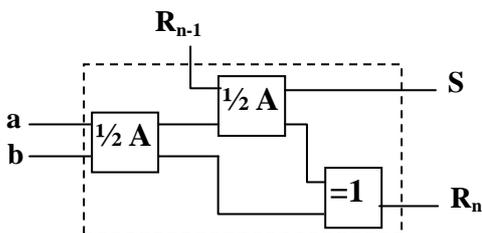


Table de vérité :

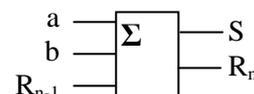
a	b	Somme S	Retenue R
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Schéma d'un additionneur 1 bit :



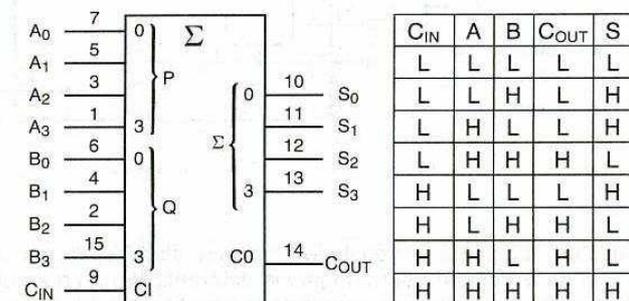
Fonction logique obtenue	$S = a \oplus b$	$R = a \cdot b$
--------------------------	------------------	-----------------

Symbole :

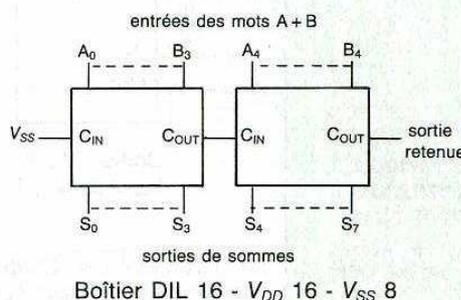


Exemple d'un additionneur logique 4 bits : MC14008

4008 — Additionneur 4 bits avec retenue
4-bit full adder with parallel carry output



Application - Additionneur 8 bits



1.6.4. Le soustracteur numérique

Le soustracteur numérique n'existe pas.

Lorsque l'on veut soustraire deux mots binaires $A - B$ il suffit de faire la somme de A avec le complément à 2 de B : (le complément à 2 est le complément à 1 + 1)

$$A - B = A + \overline{B}$$

Exemple d'un soustracteur 4 bits :

```

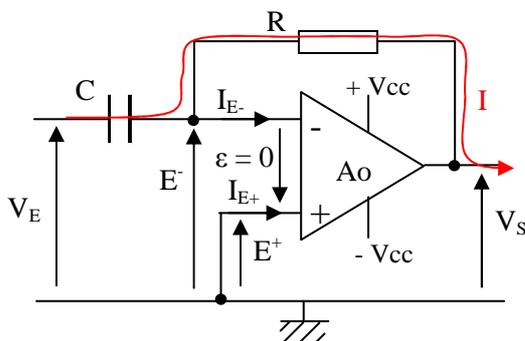
1011      →   1011
-          +
0101      1011 (complément à 2)
-----
0110      0110 (le résultat binaire est 0110)
    
```

1.7. Le dérivateur – L'intégrateur

Le **dérivateur** établit la dérivée par rapport au temps d'un signal et l'**intégrateur** établit l'intégrale par rapport au temps d'un signal. Ces signaux analogiques sont appliqués à l'entrée des montages pour en modifier le temps de réponse : le montage dérivateur permet accélère le temps de réponse, le montage intégrateur ralentit le temps de réponse.

La solution technologique est assurée par l'utilisation d'amplificateurs opérationnels linéaires utilisés comme son nom l'indique pour la réalisation d'opérations mathématiques de signaux analogiques et d'un condensateur qui a la particularité de se charger ou de se décharger à travers une résistance.

1.7.1. Le montage dérivateur ou différentiateur



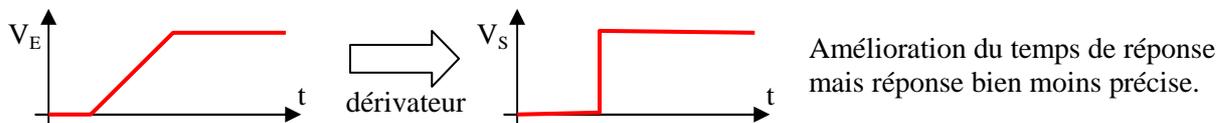
- $\varepsilon \approx 0 \rightarrow E^+ \approx E^- = 0$ (E^+ à la masse)
 - $I_{E+} \approx I_{E-} \approx 0$ (pas de courants rentrants)
- L'entrée - est une masse virtuelle.

Aux bornes du condensateur : $V_C = V_E$
Et $I = C \cdot dV_E / dt = -V_S / R$

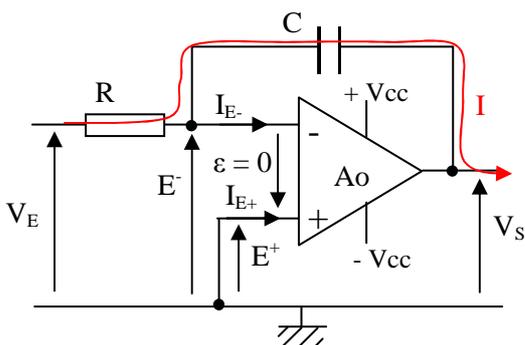
Donc :

$$V_S = -R \cdot C \cdot \frac{dV_E}{dt}$$

Le signal de sortie est proportionnel à la dérivée par rapport au temps du signal d'entrée.



1.7.2. Le montage intégrateur



- $\varepsilon \approx 0 \rightarrow E^+ \approx E^- = 0$ (E^+ à la masse)
 - $I_{E+} \approx I_{E-} \approx 0$ (pas de courants rentrants)
- L'entrée - est une masse virtuelle.

Aux bornes du condensateur : $V_C = -V_S$
Et $I = V_E / R = -C \cdot dV_S / dt$

On a : $dV_S / dt = -V_E / R \cdot C$

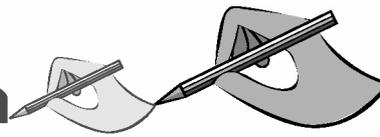
Donc :

$$V_S = -\frac{1}{R \cdot C} \int V_E \cdot dt$$

Le signal de sortie est proportionnel à l'intégrale par rapport au temps du signal d'entrée.



Autocorrection



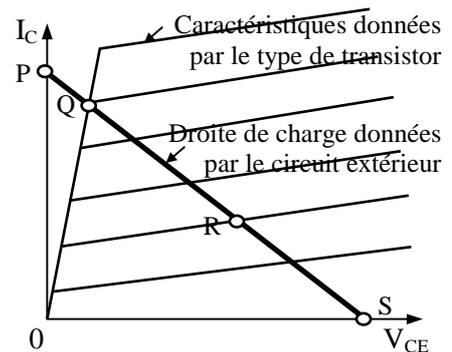
1.8. Exercices à résoudre

1 – Exercice sur le transistor

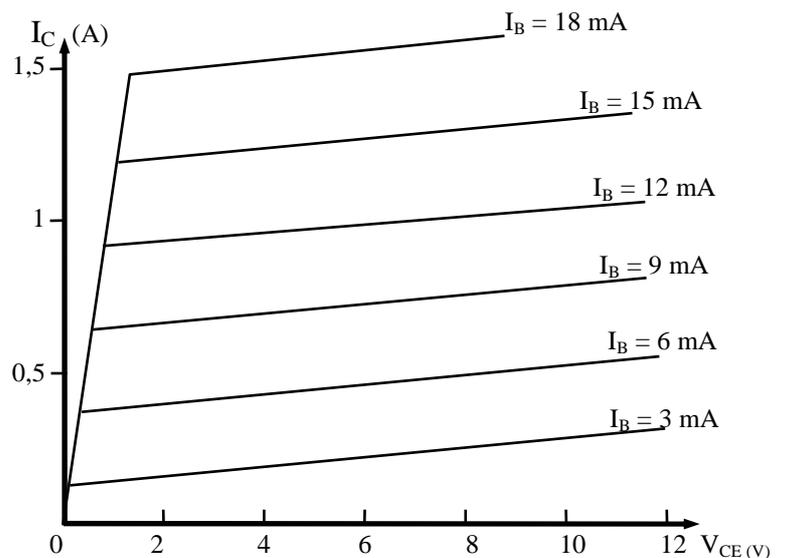
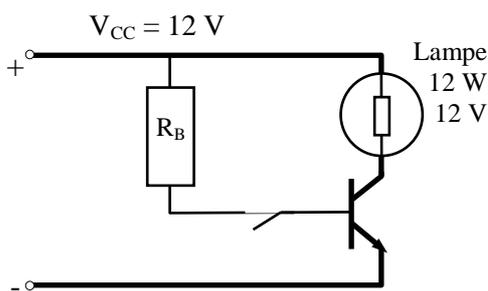
1° Compléter pour chacun des 4 points l'état du transistor : passant, saturé, court-circuité ou bloqué

Pour fonctionner au point

- P, il faut que le transistor soit :
- Q, il faut que le transistor soit :
- R, il faut que le transistor soit :
- S, il faut que le transistor soit :



2° Tracer la droite de charge de ce circuit



3° Placer le point A correspondant au fonctionnement en saturation et lire ses coordonnées :

Abscisse du point A : $V_{CE} =$ Ordonnée du point A $I_C =$

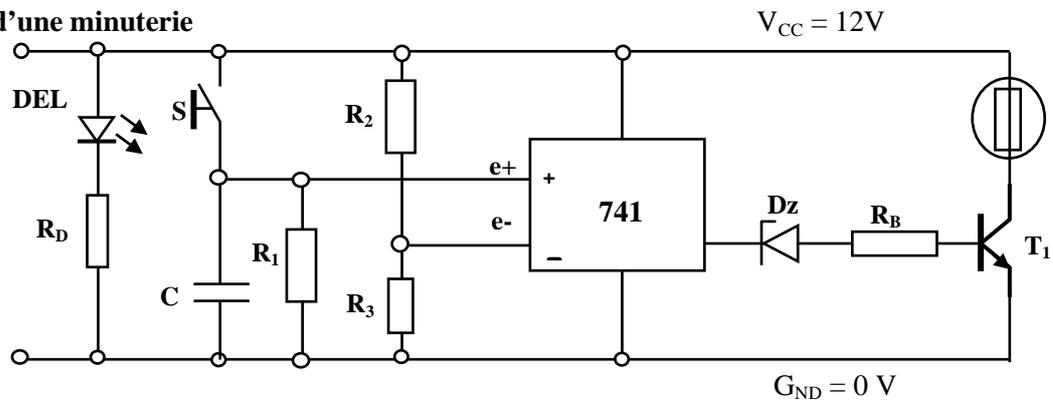
4° Choisir une intensité de base pour être sûr d'être saturé. I_B choisie =

5° En déduire la valeur de la résistance de protection de la base :

6° Entourer la valeur choisie dans la série E 12 : 10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82

2 – Exercice sur l'amplificateur opérationnel

Réalisation d'une minuterie



On donne : $R_1 = 47 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$; $R_3 = 33 \text{ k}\Omega$; $C = 1000 \text{ }\mu\text{F}$
 $V_{CC} = 12 \text{ V}$; $V_{Dz} = 3,9 \text{ V}$; $V_{KA} = 24 \text{ V}$
 $V_{S741 \text{ Etat } 1} = 11 \text{ V}$; $V_{S741 \text{ Etat } 0} = 2 \text{ V}$
 Transistor : 1N1711 ; DEL Rouge 1,8 V 20 mA

1° Décrire ce qui se passe à partir du moment où l'on actionne le bouton poussoir S.

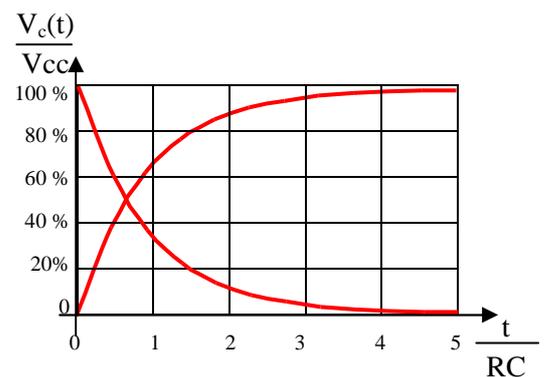
2° Quelle est la valeur de la tension e- présente sur la borne - du 741 ?

3° Quelle est la valeur de la tension aux bornes de C lorsque la sortie du CI 741 change d'état

4° En déduire le rapport t/τ

5° Calculer la constante de temps

6° En déduire le temps au bout duquel la lampe s'éteint.



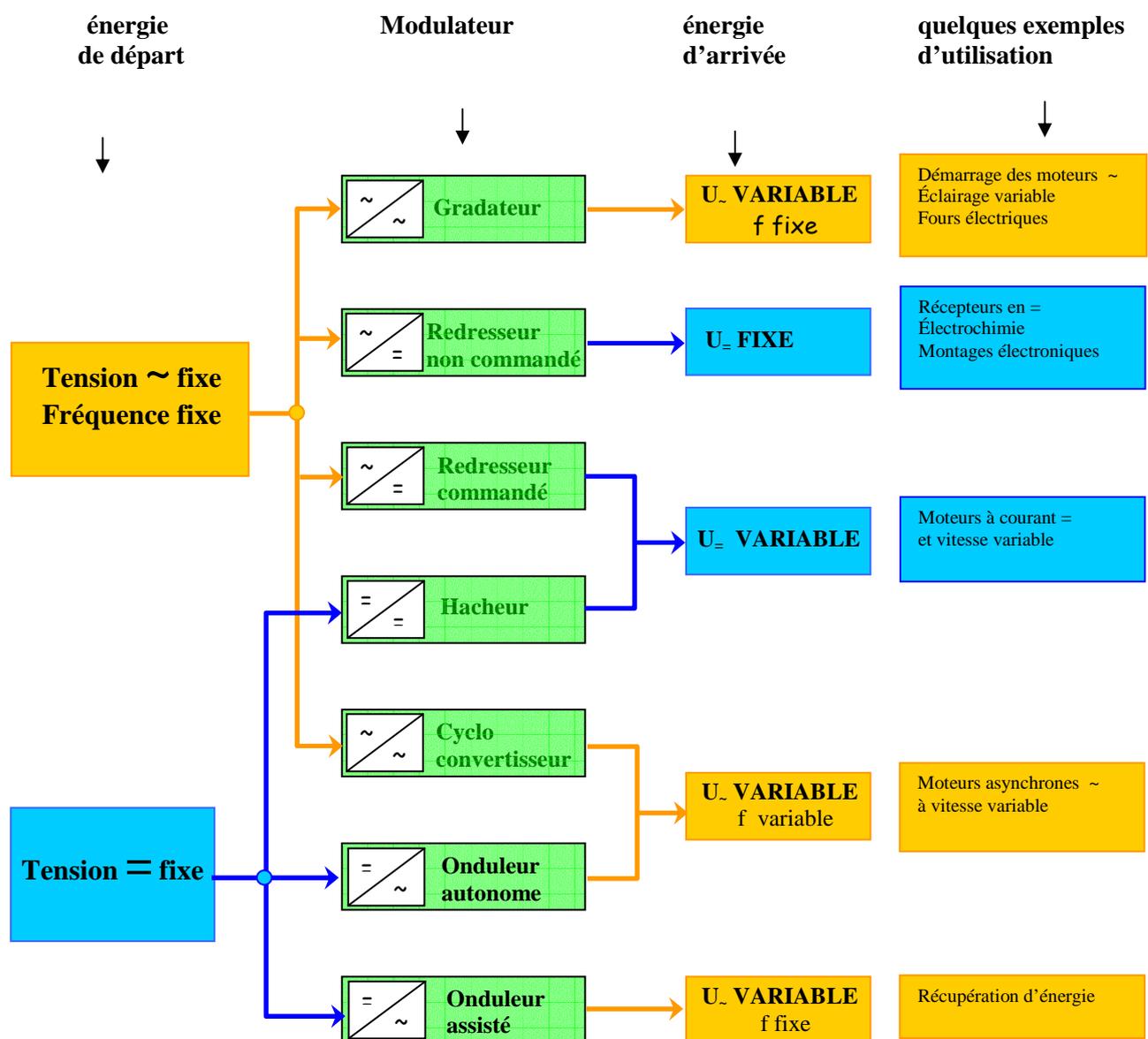
7° Déterminer la valeur de R_B pour un courant de base de 5 mA (série E12)

8° Quel est le rôle de la diode Zener ?

Travail personnel

2. LES MODULATEURS D'ENERGIE

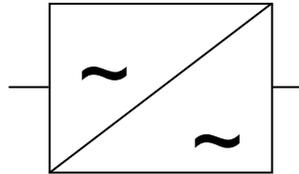
La « mission » de l'électronique de puissance est de convertir une énergie électrique de départ en une énergie électrique de tension, fréquence ou type de courant (\sim ou $=$) différents, de valeur variable ou fixe.



2.1. Le gradateur

La « mission » d'un gradateur est de fournir, à partir d'un courant alternatif de tension fixe, une tension alternative de valeur réglable.

Symbole d'un gradateur

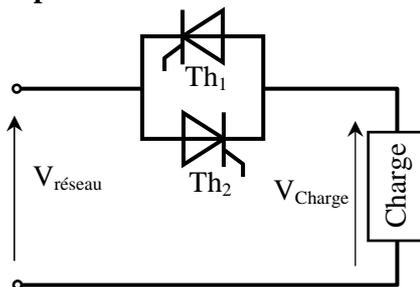


Remarque : Ce symbole peut-être aussi celui d'un transfo par exemple ou même d'un variateur de vitesse électronique à courant alternatif, mais dans un transfo la tension de sortie est fixe et dans un variateur électronique la fréquence aussi est variable.

Il existe deux sortes de gradateur :

2.1.1. Gradateur à angle de phase

Principe



Les gâchettes des thyristors sont commandées avec un retard $\alpha \cdot T / 2\pi$ compris entre 0 et $T / 2$ correspondant à un angle de phase ou angle d'amorçage compris entre 0 et π radians.

