



**OFPPT**

**ROYAUME DU MAROC**

**مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل**

**Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail**

**DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION**

**RESUME THEORIQUE  
&  
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

**ANALYSE DE CIRCUITS  
MODULE N°:17 ELECTRONIQUES DE  
PUISSANCE**

**SECTEUR : ELECTRICITE**

**SPECIALITE : ELECTRICITE DE  
MAINTENANCE  
INDUSTRIELLE**

**NIVEAU : TECHNICIEN**

**ANNEE 2006**

Document élaboré par :

**Nom et prénom**

Mohamed BOUAJOUL

**EFP**

ISTA RI FES

**DR**

CN

**Révision linguistique**

- 
- 
- 

**Validation**

- 
- 
-

## SOMMAIRE

	<b>Page</b>
<b>Présentation du module</b>	
<b>Résumé de théorie</b>	
<b>I. THYRISTORS</b>	<b>8</b>
I.1. Les SCR	10
I.2. Les procédés d'amorçages des thyristors	13
I.3. Méthodes de désamorçage	16
I.4. Protection des thyristors	21
I.5. Différents types de SCR	23
I.6. Les thyristors unidirectionnels spéciaux	24
<b>II. ELEMENTS DE DECLENCHEMENTS</b>	
II.1 Introduction	27
II.2. Les thyristors de déclenchement unidirectionnels	27
II.3. Les thyristors de déclenchement bidirectionnels	39
II.4. Le TRIAC	41
II.5. Lampe au NEON	46
<b>III. APPAREILS DE MESURE</b>	
III.1. Introduction	47
III.2. Oscilloscope	47
III.3. Multimètres électroniques	54
III.4. Fréquencemètre	65
<b>IV. ANALYSE DES CIRCUITS ELECTRONIQUES DE PUISSANCE</b>	
IV.1. Introduction	69
IV.2. Recherche de pannes dans le matériel électronique	69
IV.3. Défaillance des composants	70
IV.4. Test portant sur les composants élémentaires	72
IV.5. Test sur un circuit électronique	74
IV.6. Les circuits à thyristors et à TRIAC	80
IV.7. Dépannage des circuits à base de thyristors	83
IV.8. Documentation	88
<b>Guide de travaux pratique</b>	
<b>I. TP1 : Etude d'un SCR en régime continu</b>	<b>90</b>
I.1. Objectif(s) visé(s) :	
I.2. Durée du TP :	
I.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :	
I.4. Description du TP :	
I.5. Déroulement du TP	

<p><b>II. TP2 : Etude d'un SCR en régime alternatif</b></p> <p>II.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>II.2. Durée du TP</p> <p>II.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>II.4. Description du TP :</p> <p>II.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>93</b></p>
<p><b>III. TP3 : Etude d'un circuit à base d'un GTO</b></p> <p>III.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>III.2. Durée du TP</p> <p>III.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>III.4. Description du TP :</p> <p>III.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>96</b></p>
<p><b>IV. TP4 : Optocoupleur à sortie LASCR</b></p> <p>IV.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>IV.2. Durée du TP</p> <p>IV.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>IV.4. Description du TP :</p> <p>IV.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>99</b></p>
<p><b>V. TP5 : Etude d'un circuit à base d'un SCS</b></p> <p>V.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>V.2. Durée du TP</p> <p>V.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>V.4. Description du TP :</p> <p>V.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>102</b></p>
<p><b>VI. TP6 : Oscillateur à Relaxation</b></p> <p>VI.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>VI.2. Durée du TP</p> <p>VI.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>VI.4. Description du TP :</p> <p>VI.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>104</b></p>
<p><b>VII. TP7 : Oscillateur programmable à PUT</b></p> <p>VII.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>VII.2. Durée du TP</p> <p>VII.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>VII.4. Description du TP :</p> <p>VII.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>106</b></p>

<p><b>VIII. TP8 : Amorçage d'un SCR à l'aide d'un SUS</b></p> <p>VIII.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>VIII.2. Durée du TP</p> <p>VIII.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>VIII.4. Description du TP :</p> <p>VIII.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>109</b></p>
<p><b>IX. TP9 : Etude d'un circuit à base d'un DIAC</b></p> <p>VIV.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>VIV.2. Durée du TP</p> <p>VIV.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>VIV.4. Description du TP :</p> <p>VIV.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>113</b></p>
<p><b>X. TP10 : Commutation à l'aide d'un TRAIC.</b></p> <p>X.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>X.2. Durée du TP</p> <p>X.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>X.4. Description du TP :</p> <p>X.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>116</b></p>
<p><b>XI. TP11 : Contrôle de la puissance par réglage de phase.</b></p> <p>XI.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>XI.2. Durée du TP</p> <p>XI.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>XI.4. Description du TP :</p> <p>XI.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>120</b></p>
<p><b>XII. TP12 : Vérification et dépannage d'un clignotant à thyristors.</b></p> <p>XII.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>XII.2. Durée du TP</p> <p>XII.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>XII.4. Description du TP :</p> <p>XII.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>123</b></p>
<p><b>XIII. TP13 : Vérification et dépannage d'un circuit de protection « crow ber »</b></p> <p>XIII.1. Objectif(s) visé(s) :</p> <p>XIII.2. Durée du TP</p> <p>XIII.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :</p> <p>XIII.4. Description du TP :</p> <p>XIII.5. Déroulement du TP</p>	<p><b>127</b></p>