Si $\alpha = 0$, la sinusoïde est complète.

$$V_{\text{Charge}} = V_{\text{réseau}}$$

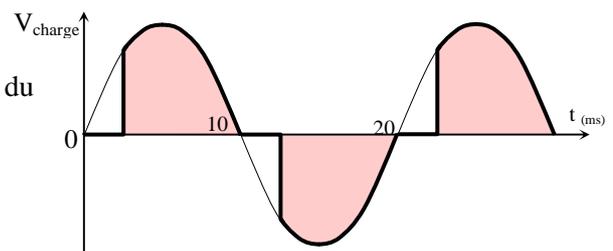
Si $\alpha = \pi$, les thyristors sont amorcés au moment du

changement d'alternance.

$$V_{\text{Charge}} = 0$$

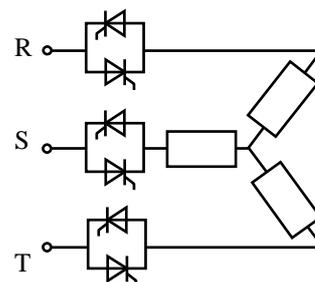
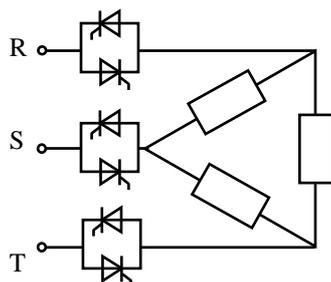
Pour α quelconque,

$$V_{\text{Charge}} = V_{\text{réseau}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

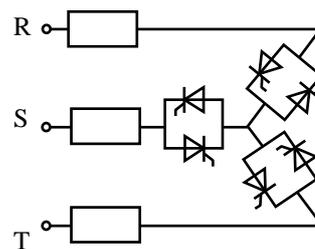
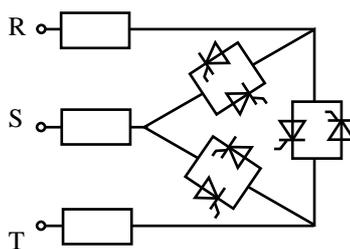
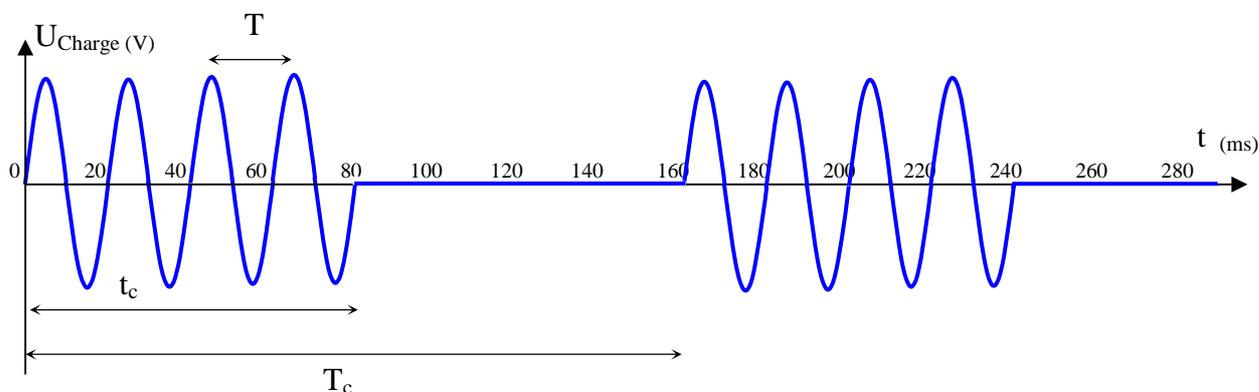


En triphasé

Le gradateur peut être entre la source et le récepteur



ou encore en aval du récepteur

**2.1.2. Gradateur à trains d'ondes****Principe**

On laisse passer le courant pendant un nombre n entier de périodes : c'est t_c , le **temps de conduction**.

Ensuite on bloque le gradateur à l'occasion d'un passage à 0, puis on laisse passer de nouveau pendant le temps t_c , etc... Chaque série de n alternances est appelée **train d'onde**. Le temps qui sépare les débuts (ou les fins) de deux trains d'ondes est désigné par **T_c** . C'est la **période de commande**.

Plus t_c se rapproche de T_c et plus U_{charge} est proche de $U_{réseau}$. Pour exprimer cela on a défini **τ , le rapport cyclique** : $\tau = t_c / T_c$ avec $0 \leq \tau \leq 1$

Pour obtenir la puissance moyenne fournie au récepteur, il suffit d'écrire :

$$P_{\text{moy}} = \tau \cdot P_{\text{ nominale}}$$

2.1.3. Choix d'un gradateur

Premier critère : la puissance

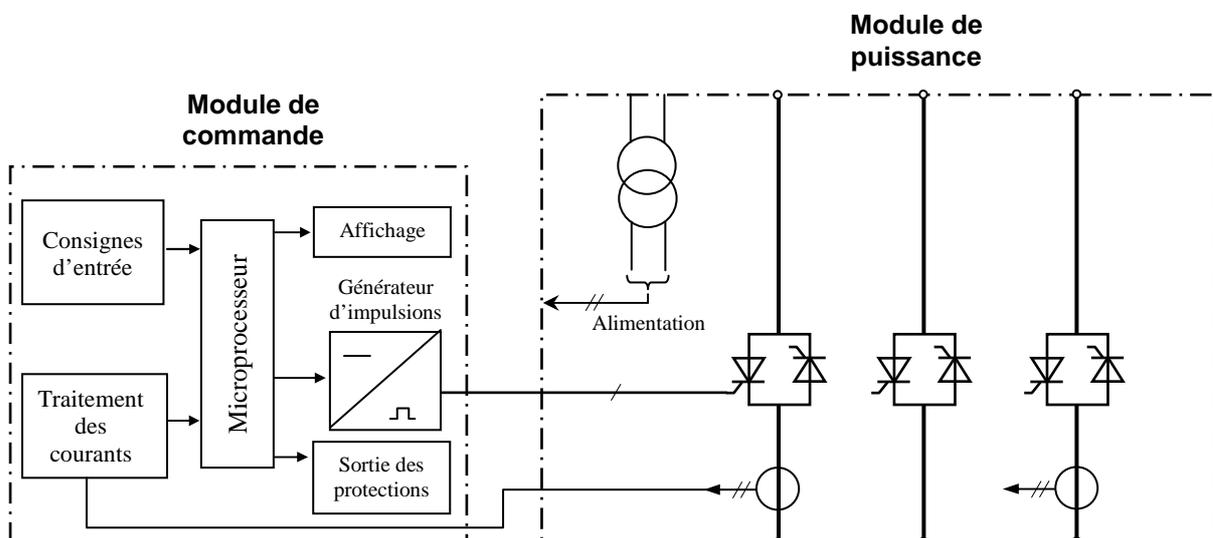
Jusqu'à 3 kW, on peut utiliser un triac.
Au-delà, deux thyristors tête-bêche.

Second critère : le type de récepteur

À la différence d'un résistor, un moteur a besoin d'être alimenté régulièrement.
Pour ce dernier, on préférera donc un gradateur à angle de phase qui assure un « morceau d'alternance » à chaque demi-période.
Pour le chauffage et l'éclairage en revanche, le gradateur par trains d'ondes est très bien adapté.

	Éclairage - chauffage	Démarrage de moteur en ~
Petite puissance	Triac ou thyristors Angle de phase	Triac ou thyristors Angle de phase
Moyenne & grosse puissances	Thyristors Trains d'ondes	Thyristors Angle de phase

2.1.4. Exemple de démarreur progressif

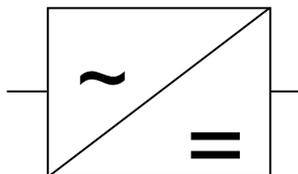


Ce genre de démarreur permet par exemple de contrôler l'accélération et la décélération du moteur, de limiter son courant de démarrage, de permettre le freinage par injection de courant continu.

2.2. Le redresseur non commandé

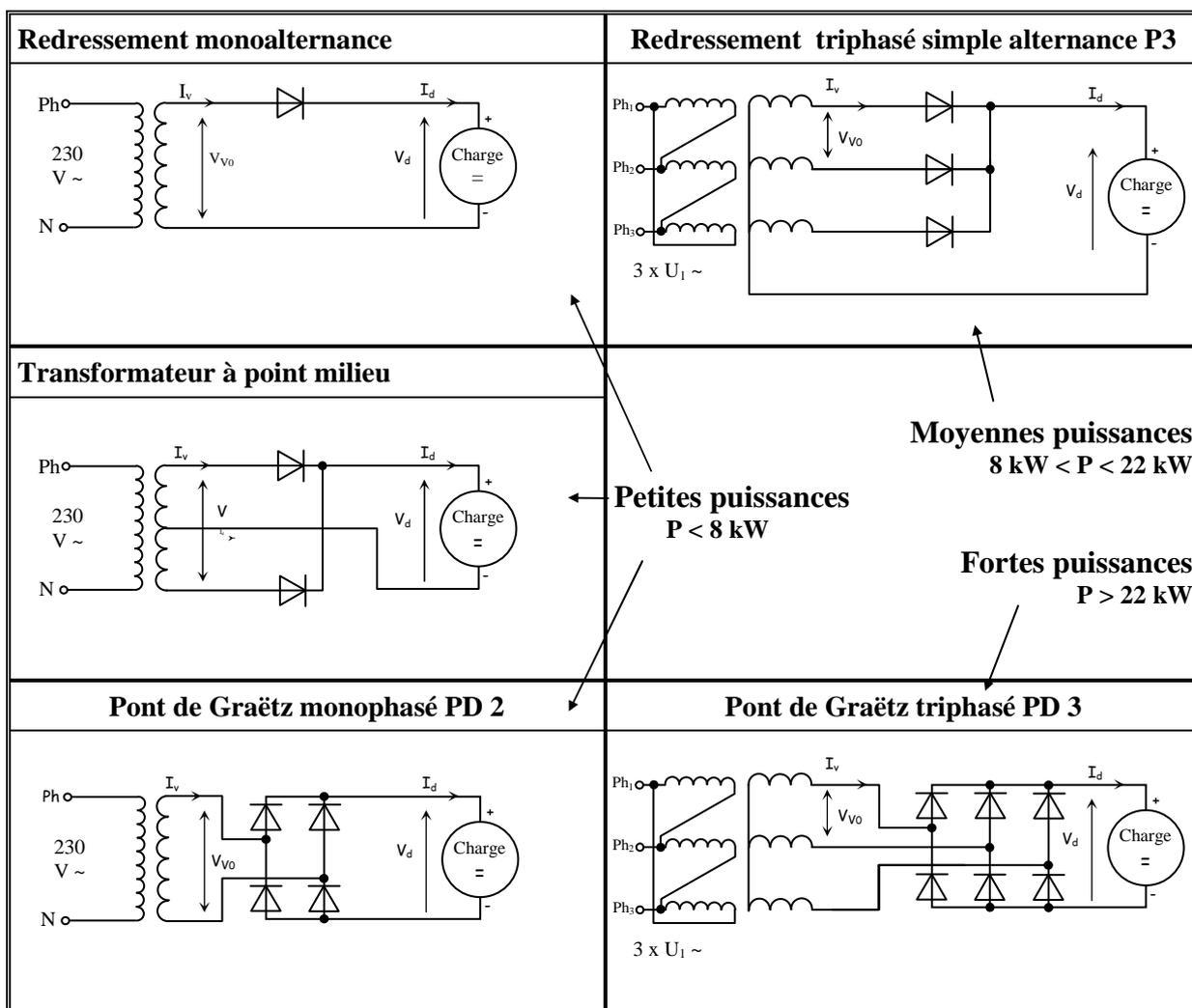
Le but du redressement est d'obtenir, à partir d'un courant alternatif, un courant unidirectionnel le plus proche possible du courant continu et adapté en tension.

Symbole d'un pont redresseur



On le dit « non commandé » car, une fois le type de montage choisi, on ne peut pas agir sur la tension de sortie. Elle ne dépend que de la tension d'entrée (et dans une moindre mesure de la charge).

Les cinq montages de base

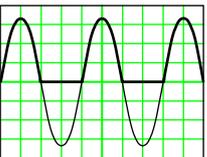
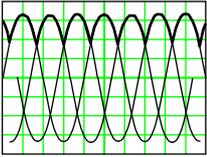
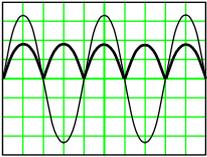
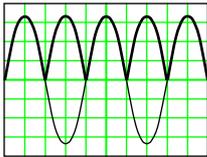


Tension d'entrée – tension de sortie (formes et valeurs)

Tension d'entrée : tension efficace au secondaire du transfo, notée V_{V0} sur les schémas

Tension de sortie : tension moyenne aux bornes de la charge, notée V_d .

(souvent, les récepteurs alimentés par pont redresseur sont des récepteurs polarisés avec ou sans f.é.m., c'est pourquoi on prend en compte la tension moyenne et non la tension efficace qui concerne l'effet joule et donc plutôt les résistors).

Monophasé		Triphasé	
Monoalternance		Simple alternance P3	
$V_d = V_{V0max} / \pi$ $= \sqrt{2} \cdot V_{V0} / \pi$		$V_d = 3 \cdot V_{V0max} / 2 \pi$ $= 3 \sqrt{2} \cdot V_{V0} / 2 \pi$	
À point milieu			
$V_d = V_{V0max} / \pi$ $= \sqrt{2} \cdot V_{V0} / \pi$			
Pont de Graëtz PD2		Pont de Graëtz PD3	
$V_d = 2 \cdot V_{V0max} / \pi$ $= 2 \sqrt{2} \cdot V_{V0} / \pi$		$V_d = 3 \cdot V_{V0max} / \pi$ $= 3 \sqrt{2} \cdot V_{V0} / \pi$	

Utilisation du tableau de correspondance courants / tensions

Le calcul des différentes grandeurs mises en jeu dans un montage redresseur peut s'avérer fastidieux, aussi, pour chacun des montages, on peut déterminer la grandeur désirée -tension, intensité, puissance- à partir des valeurs moyennes de sortie du pont V_d ou I_d .

Exemple 1 : Quelle tension alternative doit-on avoir au secondaire d'un transfo pour obtenir une tension moyenne de 24 V à la sortie d'un pont PD2 ? On connaît $V_d = 24$ V et on cherche V_{V0} .

Sur le tableau, on lit $V_{V0} / V_d = 1,11$, donc
 $V_{V0} = 1,11 \times V_d = 1,11 \times 24 \quad V_{V0} = 26,6$ V

Exemple 2 : Quels sont les courant I_0 et tension V_{RRM} pour une diode d'un pont redresseur P3 qui alimente une charge $I_d = 10$ A sous $V_d = 200$ V

Sur le tableau, on lit $V_{RRM} / V_d = 2,10$, donc
 $V_{RRM} = 2,10 \times V_d = 2,10 \times 200 \quad V_{RRM} = 420$ V
 $I_0 / I_d = 0,333$, donc $I_0 = 3,33$ A

Remarquons que V_{RRM} n'est autre que V_{V0max} .

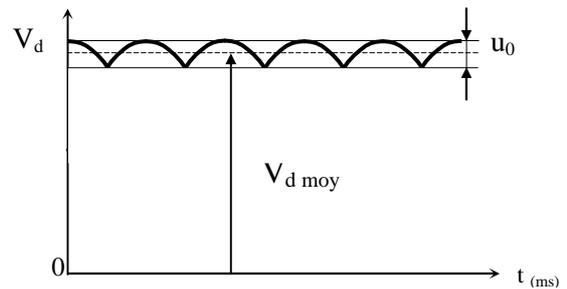
	Mono alt ^{ernance}	Point milieu	PD2	P3	PD3
V_{RRM} / V_d	3,14	3,14	1,57	2,10	1,05
V_{V0} / V_d	2,22	2,22	1,11	1,48	0,74
I_{FRM} / I_d	3,14	1,57	1,57	1,21	1,05
I_0 / I_d	1	0,5	0,5	0,333	0,333

	Mono alt ^{ernance}	Point milieu	PD2	P3	PD3
V_{RRM} / V_d	3,14	3,14	1,57	2,10	1,05
V_{V0} / V_d	2,22	2,22	1,11	1,48	0,74
I_{FRM} / I_d	3,14	1,57	1,57	1,21	1,05
I_0 / I_d	1	0,5	0,5	0,333	0,333

Taux d'ondulation

Noté parfois η (éta) ou encore β (bêta), il est de 0 % pour un courant continu et devient d'autant plus grand que le signal est mauvais.

$$\eta = \frac{u_0 \text{ eff}}{V_d \text{ moy}}$$

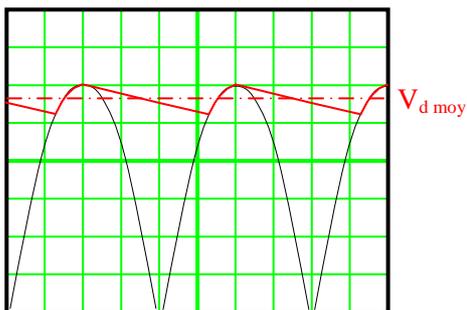


Plus le récepteur exige un courant "propre" et plus ce taux devra être bas (ex : pont PD3).

Filtrage et lissage

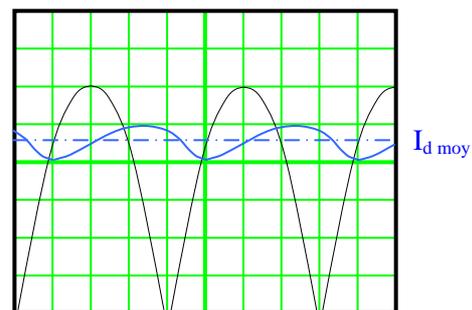
Pour améliorer le taux d'ondulation, on peut "filtrer" la tension de sortie en plaçant un condensateur en parallèle et/ou la "lisser" à l'aide d'une self (bobine) de lissage placée en série avec le récepteur. Le condensateur est d'autant plus efficace que l'intensité c'est à dire la charge est faible alors que la self n'agit que s'il y a du courant (comme toute bobine, elle s'oppose aux variations du flux créées par les variations du courant).