*Evaluation de fin de module*

**131**

*Liste bibliographique*

*Annexes*

**MODULE : 17**

**ANALYSE DE CIRCUITS ELECTRONIQUE DE PUISSANCE**

**Durée : 60 H**

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU  
DE COMPORTEMENT**

**COMPORTEMENT ATTENDU**

*Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit analyser des circuits électroniques de puissance, selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent*

**CONDITIONS D'EVALUATION**

- *Travail individuel*
- *Sur un circuit électronique de puissance comprenant un thyristor et son circuit d'amorçage*
- *A partir d'une panne provoquée*
- *A l'aide :*
  - *des directives et du schéma du circuit*
  - *d'outils et d'instrument de mesure*

**CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE**

- *Respect des règles de santé et sécurité de travail.*
- *Respect de processus de travail.*
- *Travail soigné et propre.*
- *Utilisation adéquate des outils et des instruments*

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU  
DE COMPORTEMENT**

**PRECISIONS SUR LE  
COMPORTEMENT ATTENDU**

**CRITERES PARTICULIERS DE  
PERFORMANCE**

- |  |  |
|--|--|
| <p>A. Expliquez les fonctions des composants en électronique de puissance.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Explication précise des fonctions.</li> <li>• Utilisation appropriée de la terminologie.</li> </ul>   |
| <p>B. Interpréter des schémas de circuits en électronique de puissance.</p>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identification correcte des composants et des caractéristiques de leurs paramètres.</li> <li>• Identification exacte des fonctions des circuits.</li> </ul> |
| <p>C. Mesurer et calculer les paramètres des circuits.</p>                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Exactitude des mesures et des calculs.</li> </ul>   |
| <p>D. Diagnostiquer des problèmes sur des circuits.</p>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Justesse du diagnostic.</li> <li>• Pertinence des correctifs à apporter.</li> </ul>   |



## **PRESENTATION**

Ce module de compétence particulière a comme préalable le module 10 (analyse de semi-conducteurs) et il est enseigné au deuxième semestre. Les notions acquises dans ce module sont réinvesties dans les modules 20 (**Installations et réparations des moteurs et génératrices à c.c.**) et 22 (**Installations et réparations des moteurs et génératrices à c.a.**)

## **DESCRIPTION**

L'objectif de ce module est de faire acquérir les connaissances relatives aux semi-conducteurs spéciaux en électronique de puissance tels que les thyristors, les photothyristors, leurs circuits d'amorçages et leur utilisation, aux vérifications ainsi que remplacement des composants défectueux. Ce module vise donc à rendre le stagiaire apte à dépanner des circuits électroniques de puissance.

## **CONTEXTE D'ENSEIGNEMENT**

- Bien que la partie théorique se donne en classe, il est important de mettre en évidence les éléments sur du matériel pédagogique adéquat s'appliquant à l'électronique de puissance.
- L'élaboration d'activités liées à la réalisation de test de vérification, à l'utilisation des chartes de dépannage et au remplacement de composants défectueux est fortement suggérée.

***Module 17 : ANALYSE DES CIRCUITS  
ELECTRONIQUES DE PUISSANCE  
RESUME THEORIQUE***

## 1. Thyristors

### 1.1 SCR

#### 1.1.1 Analogie «2 transistors» de la structure PNPN

Les structures PN des diodes et NPN ou PNP des transistors bipolaires nous sont déjà familières. Il existe toutefois des éléments semi-conducteurs à structure PNPN, qu'on appelle thyristors. Le plus connu de ceux-ci est le SCR, Silicon Controlled Rectifier, dont la configuration apparaît à la Figure 1-1 a).

Pour en comprendre le fonctionnement, on brise symboliquement le cristal semi-conducteur tel que le schéma équivalent à 2 transistors (Figure 1-1 c)).

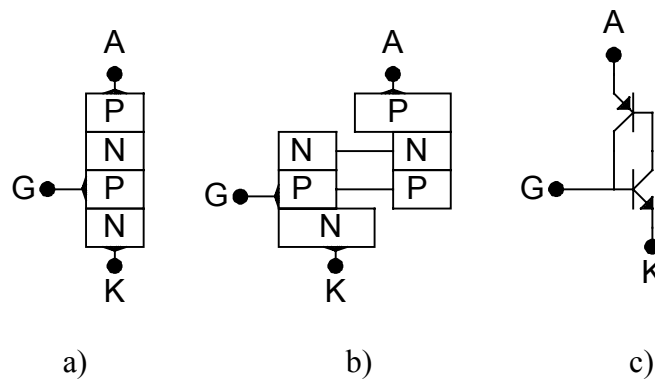


Figure 1-1 Analogie « 2 transistors »

À la Figure 1-2, on rappelle les équations du transistor bipolaire en tenant compte du  $I_{CBO}$ . On note aussi la présence de la capacité de jonction  $C_{CBO}$  dont on verra l'importance un peu plus loin.