Effets du condensateur seul sur la tension de sortie



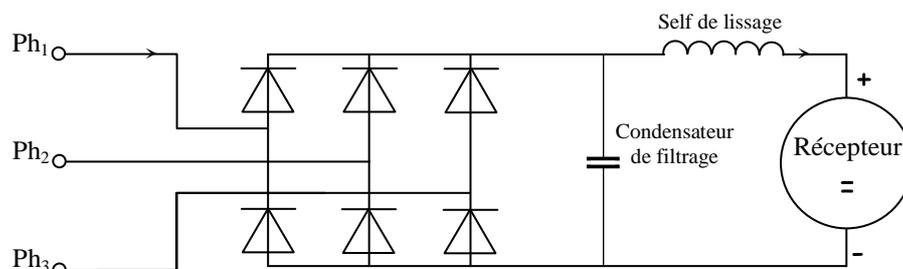
La tension "atterit" d'autant plus bas que la charge est grande et la "voilure" du condensateur petite.

Effets de la bobine seule sur la tension de sortie



La bobine gêne la croissance du courant et empêche son passage par zéro, de plus elle le "retarde", elle le "décale" vers la droite

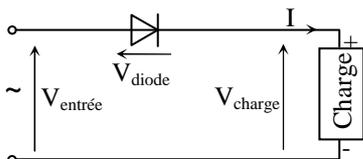
Exemple de récepteur à courant continu alimenté par un pont de Graëtz triphasé PD 3 avec condensateur de filtrage et bobine de lissage



Analyse du fonctionnement d'un système simple : pont redresseur monoalternance

- 1^{er} principe : la loi des branches (ou la loi des mailles)
se vérifie à chaque instant : $V_{\sim \text{entrée}} = V_{\text{diode}} + V_{\text{charge}}$
- 2^{ème} principe : quand la diode est passante $V_{\text{diode}} \approx 0$
- 3^{ème} principe : quand la diode est bloquée $V_{\text{diode}} \approx \text{pleine tension}$ $I_{\text{diode}} = 0$
- 4^{ème} principe : la tension RI aux bornes d'un résistor est "l'image" du courant I.

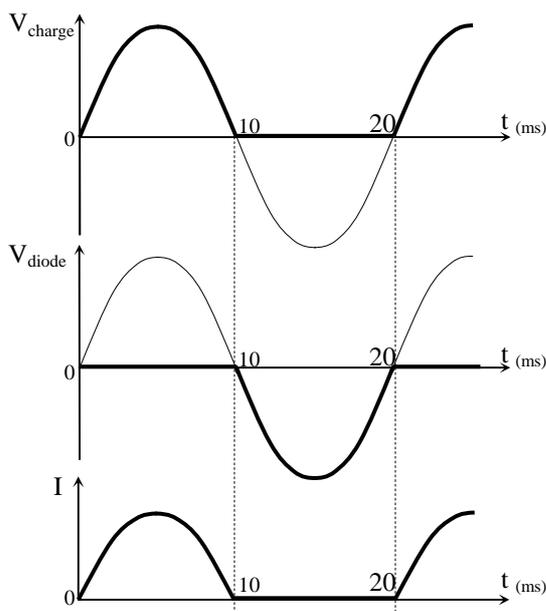
Débit sur charge résistive



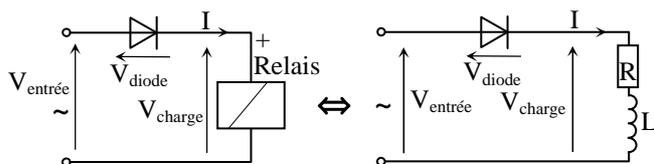
Pendant 10 ms, la diode est passante, V_{diode} est nulle, toute la tension d'entrée est aux bornes de la charge.

Le courant a la même forme que la tension V_{charge} ($V_{\text{charge}} = RI$).

Pendant alternance négative, la diode se bloque. C'est une coupure donc $V_{\text{diode}} = V_{\text{entrée}}$, il ne "reste" plus rien pour la charge, donc $V_{\text{charge}} = 0$ et bien sûr, $I = 0$



Débit sur charge inductive

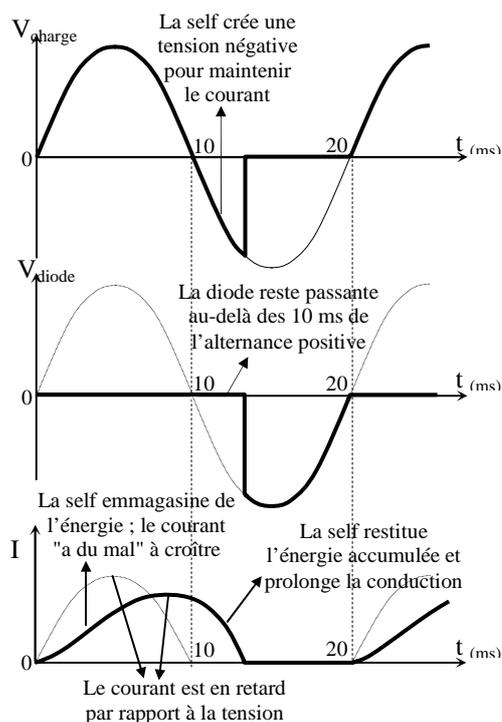


Un relais est fait de fil de résistance R ; ce fil est bobiné, il a donc une inductance L. On dira que le schéma équivalent d'un relais est un circuit RL série.

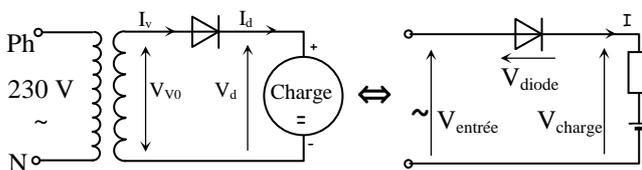
On sait déjà qu'une bobine retarde l'établissement du courant et qu'elle s'oppose à sa disparition (Loi de Lenz).

On peut l'expliquer en disant qu'elle emmagasine de l'énergie, avant de la restituer.

Elle crée une f.é.m. éphémère $e = -L \cdot di/dt$



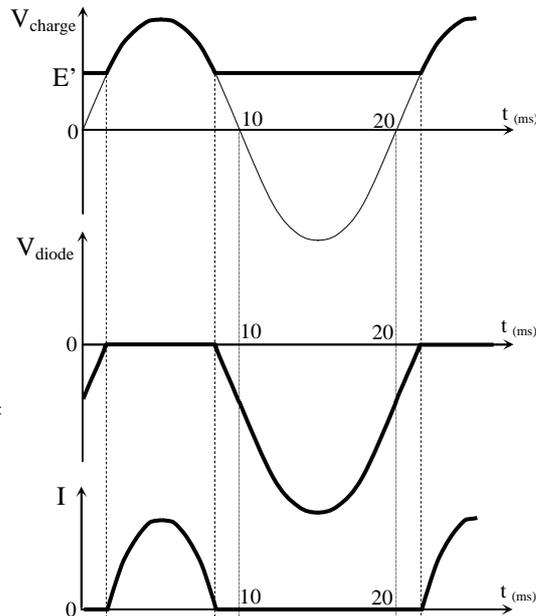
Débit sur charge avec f.c.é.m.



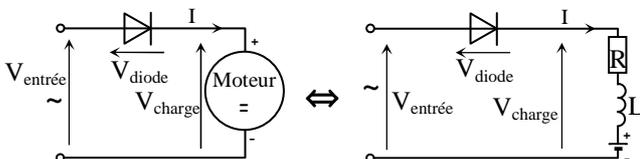
Pendant l'alternance positive, la diode reste bloquée tant que la tension ne dépasse pas la f.c.é.m. de la charge .

Le courant a la même forme que la tension V_{charge} ($V_{charge} = E' + RI$) mais décalé vers l'axe des abscisses.

Pendant l'alternance négative et quand $V_{entrée} < E'$, la diode se bloque. C'est une coupure donc $V_{diode} = V_{entrée}$, il ne "reste" plus rien pour la charge, donc $V_{charge} = 0$ et bien sûr, $I = 0$



Débit sur charge RLE résistive et inductive à f.c.é.m.

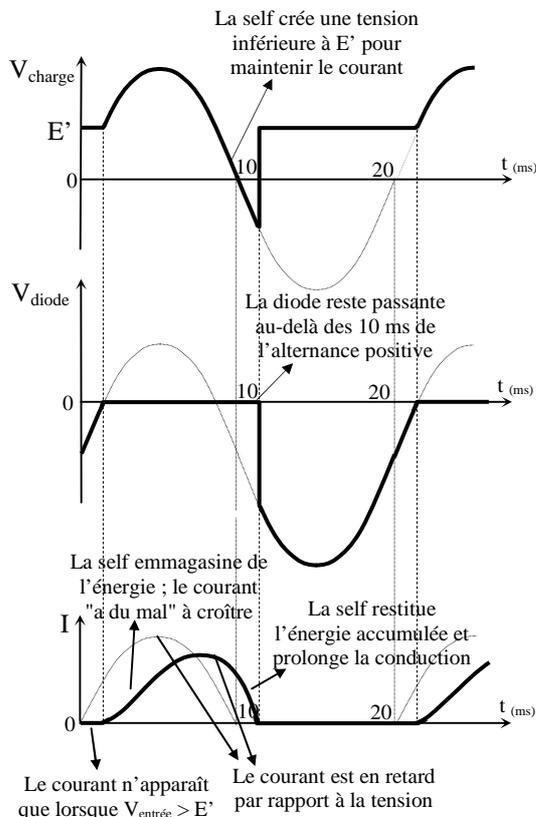


Un moteur est fait de fil de résistance R ; ce fil est bobiné, il a donc une inductance L. Avec la vitesse, on voit apparaître une f.c.é.m. $E' = nN\Phi$. On dira que le schéma équivalent d'un moteur est un circuit RLE série.

La f.c.é.m. empêche le courant de passer tant que $V_{entrée}$ n'est pas supérieure à E' .

L'inductance crée une tension induite négative pour "prolonger" le courant dans le moteur, retarder sa disparition.

Si on place en parallèle une diode de roue libre (DRL), les caractéristiques V_{charge} et V_{diode} sont les mêmes que pour un récepteur à f.c.é.m. car au-delà de 10 ms, c'est la DRL qui devient passante et comme elle est en parallèle avec la charge V_{charge} devient nulle donc $V_{diode} = V_{entrée}$



2.3. Le redresseur commandé

Le redressement simple ne permet pas de régler la tension de sortie. Un pont redresseur commandé va permettre de faire varier la valeur de cette tension en fonction du pont choisi et de son « retard » à la commande des thyristors.

Pont mixte – pont tout thyristor – symétrique – asymétrique

Pont redresseur non commandé (tout diode)	
<p> $V_d = 2 \cdot \frac{V_{Vomax}}{\pi}$ $= 2 \sqrt{2} \cdot \frac{V_{V_0}}{\pi}$ </p>	<p> $V_d = 3 \cdot \frac{V_{Vomax}}{\pi}$ $= 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{V_{V_0}}{\pi}$ </p>
Pont redresseur commandé mixte symétrique (par rapport à un axe vertical)	
<p> Dans le pont asymétrique, les diodes jouent le rôle de roue libre au moment du blocage des thyristors </p>	<p>Tension moyenne aux bornes de la charge</p> <p>Pont mixte :</p> $V_d \text{ pont mixte commandé} = V_d \text{ pont de diodes} \cdot \frac{(1 + \cos \alpha)}{2}$ <p>Pont complet (tout thyristor) :</p> $V_d \text{ pont complet commandé} = V_d \text{ pont de diodes} \cdot \cos \alpha$ <p>avec $-1 \leq \cos \alpha \leq +1$ et α angle de conduction du thyristor</p>
Pont redresseur complet ou pont tout thyristor (onduleur assisté)	

Angle d'amorçage α

Dès que sa tension V_{AK} est positive, une diode devient passante.

Pour qu'un thyristor devienne passant, il faut en plus envoyer une impulsion V_{GT} sur sa gâchette.

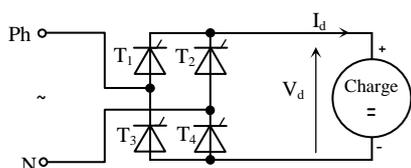
Ce « retard » entre une diode et un thyristor est appelé **angle d'amorçage** ou **angle de retard**

Il se note α et se mesure en **radians**. Pour le convertir en temps, il suffit de le multiplier par $T / 2 \pi$.

Il varie de 0 à π (au-delà de toutes façons, $V_{AK} < 0$ V).

Dans le langage courant, on peut aussi l'exprimer directement en $^\circ$ ou en ms.

($0^\circ < \alpha < 180^\circ$; $0 \text{ ms} < \alpha < 10 \text{ ms}$ pour une fréquence de 50 Hz)

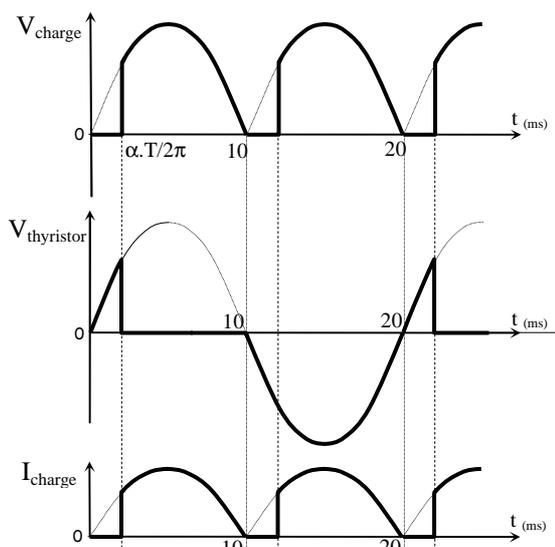


Caractéristiques f(t)

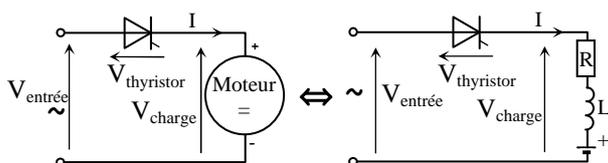
$V_{charge} = f(t)$: la tension redressée est « rognée » par le retard à l'amorçage.

$V_{thyristor} = f(t)$: elle est égale à $V_{entrée}$ sauf quand le thyristor est passant ($V_{thyristor} = 0$ V).

$I_{charge} = f(t)$: dans un résistor elle a la même forme que la tension V_{charge} (loi d'Ohm).



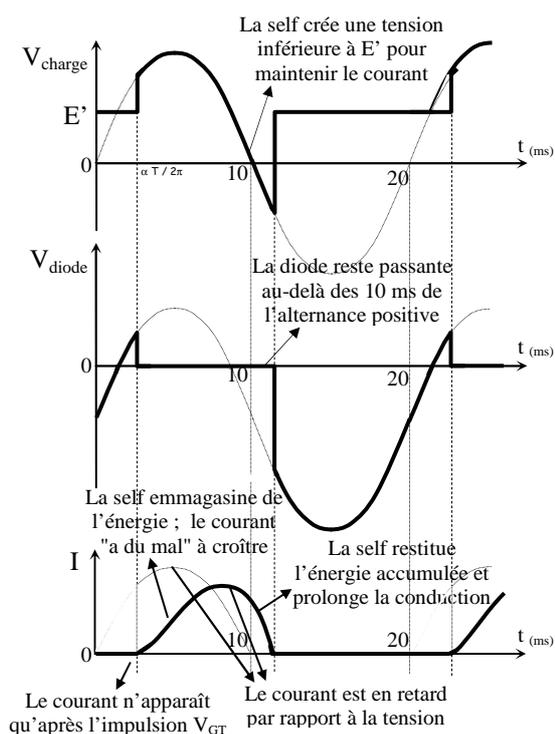
Redressement commandé monoalternance sur charge RLE résistive et inductive à f.c.é.m.



Un moteur est fait de fil de résistance R ; ce fil est bobiné, il a donc une inductance L . Avec la vitesse, on voit apparaître une f.c.é.m. $E' = nN\Phi$. On dira que le schéma équivalent d'un moteur est un circuit RLE série.

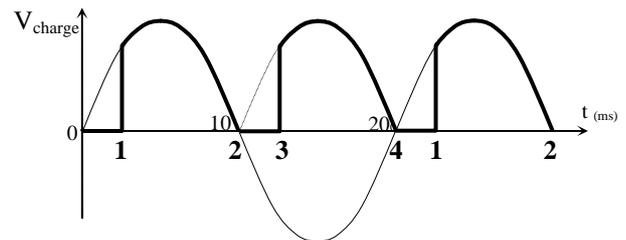
La f.c.é.m. empêche le courant de passer tant que $V_{entrée}$ n'est pas supérieure à E' . Mais il faut encore que la gâchette ait reçu une impulsion V_{GT} .

L'inductance crée une tension induite négative pour "prolonger" le courant dans le moteur, retarder sa disparition.

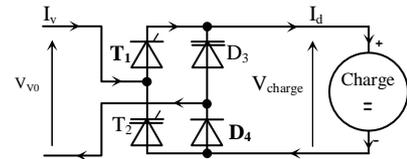


Analyse du fonctionnement d'un pont de Graëtz mixte asymétrique :

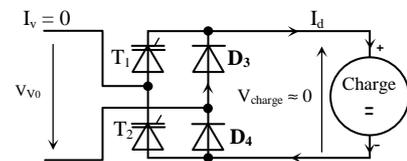
prenons par exemple $\alpha = \pi / 4 = 45^\circ$ c'est à dire $2\pi / 8$ donc l'impulsion de gâchette sera donnée avec un retard de $T / 8$ soit 2,5 ms.



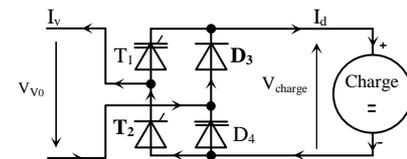
Au repère 1 : $t = 2,5$ ms, impulsion sur la gâchette de T_1
 T_1 devient passant, D_4 aussi.



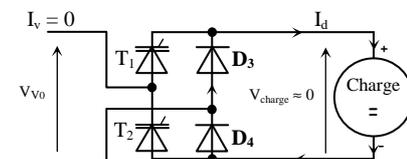
Au repère 2 : $t = 10$ ms, T_1 se bloque ($V_{AK} < 0$), mais le courant « veut » continuer (charge inductive)
 D_3 devient passante, D_4 le reste. Le courant « tourne court ». (roue libre)



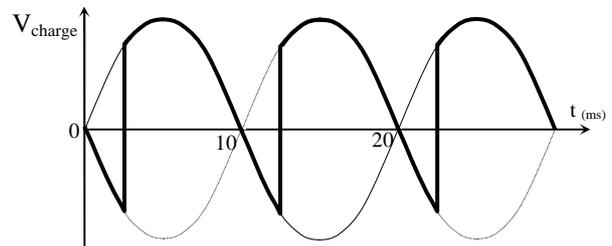
Au repère 3 : $t = 12,5$ ms, impulsion sur la gâchette de T_2
 T_2 devient passant, D_3 aussi.