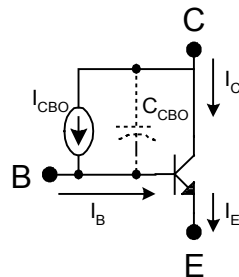


Figure 1-2 Transistor NPN

$$I_E = (\beta + 1)(I_B + I_{CBO}) \quad (1.1)$$

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1)I_{CBO} \quad (1.2)$$

$$I_B = I_E - I_C \quad (1.3)$$

Pour trouver le courant d'anode du SCR équivalent de la Figure 1-3, il suffit d'effectuer la somme des courants suivants:

$$I_A = I_{C1} + I_{B1} \quad (1.4)$$

D'après la Figure 1-3, on note que :

$$I_{B1} = I_{C2} \quad (1.5)$$

$$I_{B2} = I_G + I_{C1} \quad (1.6)$$

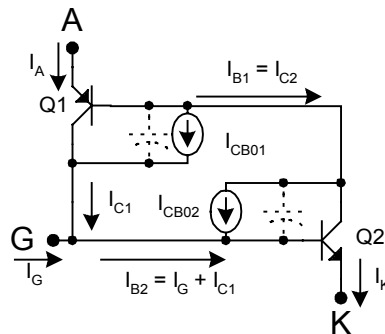


Figure 1-3 courants dans un SCR

À l'aide des équations (1.2), (1.5) et (1.6), on effectue les substitutions appropriées pour obtenir l'expression du courant d'anode.

$$I_A = \frac{\beta_2(\beta_1 + 1)I_E + (\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)(I_{CB01} + I_{CB02})}{1 - \beta_1\beta_2} \quad (1.7)$$

### 1.1.2 Courbe caractéristique $I_A-U_A$ et symbole du SCR

À la Figure 1-4, on trouve le symbole ainsi que la courbe  $I_A-U_A$  d'un SCR. De plus, les caractéristiques pertinentes du C106 sont fournies.

Avec un courant de gâchette nul, le SCR peut bloquer une tension aussi élevée que le  $U_{BO}$ . Passé ce point, l'amorçage par tension se produit et le SCR passe à l'état de conduction. Son courant devient élevé et sa tension devient faible car il sature. Si  $I_A$  devient inférieur à  $I_H$ , le SCR retourne à l'état bloqué.

En inverse, le SCR peut bloquer une tension aussi élevée que le  $U_{(BR)}$  puis entre en avalanche comme une diode de redressement.

En fait, le synonyme de SCR est «redresseur commandé» car, plus le courant de gâchette augmente, plus le  $U_{BO}$  diminue jusqu'à devenir, à toutes fins pratiques, nul. C'est de cette façon que se réalise l'amorçage par la gâchette.

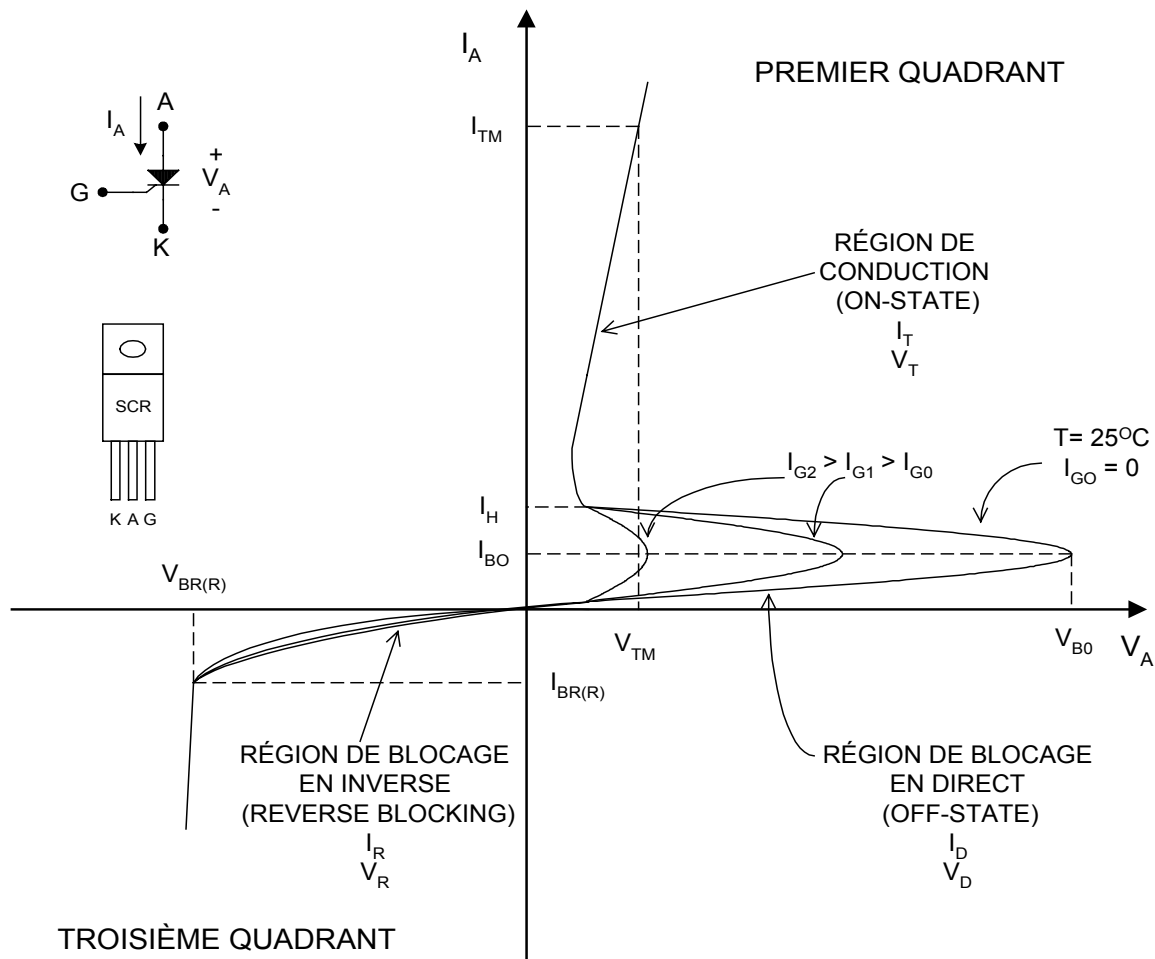


Figure 1-4 Courbe  $I_A$ - $U_A$  du C106

### 1.1.3 Spécifications des fabricants

Dans les fiches techniques publiées par les fabricants figurent toutes les informations nécessaires pour faciliter le choix d'un SCR pour une application donnée. Le tableau ci-dessous présente la fiche technique du SCR C106.