Au repère 3 : $t = 20$ ms, T_2 se bloque ($V_{AK} < 0$), mais le courant « veut » continuer (charge inductive)
 D_4 devient passante, D_3 le reste. Le courant « tourne court ». etc.



Remarques : dans la charge, il y a un courant I_d en permanence.
 quand les deux thyristors sont bloqués, D_3 et D_4 jouent le rôle de roue libre.
 si le pont était « tout thyristor », voici ce que deviendrait la courbe $V_{charge} = f(t)$:
 la tension devient négative



Conclusion :

dans un pont mixte,

$0 \leq V_{charge} \leq + V_{V0 \max}$

donc $0 \leq V_d \text{ moy} \leq V_d \text{ moy pont de diodes}$

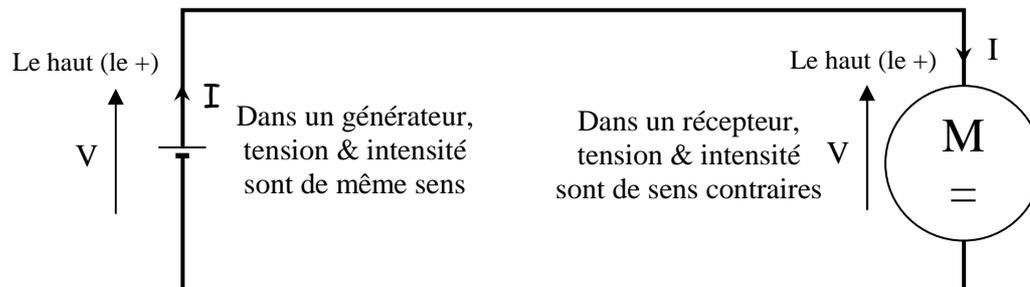
dans un pont complet,

$- V_{V0 \max} \leq V_{charge} \leq + V_{V0 \max}$

donc $- V_d \text{ moy pont de diodes} \leq V_d \text{ moy} \leq V_d \text{ moy pont de diodes}$

2.4. L'onduleur assisté

On différencie un récepteur d'un générateur par l'orientation des flèches tensions et intensités :



Dans un pont redresseur, le courant dans la charge est toujours de même sens en raison de la polarisation des composants (thyristors ou diodes).

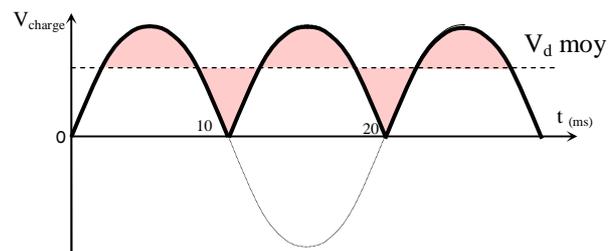
Mais nous venons de voir que la variation de tension dépendait du type de pont et que selon l'angle d'amorçage, **dans le pont tout thyristor, la tension moyenne $V_{d \text{ moy charge}}$ peut devenir négative** : le récepteur devient donc générateur

Cas n° 1 $\alpha = 0$, l'impulsion de gâchette se fait avec la commutation naturelle

Les thyristors se comportent comme des diodes donc

$$V_{d \text{ moy}} = \cos 0 \cdot 2 V_{V_o \text{ max}} / \pi$$

$$V_{d \text{ moy}} = 2 \cdot V_{V_o \text{ max}} / \pi$$



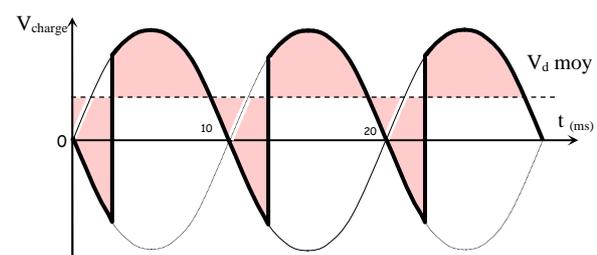
Cas n° 2 $\alpha = \pi / 4$, l'impulsion de gâchette se fait avec un retard de 2,5 ms

Pendant 5 ms par période, la tension V_{charge} devient négative.

La tension moyenne diminue :

$$V_{d \text{ moy}} = \cos \pi/4 \cdot 2 V_{V_o \text{ max}} / \pi$$

$$V_{d \text{ moy}} = 1,414 \cdot V_{V_o \text{ max}} / \pi$$



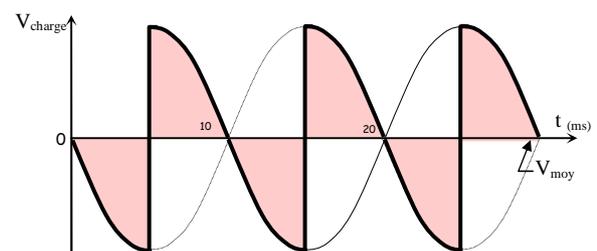
Cas n° 3 $\alpha = \pi / 2$, l'impulsion de gâchette se fait avec un retard de 5 ms

Pendant 10 ms par période (la moitié du temps), la tension V_{charge} est négative.

La tension moyenne diminue encore:

$$V_{d \text{ moy}} = \cos \pi/2 \cdot 2 V_{V_o \text{ max}} / \pi$$

$$V_{d \text{ moy}} = 0 \times 2 V_{V_o \text{ max}} / \pi = 0$$

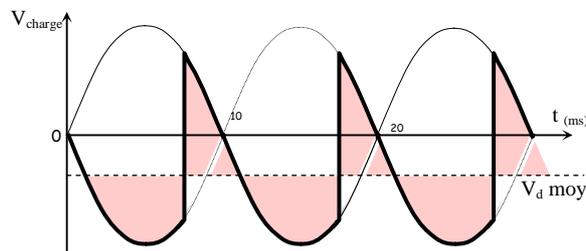


Cas n° 4 $\alpha = 3\pi/4$, l'impulsion de gâchette se fait avec un retard de 7,5 ms

Pendant 15 ms par période (trois quarts du temps), la tension V_{charge} est négative.
La tension moyenne diminue encore:

$$V_{d\ moy} = \cos 3\pi/4 \cdot 2 V_{Vo\ max} / \pi$$

$$V_{d\ moy} = -1,414 \cdot V_{Vo\ max} / \pi$$



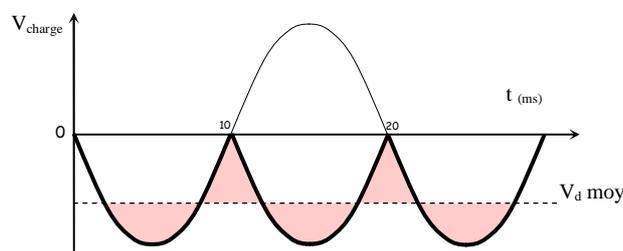
Cas n° 5 $\alpha = \pi$, l'impulsion de gâchette se fait avec un retard de 10 ms

Pendant toute la période, la tension V_{charge} est négative.

La tension moyenne devient :

$$V_{d\ moy} = \cos \pi \cdot 2 V_{Vo\ max} / \pi$$

$$V_{d\ moy} = -2 V_{Vo\ max} / \pi$$

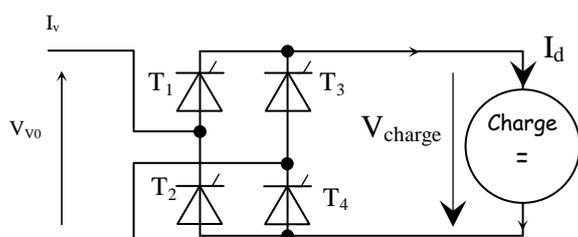


Reprenons l'analyse du montage dans le cas n° 5 :

L'intensité I_d ne peut tourner que dans le sens horaire (orientation des thyristors).

Dans la charge, elle « descend donc vers le bas »

La tension V_d est devenue négative. Elle est donc orientée « tête en bas ».



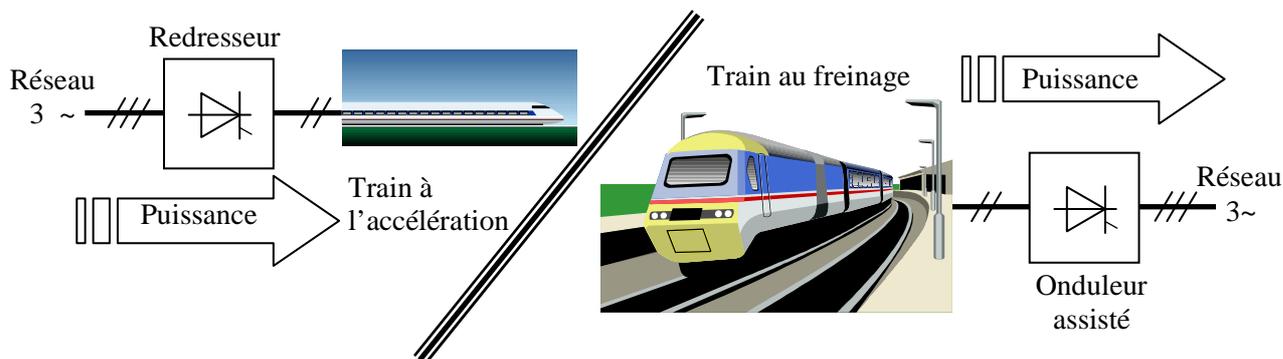
Tension et intensité sont de même sens,

le moteur est devenu générateur !

La machine à courant continu, injecte de la puissance dans le réseau alternatif monophasé.

Le pont redresseur lui aussi a donc changé de rôle et joue maintenant le rôle d'onduleur assisté.

Assisté parce que tension et fréquence sont obligatoirement imposées par le réseau.



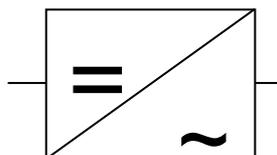
2.5. L'onduleur autonome

On a vu précédemment qu'un pont redresseur tout thyristor pouvait, en fonctionnant « à l'envers », injecter du courant alternatif sur le réseau quand la machine à courant continu qu'il alimentait est en phase de freinage ou de récupération d'énergie. On parle alors d'onduleur « assisté » car il a besoin de la présence d'un réseau pour fonctionner. Sa fréquence, en particulier, est imposée par ce réseau.

Au contraire, l'onduleur autonome crée une tension alternative variable (ou fixe), de fréquence variable (ou fixe) à partir d'une tension continue. Ils sont principalement utilisés dans deux cas : pour alimenter les moteurs à courant alternatif dont on veut faire varier la vitesse et pour obtenir de l'alternatif en site isolé avec des panneaux solaires ou des batteries.

Symbole d'un onduleur

ou de n'importe quel convertisseur continu → alternatif



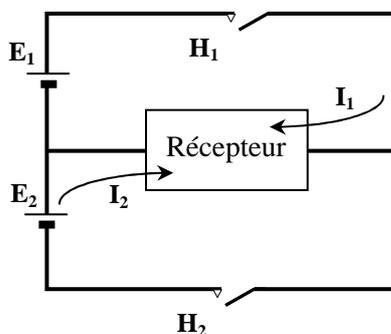
Principe de l'onduleur à point milieu

Dans un onduleur à point milieu, on dispose de deux sources de courant continu E_1 et E_2 qui vont fonctionner alternativement.

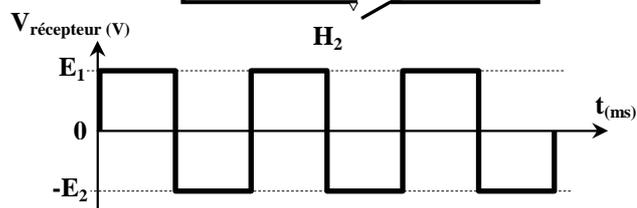
Pendant un t_1 , H_1 est fermé. Le courant rentre par la droite du récepteur.

Puis c'est H_2 pendant un temps t_2 , le courant pénètre dans le récepteur par la gauche, etc.

C'est bien un courant alternatif.



La tension obtenue est de forme carrée et non sinusoïdale :

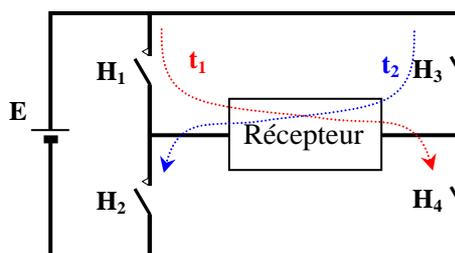


Onduleur monophasé en pont

On peut réduire l'alimentation à une seule source E avec quatre interrupteurs :

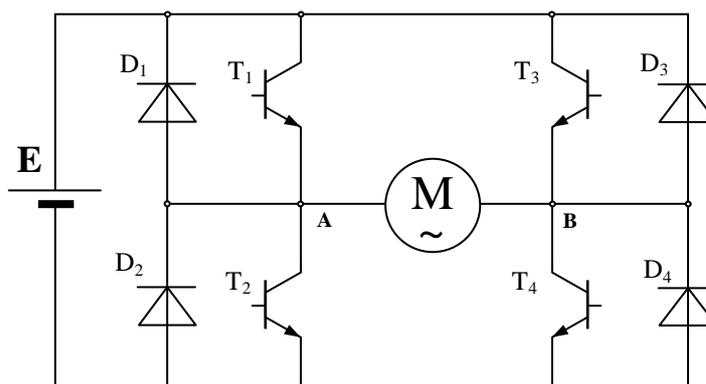
Il suffit de fermer simultanément H_1 et H_4 puis H_2 et H_3 (H_1 et H_4 ouverts évidemment), etc.

La tension $U_{\text{récepteur}}$ varie alors de $+E$ à $-E$.



Cas d'une charge inductive ou RLE

Si la charge est inductive (RL ou RLE), l'effet de self risque de créer une surtension à l'ouverture des interrupteurs. Comme toujours, la solution sera le montage de diodes de roue libre (D_1 , D_2 , D_3 , D_4) qui



permettent au courant de s'éteindre tranquillement avant de s'inverser.

Analyse du fonctionnement d'un onduleur en pont sur charge RLE

Les transistors T_1 et T_4 deviennent passants. Le courant traverse le moteur de gauche à droite ($A \rightarrow B$).

Au début du temps t_2 , on bloque T_1 et T_4 tandis que T_2 et T_3 sont polarisés mais ils ne peuvent pas encore conduire car le courant est inverse.

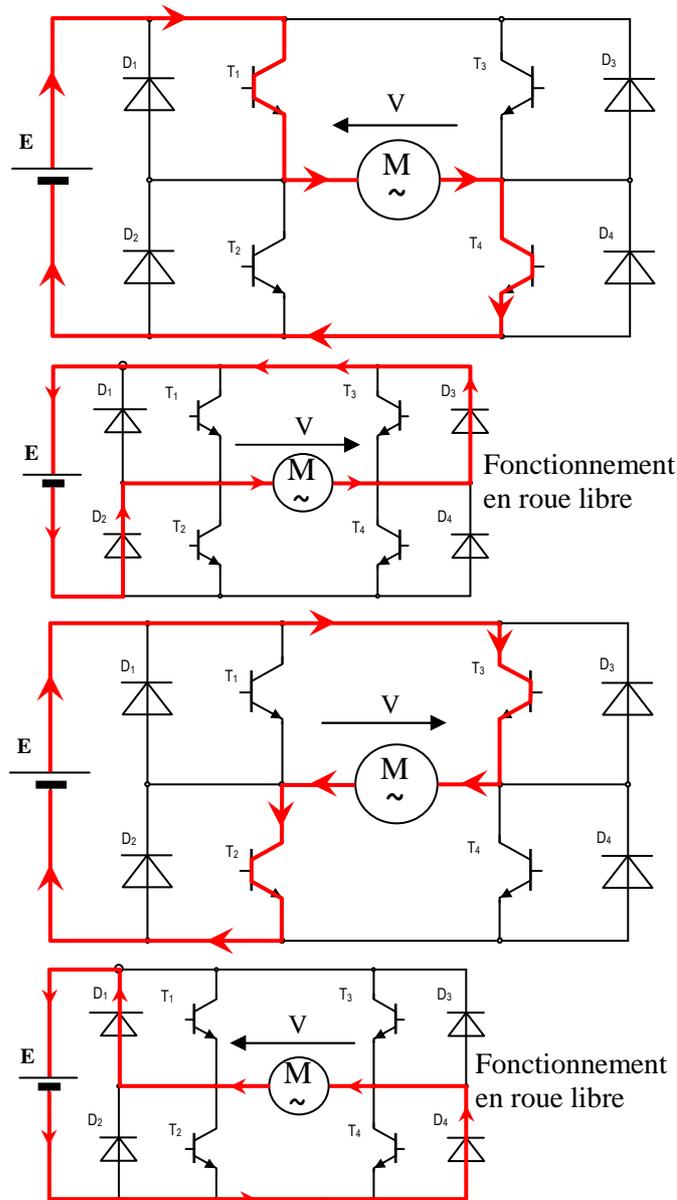
Le courant qui traverse E , D_2 & D_3 , s'éteint rapidement du fait de l'inversion de tension (transistors T_2 et T_3 passants).

Puis le courant s'inverse et traverse le moteur de droite à gauche ($B \rightarrow A$).

Au début du temps t_1 , on bloque T_2 et T_3 tandis que T_1 et T_4 sont polarisés.

Le courant change de circuit, passe par E , D_4 et D_1 et se calme rapidement avant de s'inverser

On revient alors à la situation de départ.

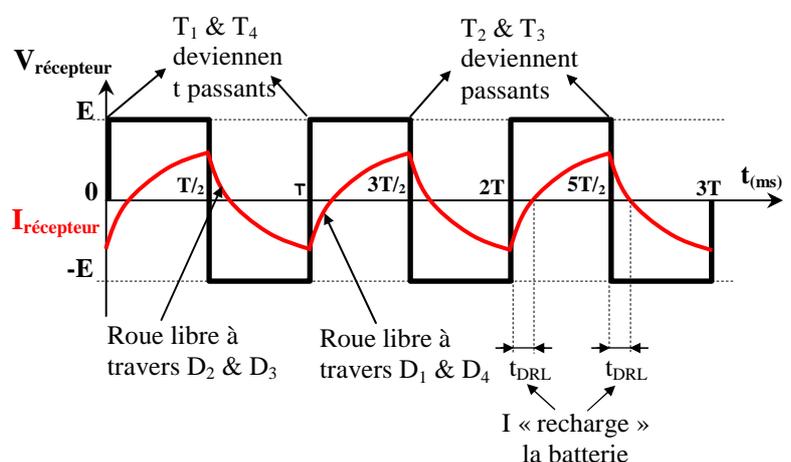


Tensions et intensités

La tension V a une forme carrée. L'intensité croît quand la tension est positive ($V = +E$) et décroît lorsqu'elle est négative ($V = -E$).

Quand deux transistors se bloquent à l'instant même où deux autres deviennent passants, on appelle cela une « commande adjacente ».

Il y a un risque d'avoir deux transistors d'une même branche qui conduisent simultanément (T_1 et T_2) créant ainsi un court-circuit.

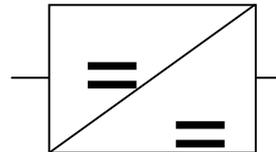


2.6. Le hacheur

Un hacheur a pour rôle de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Ils sont principalement utilisés pour alimenter les moteurs à courant continu dont on veut faire varier la vitesse.

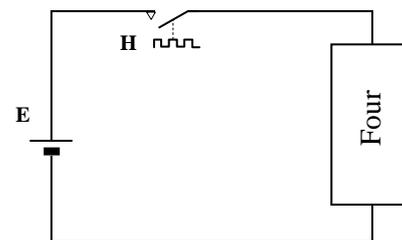
Symbole d'un hacheur

et de n'importe quel convertisseur continu → continu

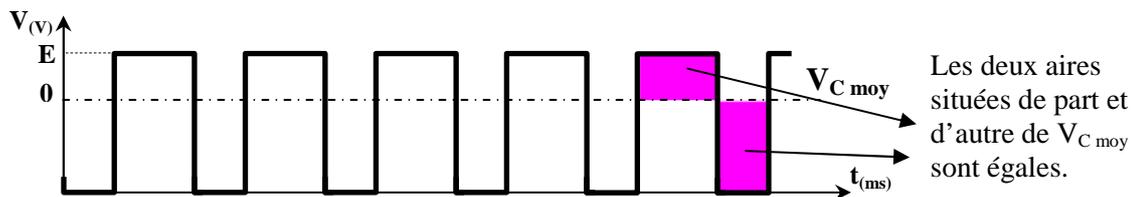


Principe du hacheur

Dans un circuit en courant continu, la gâchette d'un thyristor reçoit un courant I_G ou la base d'un transistor un courant I_B , il devient passant pendant un temps t_1 puis, la base n'est plus alimentée ou, grâce à un circuit de blocage, le thyristor se bloque pendant un temps t_2 . Ensuite, le composant H redevient passant pour un temps t_1 , etc.



Plus t_1 est grand devant t_2 et plus la tension moyenne $V_{C\text{ moy}}$ est grande. La somme $t_1 + t_2$ est notée T. C'est la période du phénomène.



On définit le **rapport cyclique α** comme : $\alpha = t_1 / T$ ou encore $\alpha = t_1 / (t_1 + t_2)$
C'est un nombre sans unité compris entre 0 et 1 ou bien entre 0% et 100 %.

Si E est la tension d'alimentation, on a alors :

$$V_{C\text{ moy}} = \alpha \cdot E$$

Il existe deux sortes de hacheur :

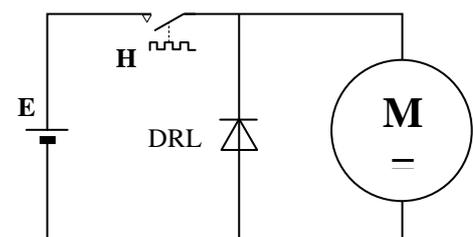
2.6.1. Le hacheur série (ou dévolteur)

La tension moyenne $V_{C\text{ moy}}$ aux bornes de la charge ne peut être que plus petite ou au maximum égale à la tension d'alimentation E.

Analyse du fonctionnement sur une charge RLE

Un transistor ou un thyristor se comporte comme un interrupteur électronique unidirectionnel. Pour le désigner par la suite, nous dirons l'interrupteur ou plus simplement H.

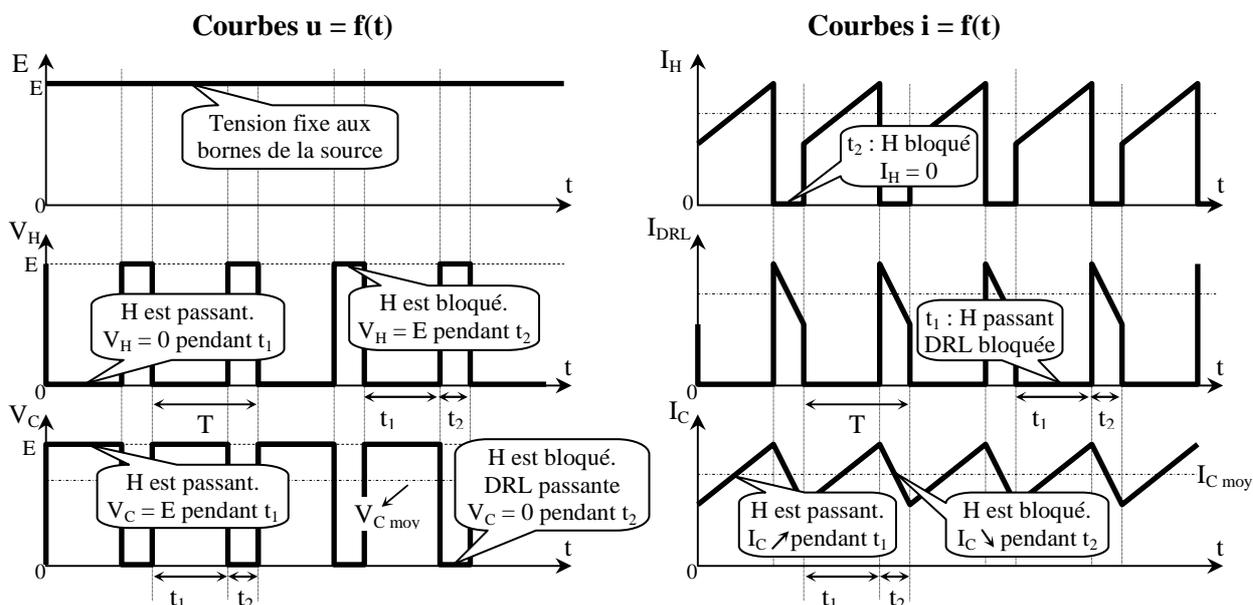
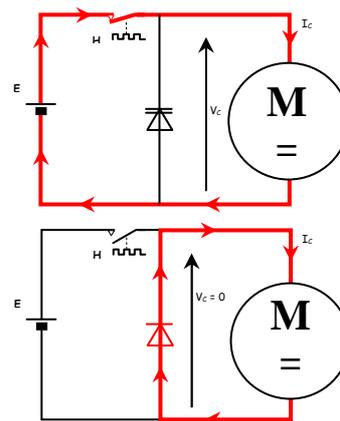
Avec une charge inductive, la DRL est indispensable pour éviter les surtensions à l'ouverture de l'interrupteur H.



Pendant un temps t_1 , H est fermé. La source E alimente la charge M. Dans le circuit extérieur, le courant I augmente.

Pendant le temps t_2 , H est ouvert. La charge inductive crée une tension induite $e = -L.di/dt$.

Le circuit extérieur est coupé le courant induit tourne court dans la diode de roue libre. La tension V_C est nulle (tension aux bornes d'une diode passante). Le courant va en décroissant.



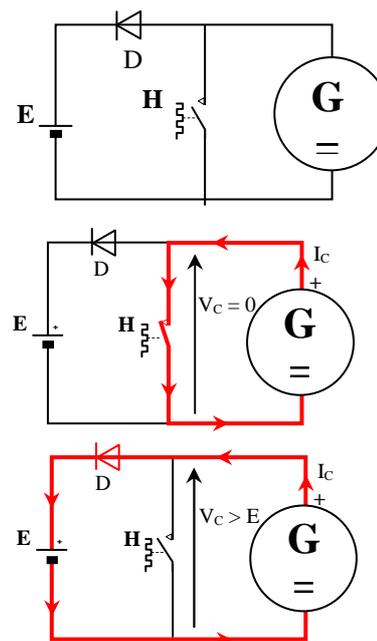
2.6.2. Le hacheur parallèle (ou survolteur)

En phase de freinage, il permet au moteur devenu génératrice de réinjecter de l'énergie dans la batterie. Contrairement au principe de l'onduleur assisté où le sens du courant était fixé une fois pour toutes, ici, c'est le courant qui s'inverse et rentre par le + de la batterie.

Pendant t_1 millisecondes, H est passant : la génératrice crée un fort courant dans le circuit court G-H. Sa bobine emmagasine de l'énergie. Soudain, H se bloque.

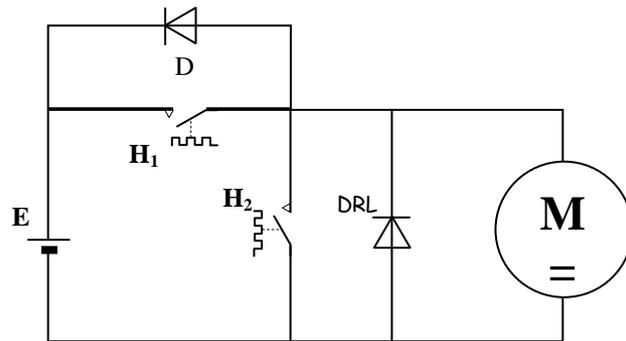
Pendant t_2 millisecondes, l'inductance restitue l'énergie emmagasinée.

Elle crée une surtension $e = -L.di/dt$ supérieure à E. Un courant de charge de la batterie apparaît parcourant le circuit extérieur G-D-E.



2.6.3. Le hacheur réversible

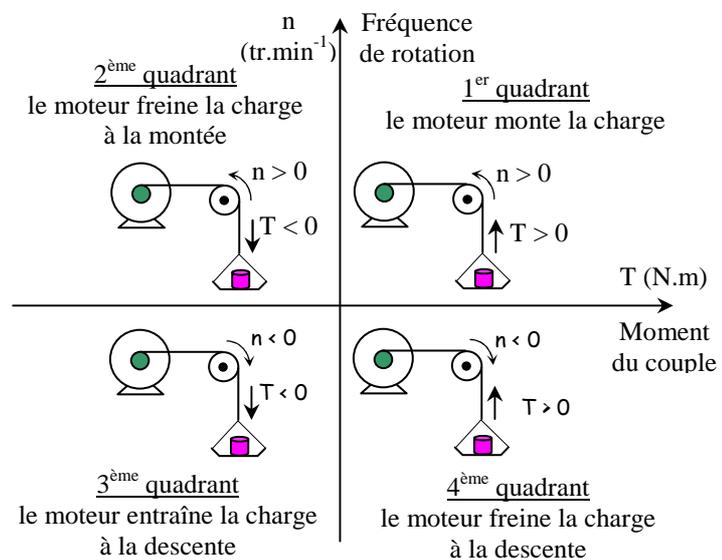
Combinaison des deux types précédents, il admet les deux fonctionnements (moteur et génératrice)



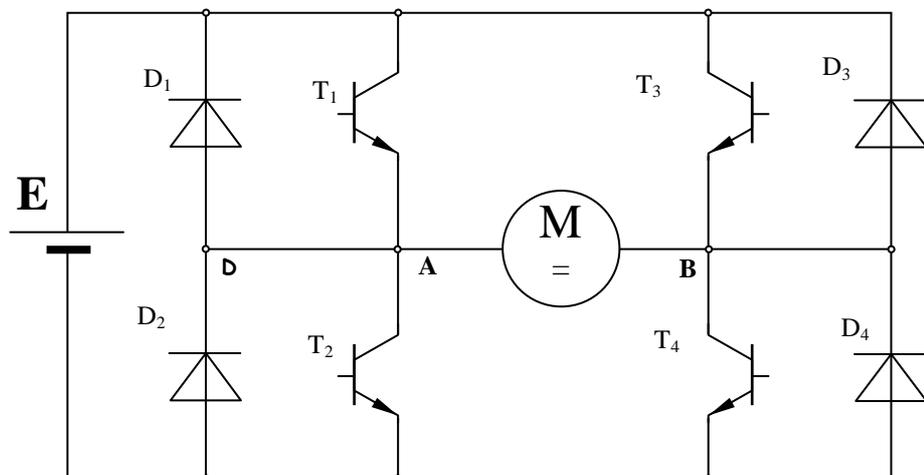
2.6.4. Le hacheur à deux sens de marche

Il permet à la machine de fonctionner aussi bien dans un sens que dans l'autre (sens de rotation), aussi bien comme moteur (récepteur) qu'en récupérateur (génératrice).

C'est ce que l'on appelle le fonctionnement dans les quatre « quadrants »



Voici un schéma simplifié d'un hacheur double sens de marche à transistors bipolaires :



Analyse du fonctionnement

1^{er} quadrant

Temps t_1 : les transistors T_1 & T_4 sont passants
Soudain, on bloque T_1 :

Temps t_2 : E n'alimente plus le moteur M. Celui-ci crée un courant induit qui trouve son chemin à travers T_4 (toujours polarisé) et D_2 qui sert de roue libre.

4^{ème} quadrant (FREINAGE)

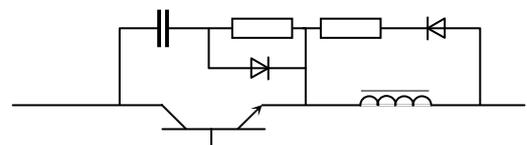
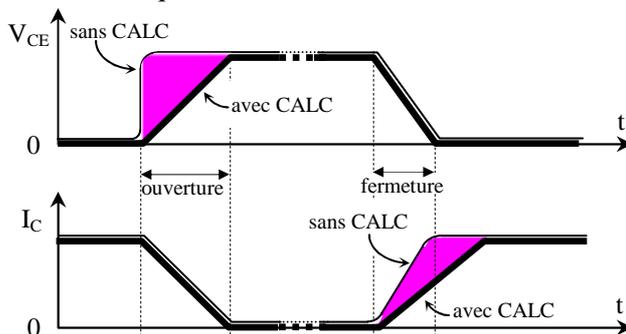
Temps t_1 : le transistor T_2 et la diode D_4 sont passants.
Fort courant dans G.
Soudain, on bloque T_2 :

Temps t_2 : le moteur M crée une surtension $e > E$. Un courant induit charge la batterie en suivant un chemin D_1 -E- D_4 .

Thyristors ou transistors ?

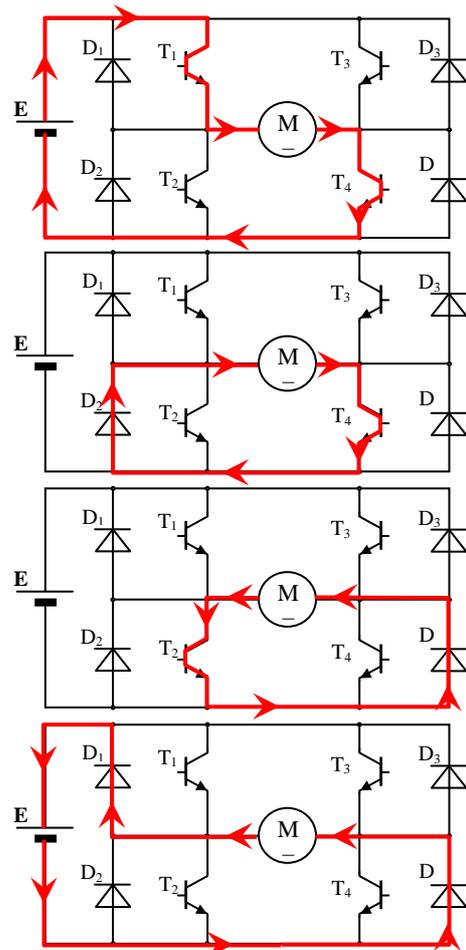
Pour les grandes puissances, on choisira les thyristors (fréquence de l'ordre du kHz). Leur principal inconvénient reste la coupure du courant en continu ($I < I_{\text{maintien}}$ ou $V_{AK} < 0$ V) qui nécessite l'utilisation d'un circuit de blocage.

Dans la pratique, jusqu'à 10 kW, on utilise des transistors « haute tension » permettant une commutation à fréquence élevée (quelques kHz pour un bipolaire, jusqu'à 200 kHz pour un MOS). Une montée trop rapide en tension à l'ouverture et une augmentation trop rapide du courant à la fermeture risquent de le détériorer, aussi on utilise un circuit d'aide à la commutation (CALC) :

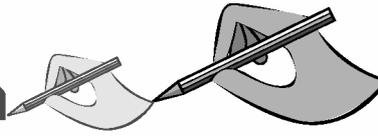


Il est à noter que les variations trop rapides en tension dV/dt et en courant dI/dt sont susceptibles de générer des perturbations.

De même, la base du transistor est « pilotée » par un circuit de commande de la base (CCB) constituée d'un générateur d'impulsions et de toute une série d'étages d'amplification pour compenser la valeur relativement faible du gain β pour un transistor de puissance. Ce CCB assure d'autre part un isolement entre circuit puissance et circuit de commande.