#### Caractéristiques du SCR C106 :

##### Région de conduction :

Courant direct max. :  $I_{TM}=5\text{amp.}$   
 Tension directe max. :  $U_{TM}=1.7\text{V}$   
 Courant de maintien :  $I_H=5\text{mA max.}$

##### Région de blocage en inverse :

Courant d'avalanche :  $I_{(BR)} > 1\text{mA}$   
 Tension d'avalanche :  $U_{(BR)} > 100\text{V C106 A}$   
 $> 200\text{V C106 B}$   
 $> 300\text{V C106 C}$   
 $> 400\text{V C106 D}$

##### Région de blocage en direct :

Courant de retournement :  $I_{Bo} > 400\mu\text{A}$   
 Tension de retournement :  $U_{Bo} > 100\text{V C106 A}$   
 $> 200\text{V C106 B}$   
 $> 300\text{V C106 C}$   
 $> 400\text{V C106 D}$

##### Amorçage :

Courant d'amorçage :  $I_{GT}=200\mu\text{A max.}$   
 Tension d'amorçage :  $U_{GT}=1\text{V max.}$

La fiche technique d'un SCR comporte quatre parties. Dans la première partie, on peut trouver la description du composant, le numéro de pièce, la forme du boîtier ainsi qu'une description sommaire des modèles.

La deuxième partie est consacrée aux limites maximales d'utilisation du SCR qu'il ne faut jamais dépasser pour éviter d'endommager le SCR.

La troisième partie indique les caractéristiques électriques d'utilisation normale du SCR. La quatrième est une extension de la troisième, mais sous la forme de graphes.

## 1.2 Procédés d'amorçage des thyristors

### 1.2.1 Introduction

Tout processus de commutation comporte quatre phases :

- 1- L'amorçage (turn-on)
- 2- L'état conducteur (on state)
- 3- Le désamorçage (turn-off)
- 4- L'état bloqué (off state)

Lorsqu'un SCR conduit, les principales caractéristiques à considérer sont le courant maximum  $I_t$ , le courant minimum ou courant de maintien  $I_H$  et la puissance dissipée  $P_D$ .

Pour un SCR bloqué, il faut tenir compte principalement de la tension maximale qu'il peut supporter en direct, c'est la tension de retournement ou « Breakover Voltage »  $U_{BO}$  et en inverse, c'est la tension d'avalanche  $U_{BR}(R)$ .

Dans les pages qui suivent, nous porterons notre attention sur le comportement dynamique du SCR à l'amorçage et au désamorçage. Nous discuterons du temps de fermeture  $T_{on}$  (turn-on-time) et du phénomène de  $di/dt$  ainsi que du temps d'ouverture  $T_{off}$  (turn-off-time).

### 1.2.2 Amorçage par résistance et condensateur

Pendant l'alternance négative (B(+)), la diode D2 court-circuite R et le condensateur C se charge à la valeur  $E_{max}$ ; l'armature inférieure est alors positive, puis il commence à se décharger (zone OP). Pendant l'alternance positive (A(+)), le condensateur reçoit le courant  $i$  et se charge en fonction de la constante de temps RC jusqu'à ce que la tension  $V_c$  atteigne la valeur de  $V_{gt}$ , ce qui provoque l'amorçage du Th. L'angle d'amorçage est directement proportionnel à la valeur de R et peut varier de 0 à 180°.

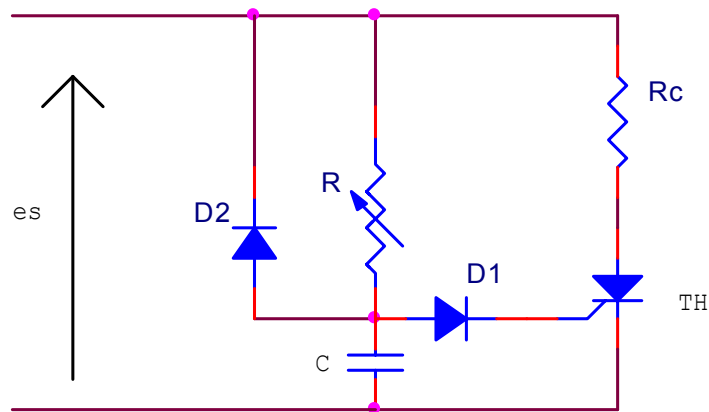


Figure 1-5 : Déclenchement par RC : schéma de principe

### 1.2.3 Amorçage résistif en régime continu

Le circuit de la figure 1-6 montre l'amorçage résistif d'un SCR en régime continu. Comme le courant de gâchette est fourni par la source d'entrée, une résistance dans le circuit de la gâchette est nécessaire pour limiter le courant à une valeur qui n'endommagera pas le SCR. Pour amorcer le dispositif, il suffit de fermer momentanément l'interrupteur afin de solliciter la gâchette

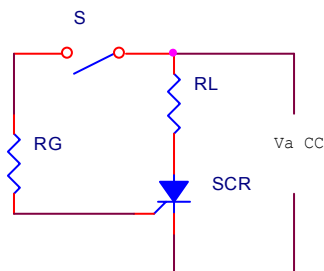


Figure 1-6 : Amorçage résistif d'un SCR

Pour que le SCR puisse être amorcé il faut que le courant de gâchette  $I_g$  soit égal à la valeur du courant de gâchette prescrite pour le SCR en question.