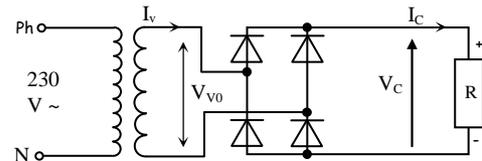
Autocorrection



2.7. Exercices à résoudre

Exercice N°1 : Redresseur non commandé

Voici le schéma d'un redresseur dont les 4 diodes sont supposées parfaites, alimentant une résistance de $10\ \Omega$
Calculer :



1° la valeur efficace de V_{v0} pour obtenir $V_{C_{moy}} = 15\ \text{V}$

2° L'intensité moyenne $I_{C_{moy}}$ du courant débitée dans la résistance R

3° L'intensité maximale dans une diode $I_{D_{max}}$

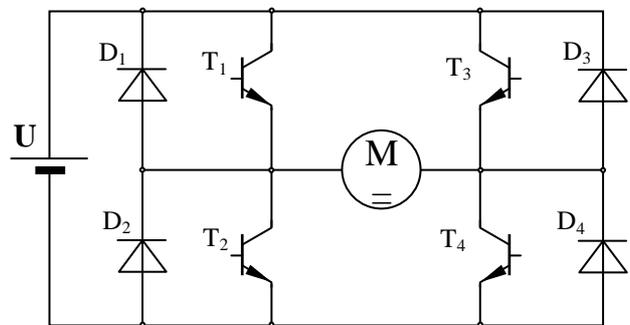
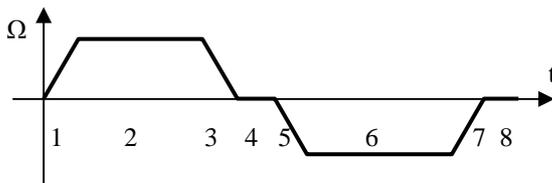
4° L'intensité moyenne dans une diode $I_{D_{moy}}$

5° L'intensité efficace dans la charge I_C

6° L'intensité efficace dans une diode I_D

Exercice N°2 : Hacheur

Voici le schéma d'un hacheur alimentant l'induit d'un moteur à courant continu selon le cycle ci après :



1° Préciser à quel quadrant de fonctionnement correspondent les 8 phases représentées ci dessus

2° Pour le quadrant 1 , Tracer l'allure de la tension et de l'intensité dans le moteur (on donne $\alpha > 0,5$)
préciser quel est le circuit fait par le courant par le courant

3° Pour le quadrant 2 , mêmes questions

4° Pour le quadrant 3 , mêmes questions

5° Pour le quadrant 4 , mêmes questions

Caractéristiques des principaux redresseurs :

Schémas						
Courbes						
Tension inverse de crête appliquée aux diodes	$\frac{V_{RRM}}{V_d}$	3,14	3,14	1,57	2,10	1,05
Tension efficace d'alimentation (seconde transfo.)	$\frac{V_{VO}}{V_d}$	2,22	2,22	1,11	1,48	0,74
Valeur efficace de la tension redressée	$\frac{V_d^{(eff)}}{V_d}$	1,57	1,11	1,11	1,017	1,001
Chute de tension dans les diodes ramenée côté alternatif	ΔU	$\cong 1,2$	$\cong 1,2$	$\cong 2,4$	$\cong 2,08$	$\cong 2,4$
Taux d'ondulation $\eta =$	$\sqrt{F^2 - 1}$	121%	48%	48%	18,3%	4,2%
Courant moyen redressé par diode	$\frac{I_o}{I_d}$	1	0,5	0,5	0,333	0,333
Courant efficace par diode	$\frac{I_1}{I_d}$	1,57	0,786	0,786	0,577	0,577
Courant efficace en ligne	$\frac{I_v}{I_d}$	1,57	0,786	1,11	0,577	0,816
Courant efficace redressé	$\frac{I_d^{(eff)}}{I_d}$	1,57	1,11	1,11	1,017	1,001
Courant de crête répétitif par diode	$\frac{I_{FRM}}{I_d}$	3,14	1,57	1,57	1,21	1,05
Puissance apparente au secondaire du transfo. (VA)	S_s	$3,49 I_d V_d$	$1,75 I_d V_d$	$1,23 I_d V_d$	$1,481 I_d V_d$	$1,05 I_d V_d$
Puissance apparente au primaire du transfo. (VA)	S_p	$3,49 I_d V_d$	$1,23 I_d V_d$	$1,23 I_d V_d$	$1,231 I_d V_d$	$1,05 I_d V_d$

Coefficients par rapport à V_d et I_d , sur charge résistive.
 V_d = tension moyenne redressée aux bornes de la charge.
 I_d = courant redressé traversant la charge.

Travail personnel



3. LES PERTURBATIONS DES RESEAUX

3.1. Définitions

Nous venons de voir que les formes d'onde du courant ou de la tension délivrées par les modulateurs d'énergie peuvent prendre des allures très diverses, et surtout très différentes de la forme sinusoïdale. On dit que ce sont des générateurs non linéaires. On peut citer par exemple :

Le redresseur en tension constitué par un pont de Graetz et chargé par un condensateur ou bien,
Le redresseur en courant constitué par un pont de Graetz et débitant sur une charge inductive.

D'après le **théorème de Fourier**, cette onde déformée est la somme de plusieurs ondes sinusoïdales superposées. On distingue la **composante fondamentale**, sinusoïde de fréquence égale à celle du réseau, des composantes dites **harmoniques**, sinusoïdes dont les fréquences sont des multiples de celle du réseau et éventuellement une **composante continue**.

Les harmoniques sont repérés en fonction de leur **rang**, rapport entre la fréquence de l'harmonique et la fréquence du fondamental.

Par exemple pour un signal de 50 Hz, l'harmonique de rang 3 a une fréquence de 150 Hz.

L'**harmonique de rang 1** est appelé le fondamental car sa fréquence correspond à celle du signal et son amplitude est importante.

Le signal délivré par un modulateur d'énergie peut s'écrire comme la somme de plusieurs signaux :

Par exemple pour un courant on a :

$$i(t) = \hat{I}_0 + \hat{I}_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) + \hat{I}_2 \cdot \sin(2\omega t + \varphi_2) + \hat{I}_3 \cdot \sin(3\omega t + \varphi_3) + \hat{I}_4 \cdot \sin(4\omega t + \varphi_4) + \text{etc...}$$

avec

\hat{I}_0 la composante continue

$\hat{I}_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1)$ le fondamental de valeur efficace I_1 de pulsation ω et de déphasage φ ,

$\hat{I}_2 \cdot \sin(2\omega t + \varphi_2)$ l'harmonique de rang 2 de valeur efficace I_2 de pulsation 2ω et de déphasage φ_2 ,

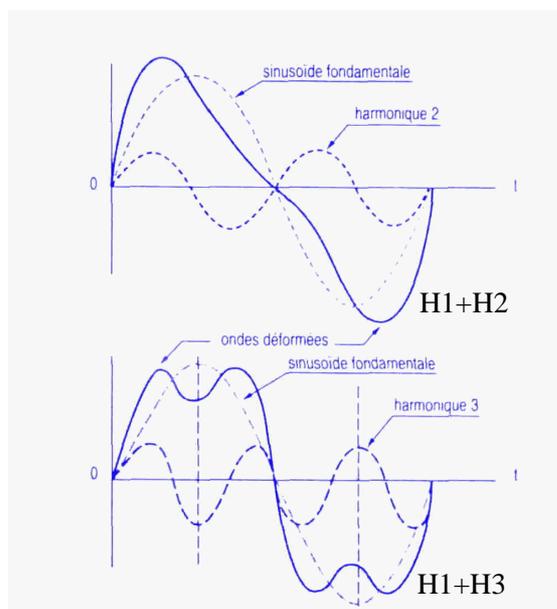
$\hat{I}_3 \cdot \sin(3\omega t + \varphi_3)$ l'harmonique de rang 3 de valeur efficace I_3 de pulsation 3ω et de déphasage φ_3 ,

Etc...

Exemples de signaux déformés :

- le premier exemple montre la déformation légère engendrée par l'harmonique de rang 2
- le deuxième exemple montre la déformation importante engendrée par l'harmonique de rang 3

D'une façon générale, **les harmoniques de rangs impairs** ont une importance prépondérante dans la décomposition d'un signal.



Exemple de décomposition d'un signal de fréquence 50 Hz :

L'allure général du signal est donné par le fondamental (harmonique de rang 1) :

Auquel on ajoute

L'influence de l'harmonique de rang 3 :

puis

L'influence de l'harmonique de rang 5 :

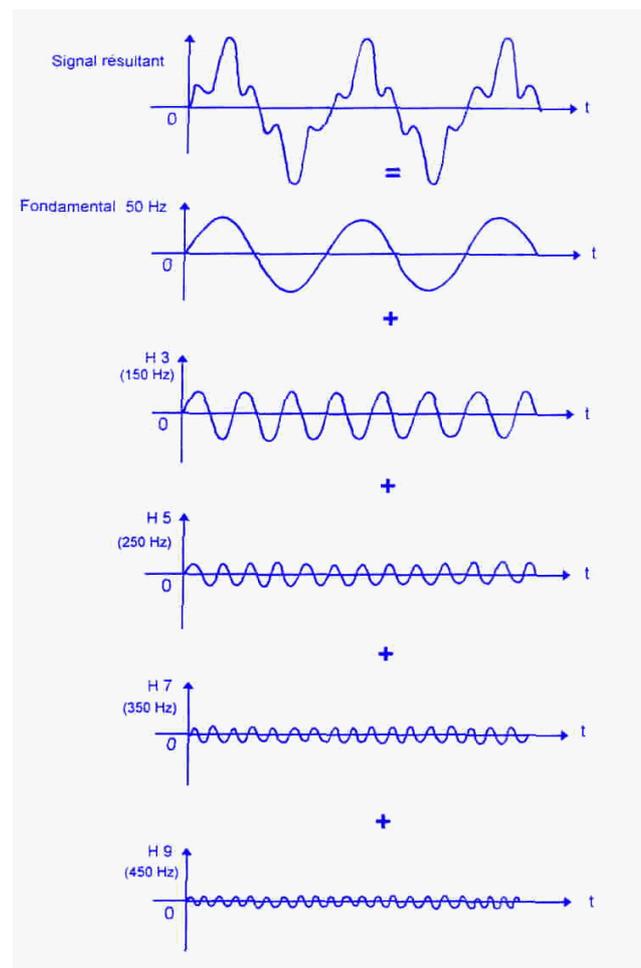
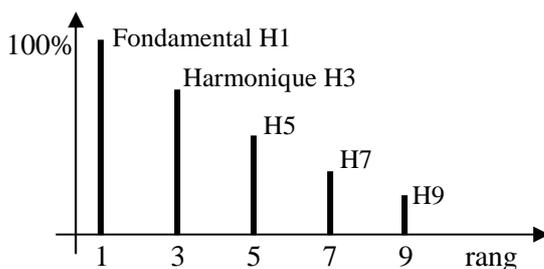
puis

L'influence de l'harmonique de rang 7 :

puis

L'influence de l'harmonique de rang 9 :

Représentation spectrale :



La valeur efficace de l'harmonique et donc l'énergie diminue d'autant plus que le rang est élevé. La valeur efficace du signal est donné par la relation :

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + \dots}$$

3.2. Effets des harmoniques

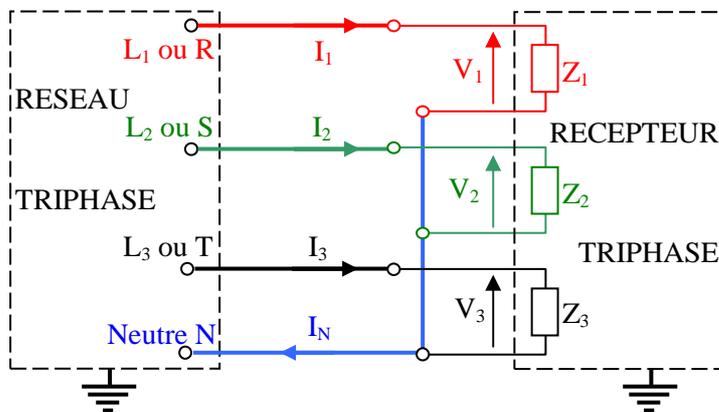
Les effets des harmoniques sont de 2 types :

- **Des effets instantanés** : les harmoniques créent des **perturbations** dans le fonctionnement des appareils.
 - Pour les machines tournantes, oscillations supplémentaires → augmentation du bruit
 - Pour les transformateurs → pertes fer supplémentaires
 - Pour les câbles → augmentation des pertes en particulier dans le neutre
 - Pour les transmissions de données → risque de parasites
 - Pour l'éclairage, risques de vacillement ou de résonance avec un harmonique
 - Pour les appareils de mesure ou compteur d'énergie → risques d'erreurs
- Des effets à plus ou moins long terme : les harmoniques créent des échauffements dans les matériels électriques donc des pertes Joule supplémentaires, et un vieillissement prématuré. C'est le cas en particulier pour les condensateurs, les transformateurs et les câbles

3.3. Perturbations sur le réseau triphasé

Particularité de l'harmonique de rang 3 ou des harmoniques multiples de 3.

Considérons un réseau triphasé couplé en étoile alimentant un récepteur triphasé couplé aussi en étoile.



On a vu dans le chapitre 9 que chaque récepteur est traversé par le **courant de ligne** fourni par le réseau.

La loi des nœuds permet de déterminer le courant dans le neutre:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

Si le système est parfaitement équilibré, les 3 courants de lignes sont déphasés de 120° et le courant dans le neutre est nul.

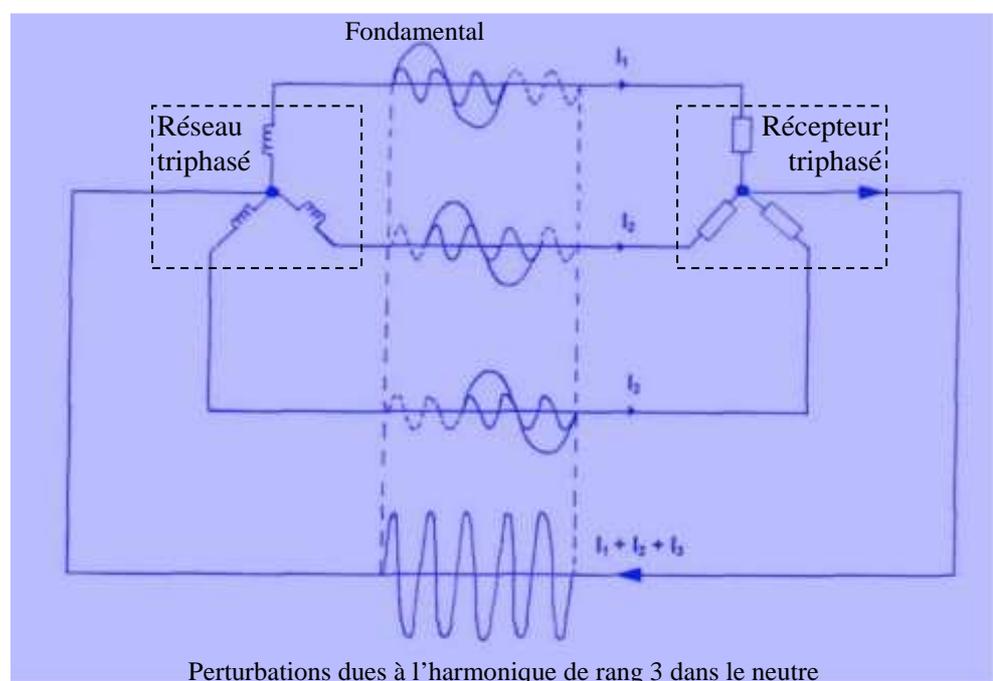
Si le système est perturbé, chaque courant de ligne est porteur d'harmoniques qui vont déformer la tension et donc déséquilibrer le système. Le courant dans le neutre ne sera plus nul.

Prenons l'exemple de la perturbation générée par l'harmonique de rang 3 sur un réseau 50 Hz :

Les 3 lignes de phase transportent le fondamental, déphasé de 120° , et l'harmonique de rang 3.

Les composantes fondamentales déphasées de 120° s'annulent alors que les harmoniques de rang 3 de fréquence 150 Hz sont en phase et donc s'ajoutent algébriquement.

Le courant dans le neutre est la somme des courants dus à l'harmonique de rang 3



Si un circuit alimente des appareils générant des harmoniques, il faut majorer la section des câbles. Actuellement la norme impose de limiter les perturbations générées par les appareils électriques.

4. LA COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE

4.1. Définitions

L'utilisation de plus en plus fréquente d'appareil électrique et électronique générateur de perturbations a rendu nécessaire la mise en place d'une réglementation permettant la cohabitation des courants forts, utilisés dans les réseaux de distribution d'énergie de plus en plus puissant, avec les courants faibles, utilisés dans les réseaux de transmission d'information de plus en plus rapide, en vue de maintenir la sécurité des personnes et des biens.

Cette réglementation a fait l'objet de normes concernant la **CEM Compatibilité électromagnétique** et aboutissant au marquage **CE** des appareils : **Certification Européenne**.

Le décret français concernant la compatibilité électromagnétique donne la définition suivante :

La compatibilité électromagnétique est l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques de nature à créer des troubles graves dans le fonctionnement des appareils ou des systèmes situés dans son environnement.

Définition que l'on peut résumer par : Un système ne doit pas perturber et ne doit pas être perturbé.

On entend par appareils, tous systèmes électriques ou électroniques mobiles ou toutes installations électriques ou électroniques fixes.

On appelle **perturbation électromagnétique** tout phénomène électromagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système.

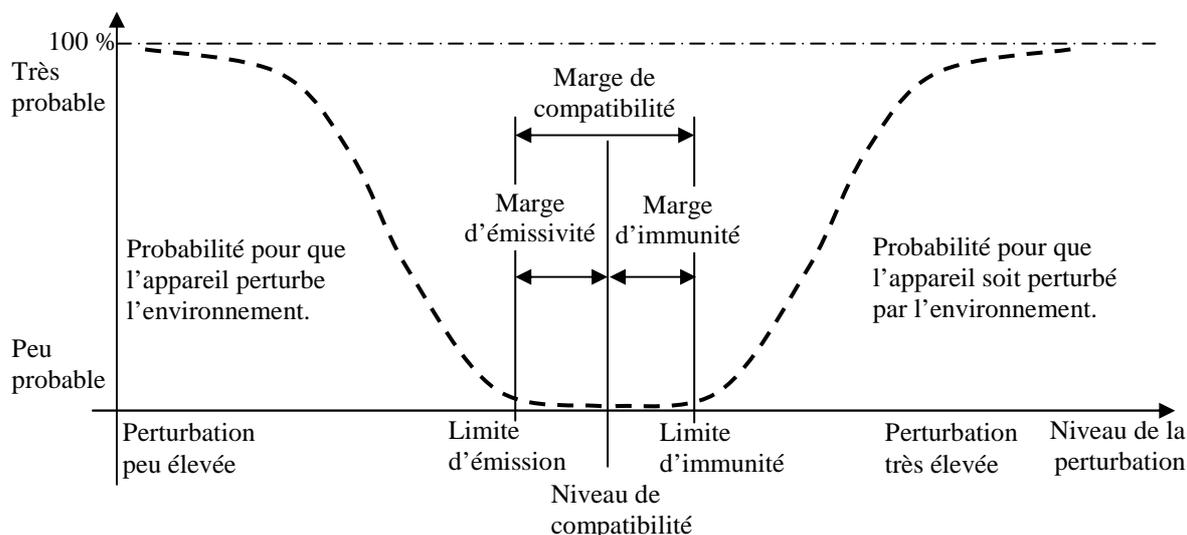
La réglementation mise en place et applicable depuis le 1^{er} janvier 1996 tend à limiter le niveau de rayonnement des appareils et à garantir leur fonctionnement correct dans leur environnement.