La loi de Kirchoff appliquée au circuit gâchette permet d'écrire l'équation suivante :

$$V_A = R_g I_{gt} + V_{gt} \Rightarrow R_g = (V_A - V_{gt})/I_{gt}$$

La loi de Kirchoff appliquée au circuit de charge nous permet d'écrire l'équation suivante :

$$V_A = I_t R_L + V_{ak} \Rightarrow I_t = (V_A - V_{ak})/R_L$$

En fait, on doit considérer les limites suivantes pour le courant principal:

Pour l'amorçage :  $I_{tmax} > I_t > I_L$

Pour maintenir l'amorçage sans courant de gâchette :

$I_{tmax} > I_t > I_h$

La valeur de la résistance de charge doit donc se situer entre les limites suivantes :

$$R_{Lmin} \leq R_L \leq R_{Lmax} \Rightarrow (V_A - V_{ak}) / I_{tmax} \leq R_L \leq (V_A - V_{ak}) / I_L \quad (1.8)$$

### Exercice 1.1

La fiche technique du SCR S2003LS3 fournit les données suivantes :

$I_{gt} = 200 \mu A$  ;  $V_{gt} = 0.8 V$  ;  $I_{tmax} = 3 A$   $I_h = 6 mA$   $V_{tm}$  (ou  $V_{ak}$ ) = 1.6 V

On considère la figure 1-6 avec une résistance de charge de 1 kΩ et une source de tension de 12 Vcc.

1. Calculer la valeur de  $R_g$  pour assurer l'amorçage.
2. on décide de remplacer la résistance de charge de 1 kΩ par une autre de 3 kΩ la résistance  $R_g$  demeure la même. Le SCR peut-il être amorcé ? pourquoi ?
3. trouver la valeur maximale de  $R_L$  en tenant compte d'un courant d'accrochage  $I_L$  de 8 mA.
4. Trouver la valeur minimale de  $R_L$  en tenant compte du courant maximal permis à travers le SCR.
5. Trouver la puissance de la résistance  $R_{Lmin}$ .

### 1.2.4 Amorçage résistif en régime alternatif

Le circuit de la figure 1-7 réalise l'amorçage d'un SCR en régime alternatif.

Le SCR s'amorce quand la tension instantanée,  $e_s = E_{max} \sin \omega t$ , atteint une valeur égale à :

$$e_s = V_{gt} + V_d + R_g I_{gt}$$

la valeur de l'angle d'amorçage qu'on veut réaliser dépendra directement de la valeur de la résistance  $R_g$  ;

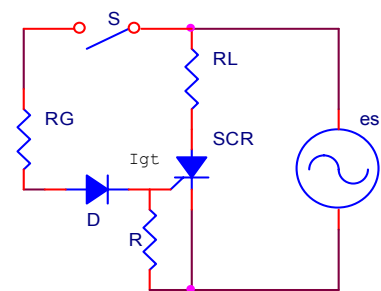


Figure 1-7 : Amorçage résistif d'un SCR en régime alternatif

Le rôle de la diode D, en série avec la résistance  $R_g$ , est de protéger la jonction gâchette-cathode du SCR contre les surtensions en polarisation inverse.

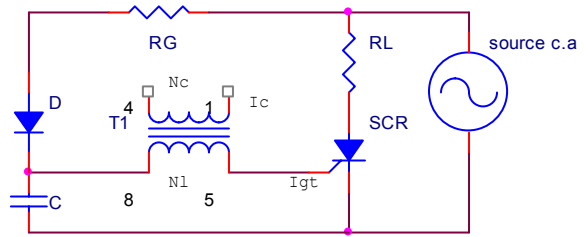
Quant à la résistance, en parallèle avec la jonction gâchette-cathode, elle sert à protéger le SCR contre l'amorçage accidentel qui pourrait parvenir du courant de fuite de la jonction anode-gâchette du SCR.



### 1.2.5 Amorçage par impulsion électrique

L'amorçage par impulsion électrique est la méthode d'amorçage la plus souvent utilisée, car elle permet d'obtenir des angles de conduction plus précise et ce, d'une manière plus efficace. Les premiers dispositifs permettent ce genre d'amorçage utilisaient des amplificateurs magnétiques.

L'amorçage par impulsion électrique se fait de plus en plus avec l'aide des semi-conducteurs à seuil de tension, appelés encore dispositifs de déclenchement.