Deux aspects sont à prendre en compte :

- l'aptitude d'un appareil à fonctionner dans un environnement déjà plus ou moins perturbé
- l'aptitude d'un appareil à fonctionner sans perturber l'environnement de façon excessive.

La compatibilité électromagnétique met en relation un système coupable avec un système victime et définit des **marges de compatibilité** entre les appareils prenant en compte les deux aspects ci-dessus :

- Une **marge d'émissivité** où il est peu probable que l'appareil coupable perturbe l'environnement,
- Une **marge d'immunité** où il est peu probable que l'appareil victime soit perturbé par l'environnement, un manque d'immunité se traduisant par une forte **susceptibilité** d'être perturbé.



4.2. Nature des perturbations

Tout circuit électrique ou électronique qui est le siège de variations rapides de courant électrique génère à cause de ces variations un champ magnétique et un champ électrique.

Ces deux champs associés entre eux forment une onde radioélectrique qui se propage dans l'environnement soit par l'espace, soit par les câbles reliés au circuit. Le circuit devient donc une source de rayonnement radioélectrique ; par exemple un moteur électrique, un tube fluorescent, un téléphone portable, un système de frein ABS, un micro ordinateur, un émetteur radio ou TV, un radar, etc...

Ce phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un système est appelé **perturbation électromagnétique**.

Les perturbations électromagnétiques se situent dans deux plages de fréquences bien distinctes:

- les perturbations **basses fréquences BF** dues aux **harmoniques** qui se propagent par les signaux électriques et dont le spectre s'étend jusqu'à quelques KHz ;
- les perturbations **hautes fréquences HF** dues aux **rayonnements** qui se propagent par les ondes radioélectriques et dont le spectre s'étend jusqu'à plusieurs GHz.

Les perturbations électromagnétiques d'un équipement se caractérisent par 3 éléments :

- l'origine ou la source de la perturbation,
c'est à dire le système **coupable** susceptible d'émettre des perturbations
- la cible ou la victime de la perturbation,
c'est à dire le système **victime** susceptible de recevoir des perturbations
- la transmission ou la propagation de la perturbation,
c'est à dire le type de **couplage** entre les deux systèmes.

4.3. Origine des perturbations

Il existe plusieurs **sources de perturbations** selon les phénomènes mis en jeu :

- les sources naturelles
issues d'un phénomène atmosphérique dont la foudre est un exemple :
La foudre résulte du frottement des nuages dans l'air, qui se chargent et créent entre eux ou avec le sol une très grande différence de potentiel susceptible de donner des variations de courants de plusieurs dizaines d'ampères. La décharge rapide qui s'en suit provoque des variations importantes du champ magnétique au niveau du sol dont les effets agissent sur les lignes aériennes et peuvent créer des perturbations.
- les sources électrostatiques
dues à l'accumulation de charges électriques lors de frottement
Phénomène comparable à celui de la foudre mais d'amplitude moindre ; Le frottement crée une différence de potentiel comparable à celle présente entre les armatures d'un condensateur et dont la charges subite lors d'un contact peut engendrer des perturbations.
- les sources électrochimiques
dues au phénomène d'électrolyse, décomposition chimique produite par un courant électrique susceptible de créer des différences de potentiel élevée et donc d'engendrer des perturbations.
- les sources électrotechniques
dues à la forme d'onde et à la fréquence des signaux électriques transportés ; Lorsque l'onde n'est pas sinusoïdale, elle est porteuse d'harmoniques dont les fréquences peuvent se superposer et créer des perturbations dans les câbles d'alimentation. C'est le cas des modulateurs d'énergie.

4.4. Transmission des perturbations

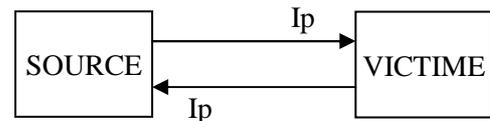
Si une perturbation existe, elle résulte d'un couplage entre la source coupable de la perturbation et la victime polluée par la perturbation.

Il existe une classification parmi les **modes de transmission** des perturbations :

- les perturbations rayonnées par voie hertzienne
qui agissent par l'intermédiaire du champ magnétique ou électrique,
- les perturbations conduites par voie filaire
qui se propagent à travers les câbles de liaison et d'alimentation,
en mode différentiel ou en mode commun.

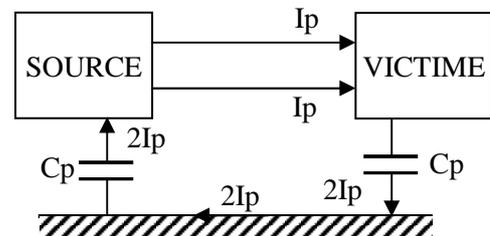
Définition du mode différentiel :

La perturbation émise par la source se propage sur un conducteur, traverse et pollue la victime puis revient sur l'autre conducteur.



Définition du mode commun :

La perturbation émise par la source se propage sur tous les conducteurs en même temps, traverse et pollue la victime puis se reboucle par les circuits de masse à travers les capacités parasites



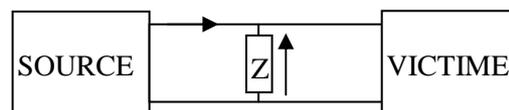
Il existe 3 types de couplages principaux susceptibles de transmettre des perturbations :

- le couplage par impédance commune
dans le cas d'une perturbation conduite
- le couplage capacitif ou électrique
du au champ électrique dans le cas de capacité parasite
- le couplage inductif ou magnétique
du au champ magnétique résultant d'une variation de courant

Couplage par impédance commune :

Un couplage par impédance commune intervient lorsqu'il existe entre deux appareils différents un circuit commun dont l'impédance est non négligeable. Il s'agit souvent d'un fil d'alimentation, d'un fil de masse ou d'un fil de terre commun à deux appareils.

Lorsqu'une perturbation est générée par la source, le courant circulant dans le circuit commun crée une variation de tension proportionnelle à l'impédance du circuit commun.



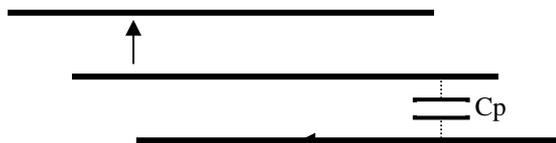
Pour remédier à ce type de couplage il faut réduire l'impédance commune.

Pour cela il faut :

- soit limiter la longueur du circuit commun par exemple en reliant les masses en un seul point
- soit augmenter la section du conducteur du circuit commun
- soit utiliser des filtres haute fréquence, l'impédance des câbles étant proportionnelle à la fréquence

Couplage capacitif ou électrique :

Un couplage capacitif intervient chaque fois qu'il existe deux conducteurs électriques qui constituent un condensateur. **Une variation brutale de la tension** entre deux conducteurs va générer un champ électrique qui va induire un courant sur un conducteur voisin par effet capacitif. Ceci est d'autant plus probable que les câbles sont proches C'est le cas en particulier pour les câbles en nappe et dans les goulottes.



Lorsqu'un conducteur est soumis à un champ électrique variable, il est traversé par un courant induit. C'est le cas par exemple en présence d'un téléphone portable.

Pour remédier à ce type de couplage il faut réduire la capacité parasite

Pour cela il faut :

- soit éloigner la source de la victime
- soit prévoir des écrans en séparant les conducteurs par une masse
- soit utiliser des câbles blindés, chaque conducteur est entouré d'une tresse de blindage

Couplage inductif ou magnétique :

Un couplage inductif intervient lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant électrique.

Une variation brutale du courant va générer un champ magnétique dont le flux va induire une force contre électromotrice dans les conducteurs voisins.

Lorsqu'un conducteur est mis dans un champ magnétique variable, il est soumis à une tension induite. C'est le cas par exemple de la foudre.

Pour remédier à ce type de couplage il faut réduire le flux magnétique

Pour cela il faut :

- soit réduire les boucles de courant, le flux étant proportionnel à la surface de la boucle
- soit utiliser des câbles torsadés pour inverser deux boucles de courants successives
- soit enfermer la partie sensible dans une enveloppe métallique (cage de Faraday)

4.5. Effets des perturbations

Le problème posé par les perturbations est la cohabitation des courants forts avec les courants faibles.

Les perturbations risquent de perturber les liaisons en courants faibles :

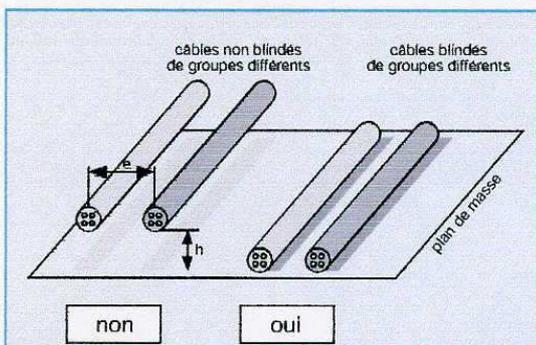
- Destruction du système de mesure ou d'analyse souvent très coûteux
- Erreurs de mesures ou de transmissions souvent très sensibles car très rapides
- Dysfonctionnement fréquent aboutissant à une mauvaise fiabilité

Il convient donc de respecter des règles élémentaires de câblage et de blindage données en annexe.

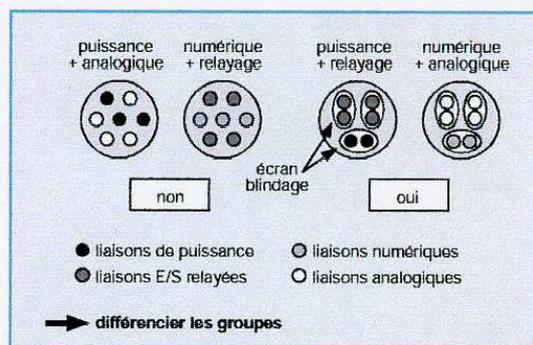
Attention : comme toutes les normes, la compatibilité électromagnétique évolue constamment.

c Les règles de câblage

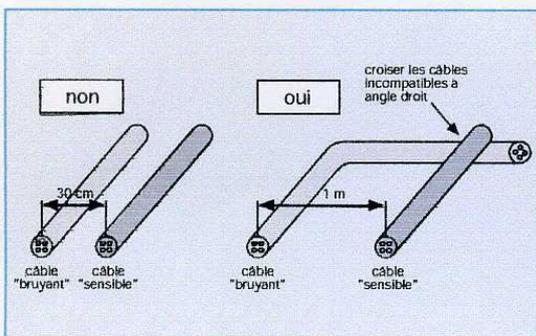
v Risques de diaphonie en mode commun si $e < 3h$



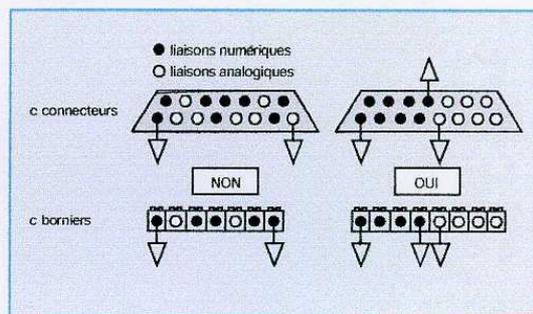
v Signaux incompatibles : câbles et torons différents



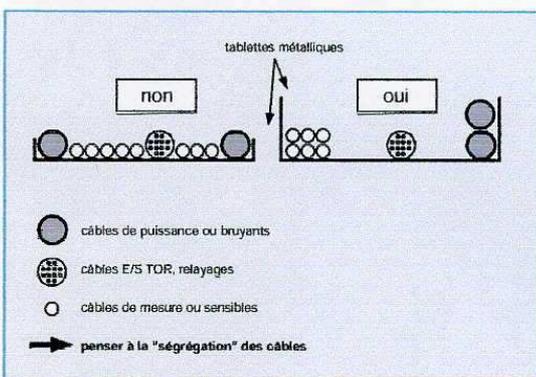
v Eloigner les câbles incompatibles



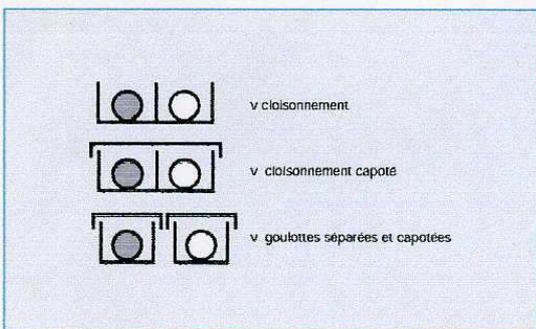
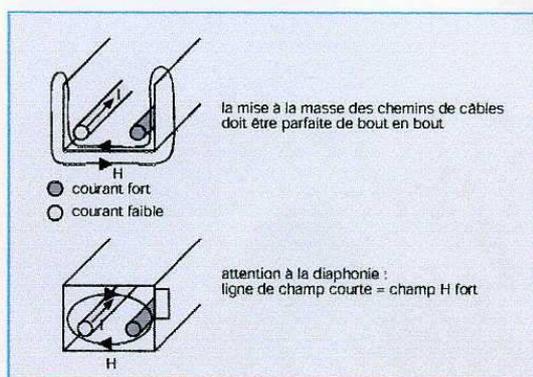
v La "ségrégation" s'applique aussi aux raccordements



v Répartition des câbles dans une tablette

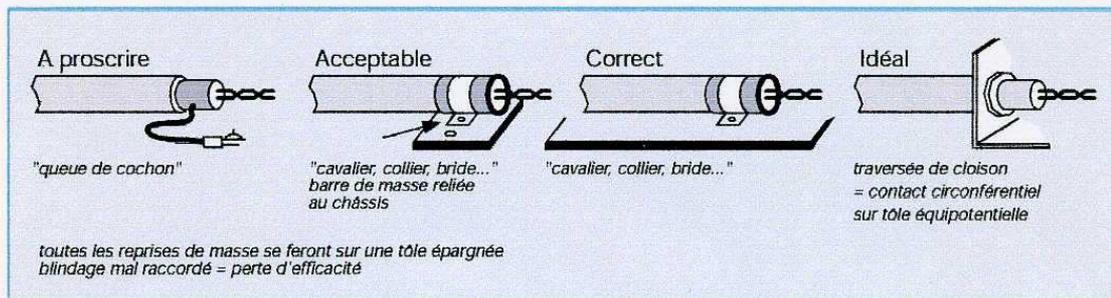


v Chemin de câbles métallique

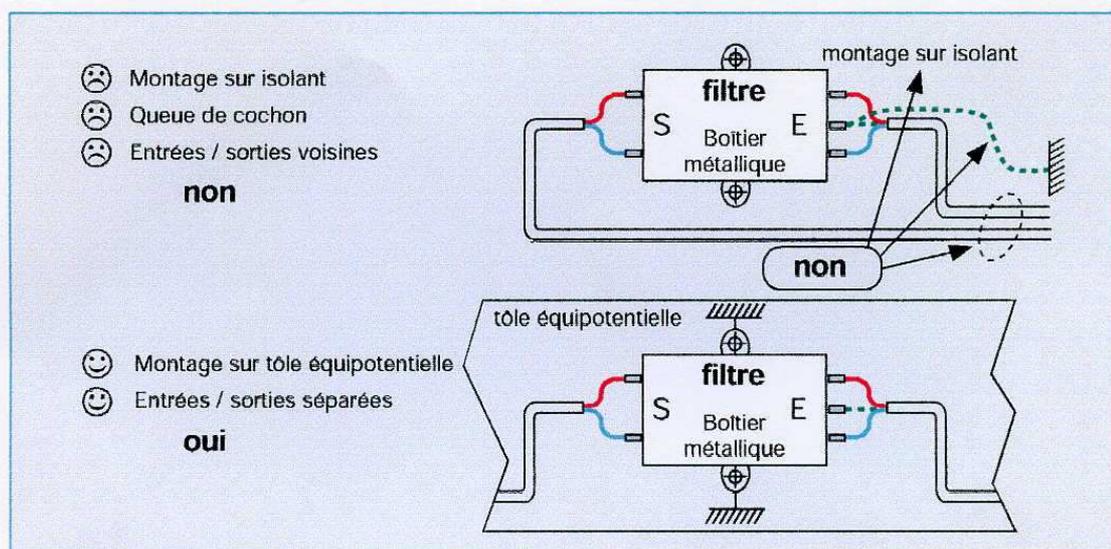


D'après le guide technique Schneider Electric

c Le raccordement des blindages

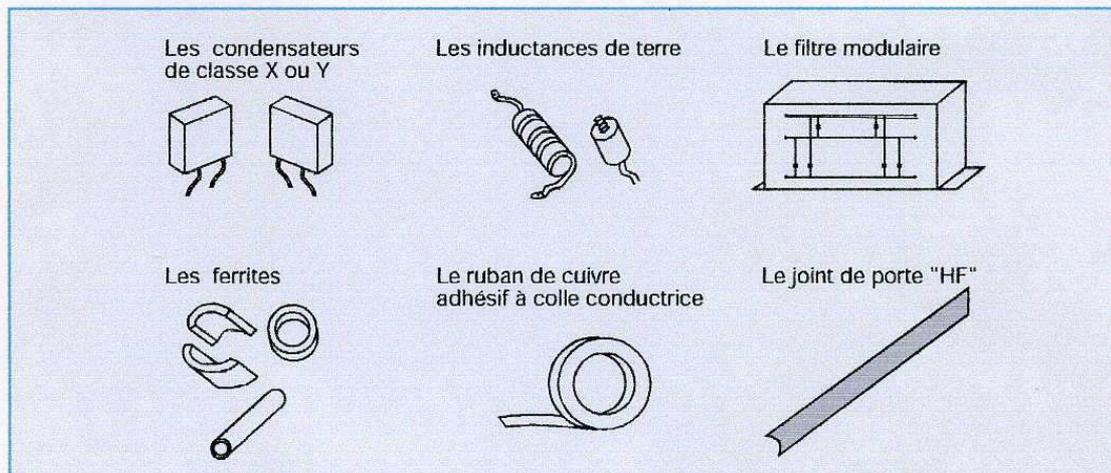


c La mise en œuvre des filtres



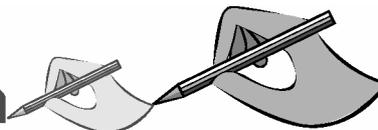
c La valise magique

Les principaux composants CEM



D'après le guide technique Schneider Electric

Autocorrection



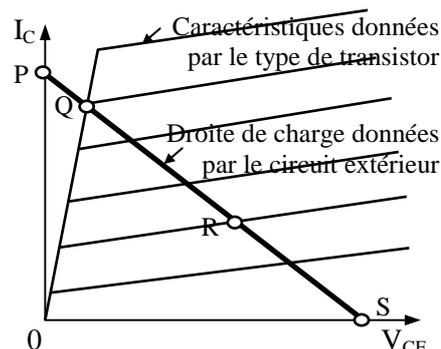
5. CORRECTION DES EXERCICES

5.1. Correction des exercices paragraphe 1.8 page 28

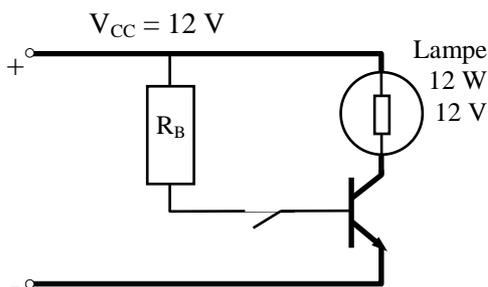
1 – Exercice sur le transistor

1° Pour fonctionner au point

- P, il faut que le transistor soit : **court-circuité**
- Q, il faut que le transistor soit : **saturé**
- R, il faut que le transistor soit : **passant**
- S, il faut que le transistor soit : **bloqué**



2° Tracer la droite de charge de ce circuit

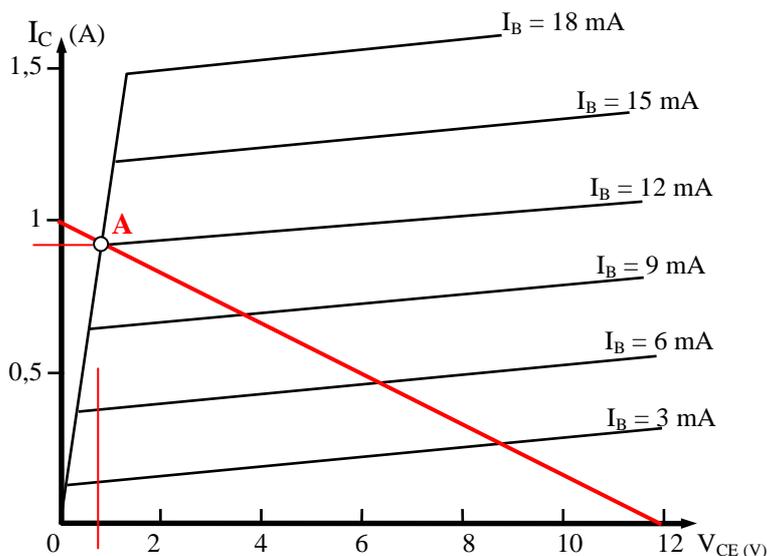


Loi d'ohm dans le circuit extérieur

$$V_{CC} = R_L \cdot I_C + V_{CE} \text{ avec } R_L = V_L^2 / P_L$$

$$V_{CE} = 0 \rightarrow I_C = V_{CC} / R_L = 12 / 12 = 1 \text{ A}$$

$$I_C = 0 \rightarrow V_{CC} = V_{CE} = 12 \text{ V}$$



3° Placer le point A correspondant au fonctionnement en saturation et lire ses coordonnées :

Abscisse du point A : $V_{CE} = 0,8 \text{ V}$

Ordonnée du point A $I_C = 0,9 \text{ A}$

4° Choisir une intensité de base pour être sûr d'être saturé.

$I_{B \text{ choisie}} = 15 \text{ mA}$

5° En déduire la valeur de la résistance de protection de la base :

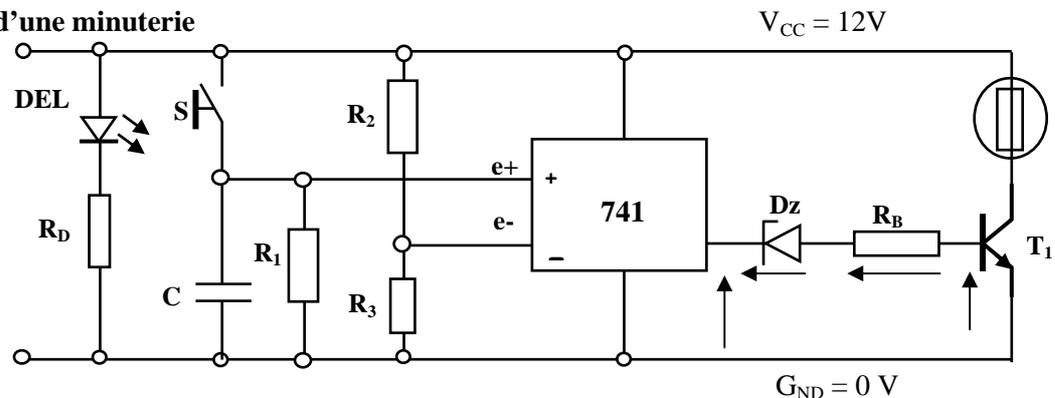
$$\begin{aligned} \text{d'après la loi d'ohm dans le circuit de base } V_{CC} &= R_B I_B + V_{BE} \rightarrow R_B = (V_{CC} - V_{BE}) / I_B \\ &\rightarrow R_B = (12 - 0,7) / 0,015 \\ &\rightarrow R_B = 750 \Omega \end{aligned}$$

6° Entourer la valeur choisie dans la série E 12 : 10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, **68**, 82

$$\text{La résistance } R_B \text{ sera donc de } 680 \Omega \rightarrow I_B = (12 - 0,7) / 680 \rightarrow I_B = 16,6 \text{ mA}$$

2 – Exercice sur l'amplificateur opérationnel

Réalisation d'une minuterie



On donne : $R_1 = 47 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$; $R_3 = 33 \text{ k}\Omega$; $C = 1000 \text{ }\mu\text{F}$
 $V_{CC} = 12 \text{ V}$; $V_{Dz} = 3,9 \text{ V}$; $V_{KA} = 24 \text{ V}$
 $V_{S741 \text{ Etat } 1} = 11 \text{ V}$; $V_{S741 \text{ Etat } 0} = 2 \text{ V}$
 Transistor : 1N1711 ; DEL Rouge 1,8 V 20 mA

1° Décrire ce qui se passe à partir du moment où l'on actionne le bouton poussoir S.

Lorsque l'on appuie sur S le condensateur est soumis à une tension de 12 V : il se charge instantanément et le potentiel e+ est égal à 12 V ; L'ampli op passe à l'état 1, T1 conduit → éclairage

Lorsque l'on relâche S le condensateur se décharge lentement à travers R1 ; le potentiel e+ diminue et devient inférieur à e- ; L'ampli op passe à l'état 0, T1 se bloque et la lampe s'éteint.

2° Quelle est la valeur de la tension e- présente sur la borne - du 741 ?

La tension e- est donnée par le rapport des résistances R_2 et R_3

→ $e- = R_3 I$ avec $I = V_{CC} / (R_2 + R_3)$ → $I = 0,09 \text{ mA}$ et $e- = 3 \text{ V}$

3° Quelle est la valeur de la tension aux bornes de C lorsque la sortie du CI 741 change d'état
 la sortie du CI 741 change d'état lorsque $e+ = e- = 3 \text{ V} = V_c$

$V_c = 25\%$ de V_{CC}

4° En déduire le rapport t/τ

le rapport $V_c / V_{CC} = 25\%$ donne

un rapport $t / RC = 1,3$ sur la courbe de décharge

5° Calculer la constante de temps

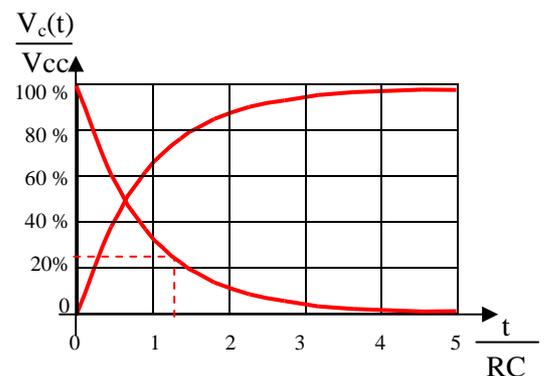
La constante de temps $\tau = R_1 C = 47 \cdot 10^3 \times 1000 \cdot 10^{-6}$

$$\tau = 47 \text{ s}$$

6° En déduire le temps au bout duquel la lampe s'éteint.

la lampe s'éteint au bout d'un temps $t = 1,3 \tau$

$$t = 61 \text{ s soit } 1 \text{ minute}$$



7° Déterminer la valeur de R_B pour un courant de base de 5 mA (série E12)

On applique la loi d'ohm : $V_{S741 \text{ Etat } 1} = V_{Dz} + V_{RB} + V_{BE}$ → $V_{RB} = V_{S741 \text{ Etat } 1} - V_{Dz} - V_{BE}$

$$\rightarrow V_{RB} = 11 - 3,9 - 0,7 = 6,4 \text{ V}$$

$V_{RB} = R_B I_B$ → $R_B = V_{RB} / I_B = 6,4 / 0,005 = 1280 \text{ }\Omega$ soit 1,2 K Ω valeur normalisée

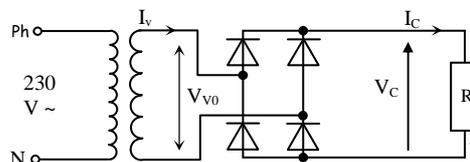
8° Quel est le rôle de la diode Zener ?

La diode Zener joue le rôle de seuil ou de barrage : elle ne laisse passer que les tensions supérieures à 3,9 V et interdit la conduction du transistor NPN lorsque la sortie de l'ampli op est à l'état bas (2V).

5.2. Correction des exercices paragraphe 2.7 page 50

Exercice N°1 : Redresseur non commandé

Voici le schéma d'un redresseur dont les 4 diodes sont supposées parfaites, alimentant une résistance de 10 Ω
Calculer :



1° la valeur efficace de V_{V0} pour obtenir $V_{Cmoy} = 15 \text{ V}$

Pour un pont double alternance monophasé PD2, $V_{Cmoy} = 2 V_{V0max} / \pi = 2 \sqrt{2} V_{V0} / \pi$
 $\rightarrow V_{V0} = V_{Cmoy} \pi / 2 \sqrt{2} = 1,11 \times V_{Cmoy} = \boxed{16,7 \text{ V}}$

2° L'intensité moyenne I_{Cmoy} du courant débitée dans la résistance R

On applique la loi d'Ohm : $I_{Cmoy} = V_{Cmoy} / R \rightarrow I_{Cmoy} = \boxed{1,5 \text{ A}}$

3° L'intensité maximale dans une diode I_{Dmax}

L'intensité maximale traversant une diode est le courant maximal traversant la charge

On applique la loi d'Ohm : $I_{Dmax} = I_{Cmax} = V_{Cmax} / R = \sqrt{2} V_{V0} / R \rightarrow I_{Dmax} = \boxed{2,36 \text{ A}}$

4° L'intensité moyenne dans une diode I_{Dmoy}

Les diodes sont traversées par le courant alternativement chaque demi période donc

Le courant moyen dans la diode est la moitié du courant moyen dans la charge $\rightarrow I_{Dmoy} = \boxed{0,75 \text{ A}}$

5° L'intensité efficace dans la charge I_C

La tension efficace aux bornes de la résistance est la même que celle en sortie du transfo (diodes parfaites). L'intensité efficace est donnée par la loi d'Ohm : $I_C = V_{V0} / R = \boxed{1,67 \text{ A}}$

6° L'intensité efficace dans une diode I_D

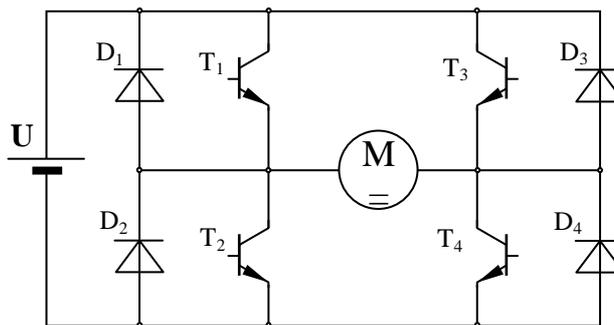
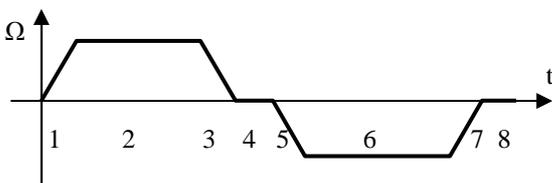
Le courant efficace dans une diode est égal à 0,786 fois le courant moyen I_{Cmoy} dans la charge

$$\rightarrow I_D = 0,786 \times 1,5 = \boxed{1,18 \text{ A}} = I_C / \sqrt{2}$$

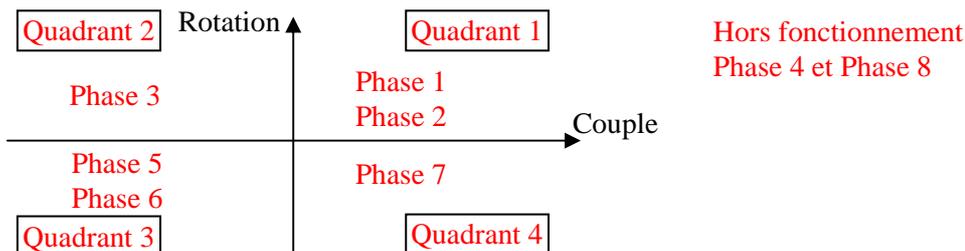
les diodes conduisant une alternance sur deux, l'effet thermique du courant est réduit de $\sqrt{2}$

Exercice N°2 : Hacheur

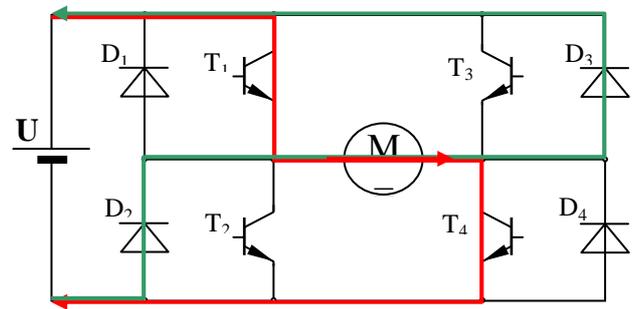
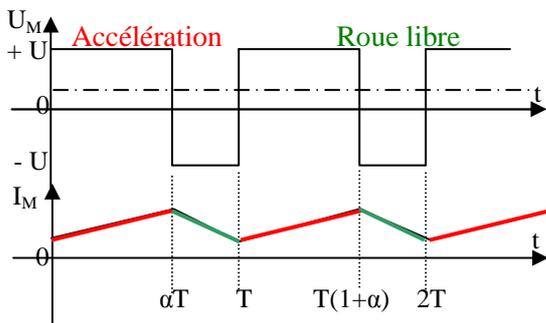
Voici le schéma d'un hacheur alimentant l'induit d'un moteur à courant continu selon le cycle ci après :



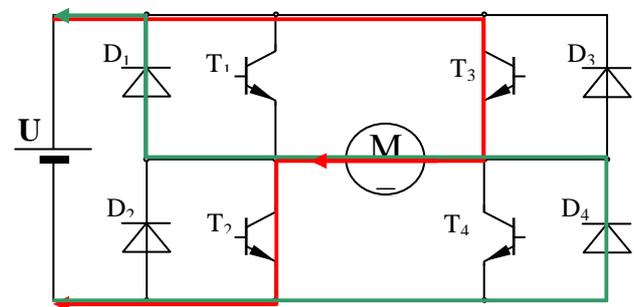
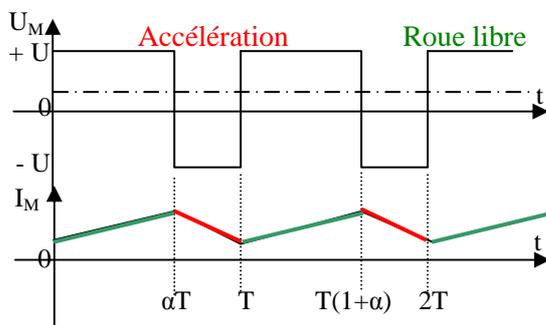
1° Préciser à quel quadrant de fonctionnement correspondent les 8 phases représentées ci dessus



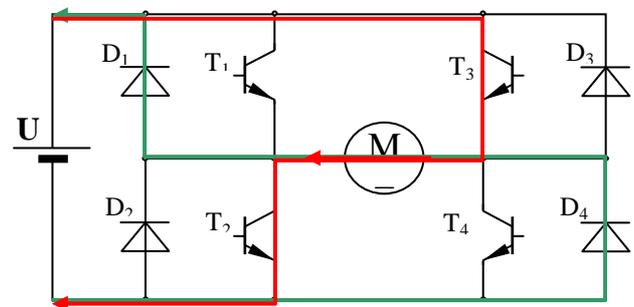
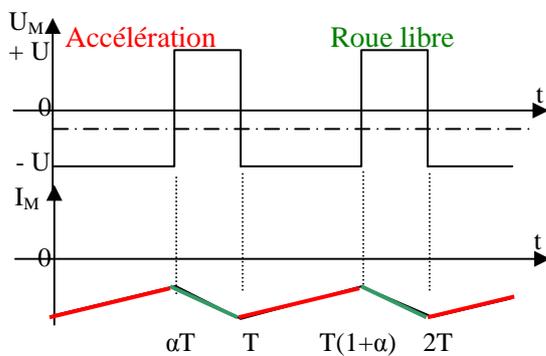
2° Pour le quadrant 1 , Tracer l'allure de la tension et de l'intensité dans le moteur (on donne $\alpha > 0,5$) préciser quel est le circuit fait par le courant par le courant (Accélération en vitesse positive)



3° Pour le quadrant 2 , mêmes questions (freinage en vitesse positive) le moteur est générateur



4° Pour le quadrant 3 , mêmes questions (Accélération en vitesse négative)



5° Pour le quadrant 4 , mêmes questions (Freinage en vitesse négative) le moteur est générateur