<p>L'enroulement de charge <math>N1</math> représente l'inductance variable. Il est parcouru par le courant de gâchette <math>I_{gt}</math>. L'enroulement de contrôle <math>Nc</math> permet de varier la perméabilité du noyau magnétique à l'aide d'un courant de contrôle continu <math>I_c</math>.</p>	 <p style="text-align: center;"><b>Figure 1-8 : Amorçage par impulsion avec amplificateur magnétique</b></p>
<p>Quand le courant <math>I_c</math> est nul, l'inductance de charge est maximale et la valeur du courant de gâchette est insuffisante pour amorcer le SCR. Quand <math>I_c</math> augmente brusquement, l'inductance de charge tombe à sa valeur minimale et permet ainsi de décharger le condensateur dans la gâchette du SCR pour l'amorcer.</p>	

### 1.2.6 Angle d'amorçage et angle de conduction d'un SCR

Lorsqu'on examine la forme d'onde de la tension aux bornes du SCR, on remarque que ce dernier ne laisse passer qu'une partie de l'alternance positive du cycle alternatif. En l'absence d'un courant de gâchette suffisant et durant toute l'alternance négative, le SCR est bloqué.

Le décalage  $\alpha$  qu'on retrouve avant que la tension apparaisse aux bornes de la résistance de charge  $RL$  est appelé angle de retard ou angle d'amorçage. Le décalage  $\Theta_c$  représente l'angle de conduction du SCR. On a :

$$\Theta_c = 180^\circ - \alpha \tag{1.9}$$

### 1.3 Méthodes de désamorçage (blocage du SCR)

Il existe deux méthodes générales pour désamorcer un SCR: La commutation par interruption de courant et la commutation forcée. Ces deux méthodes visent le même objectif: diminuer le courant d'anode à une valeur inférieure au courant de maintien  $I_H$ .

La technique de commutation par interruption de courant est illustrée à la Figure 1-9. Dans les deux montages, si on maintient SW1 fermé pendant un temps supérieur au

Ton du SCR, ce dernier amorce et la DEL s'allume. Pour bloquer le SCR, il suffit d'actionner SW2 pendant un temps supérieur à  $T_{off}$ .

La charge est désalimentée au moment où on presse SW2 du circuit a) et au moment où on relâche SW2 dans le circuit b).

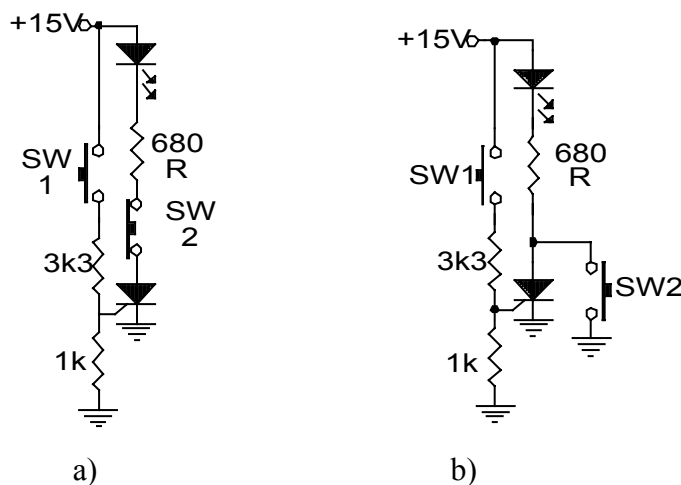


Figure 1-9 Désamorçage par interruption de courant

Notons finalement que ces deux circuits sont sujets à des  $dv/dt$  importants lorsqu'on relâche SW2.

Il existe plusieurs techniques de commutation forcée. Toutefois, nous limiterons notre étude à la «commutation forcée par condensateur» et à la «commutation forcée par source alternative».

La Figure 1-10 montre le circuit de base pour désamorcer un SCR par condensateur.

Au départ, le SCR est bloqué et le condensateur C est déchargé.

Lorsqu'un courant de gâchette vient amorcer le SCR à  $t_1$ , la tension d'anode tombe de  $U_{cc}$  à  $U_t$  et la condensateur se charge à travers R.

Après  $5\tau$ , la tension aux bornes de ce dernier vaut  $U_{cc} - U_t$ . À  $t_2$ , on appuie sur SW pour désamorcer le SCR.

La forme d'onde  $U_{sw}$  passe donc de  $U_{cc}$  à 0. Le condensateur C force la tension d'anode à diminuer aussi d'une valeur égale à  $U_{cc}$  jusqu'à  $-(U_{cc} - U_t)$ .

À partir de cet instant, C se charge en inverse à travers  $R_L$  jusqu'à  $U_{cc}$ .

Finalement, lorsqu'on relâche SW à  $t_3$ , la tension d'anode devient supérieure à l'alimentation, car C se décharge à travers  $R_L + R$ , tel que démontré à la Figure 1-1.

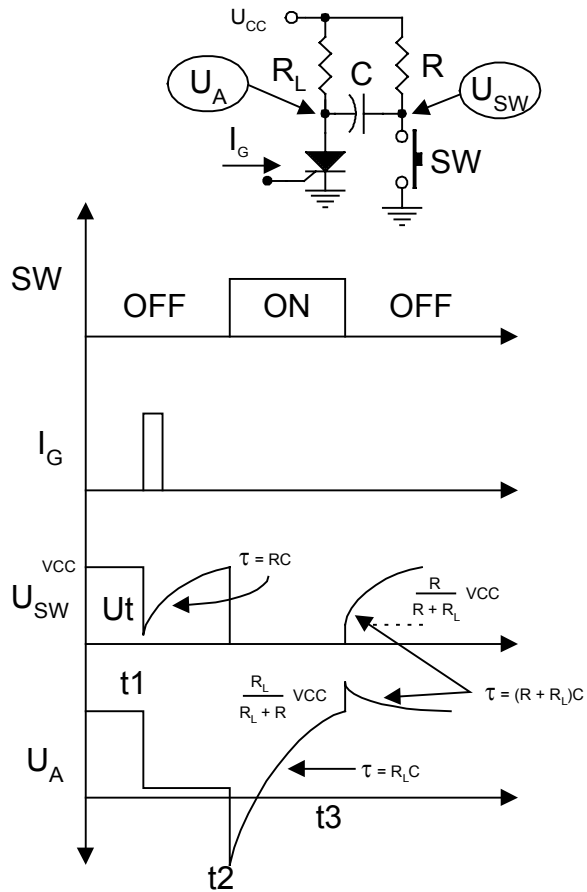


Figure 1-10 désamorçage par commutation forcée par condensateur

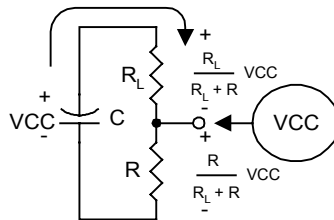


Figure 1-11 Décharge de C à  $t_3$

Pour assurer le désamorçage du SCR, il faut que C maintienne le potentiel d'anode négatif pendant un temps  $T_c$  au moins égal au  $T_{off}$  spécifié par le fabricant. Or, le temps requis à un condensateur pour atteindre une valeur  $U_c$  lorsqu'il se charge de  $E_i$  (tension initiale) jusqu'à  $E_f$  (tension finale) se calcule comme suit:

$$t = \tau \ln \left( \frac{E_f - E_i}{E_f - U_c} \right) \quad (1.10)$$

En appliquant cette expression à notre circuit, la condition de commutation garantie du SCR s'écrit de la façon suivante:

$$T_c = R_L C \ln \left( \frac{U_{cc} - [-(U_{cc} - U_t)]}{U_{cc} - 0} \right) \geq T_{off}$$

$$R_L C \ln \left( \frac{2U_{cc} - U_t}{U_{cc}} \right) \geq T_{off}$$

$$C \geq \frac{T_{off}}{R_L \ln \left( \frac{2U_{cc} - U_t}{U_{cc}} \right)} \quad (1.11)$$

Dans la plupart des cas,  $U_t$  est négligeable et l'équation (1.11) se réduit à:

$$C \geq \frac{T_{off}}{R_L \ln 2} \quad (1.12)$$

Comme le montre la Figure 1-12, l'interrupteur SW peut se remplacer par des interrupteurs électroniques tels le transistor et le SCR. Les formes d'onde du circuit a) sont identiques à celles du circuit de base de la figure précédente. Pour le circuit b), le lecteur pourra vérifier de lui-même les formes d'onde qui accompagnent le schéma.

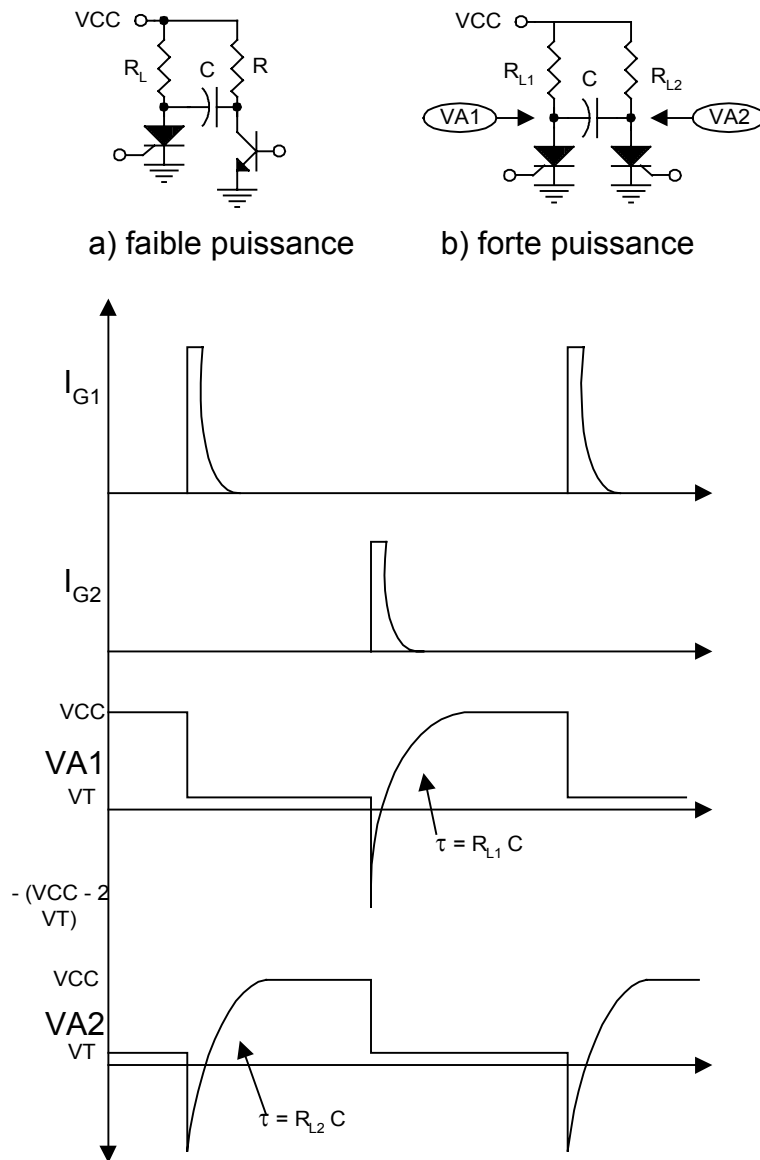


Figure 1-12 Circuits pratiques pour la commutation forcée par condensateur

La technique de commutation forcée par source alternative ne nécessite pas de circuit de désamorçage. Comme l'indiquent les formes d'onde du circuit de la Figure 1-13, à chaque alternance négative, le SCR bloque obligatoirement. Si on veut amorcer ce dernier, on doit utiliser l'une ou l'autre des techniques d'amorçage vues jusqu'à présent durant l'alternance positive.

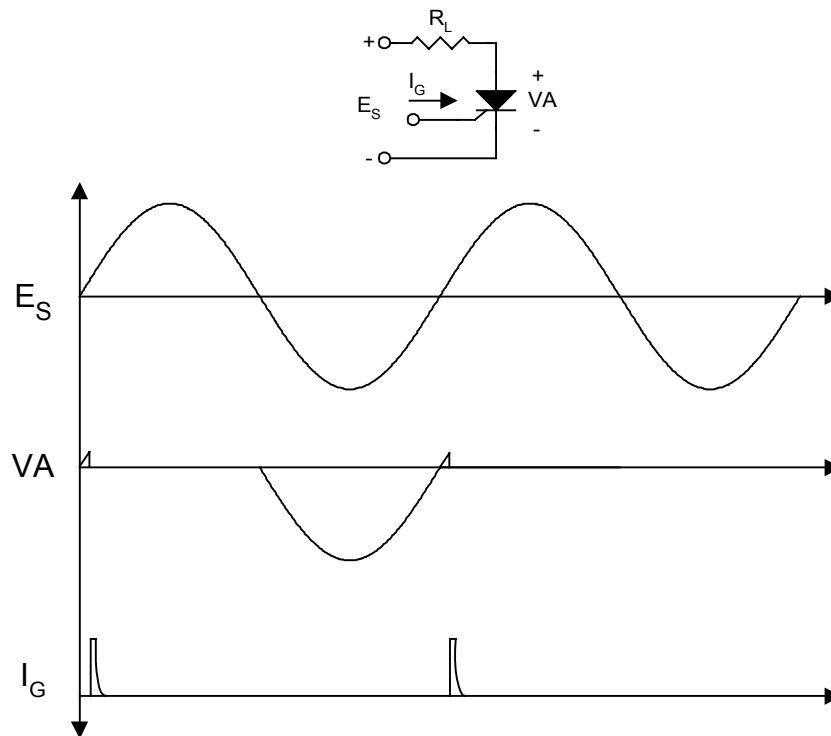


Figure 1-13 : Commutation forcée par source CA

### Exercice 1.2

1. Complétez la phrase suivante.

La commutation naturelle est aussi appelée -----.

2. Combien de signaux de commande sont-ils requis pour réaliser la commutation naturelle et la commutation forcée d'un SCR.

## 1.4 Protection des thyristors

Les thyristors sont des composants d'une grande fiabilité possédant une durée pratiquement illimitée ; cependant, comme tous les semi-conducteurs, ils sont très sensibles aux charges. Il faut donc les protéger efficacement contre les surtensions, les surintensités et les échauffements excessifs.

### 1.4.1 Protection contre les surtensions

Pour protéger les thyristors contre les surtensions, on a habituellement recours aux moyens suivants.

**Surdimensionnement des thyristors :** on utilise des thyristors ayant une tension inverse de crête répétitive supérieure à la tension inverse de crête réellement appliquée. Le coefficient de surdimensionnement est d'environ 2.

**Dispositifs écréteurs:** constitués par un circuit RC monté en parallèle sur les thyristors, ces dispositifs protègent les thyristors contre les surtensions au moment du blocage et contre les surtensions extérieures.

La résistance R en série avec C sert à limiter le courant d'anode à l'amorçage. Ce courant est constitué du courant de RC ainsi que du courant de décharge de C qui peut être très intense sans R. Les valeurs de R se situent en général entre  $10\Omega$  et  $100\Omega$  environ.

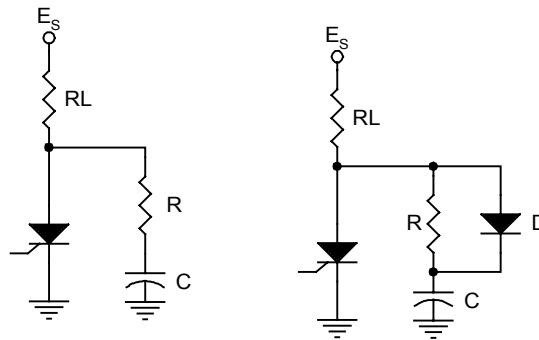


Figure 1-14 protection contre les du/dt

Si la résistance R est plus grande que  $R_L$ , il convient de placer une diode en parallèle pour que la tension d'anode soit bien celle du condensateur lorsque  $E_s$  augmente.

### 1.4.2 Protection contre les surintensités

Lorsque les thyristors sont à l'état passant, seul la résistance du circuit de charge limite le courant direct maximal. En l'absence de protection, une surintensité accidentelle peut provoquer l'échauffement excessif de la jonction et la destruction du thyristor.

La protection la plus simple contre les surintensités accidentelles causées par un court-circuit ou par une fausse manœuvre est l'utilisation de fusibles à action rapide (ou ultra-rapide) ou de disjoncteurs.

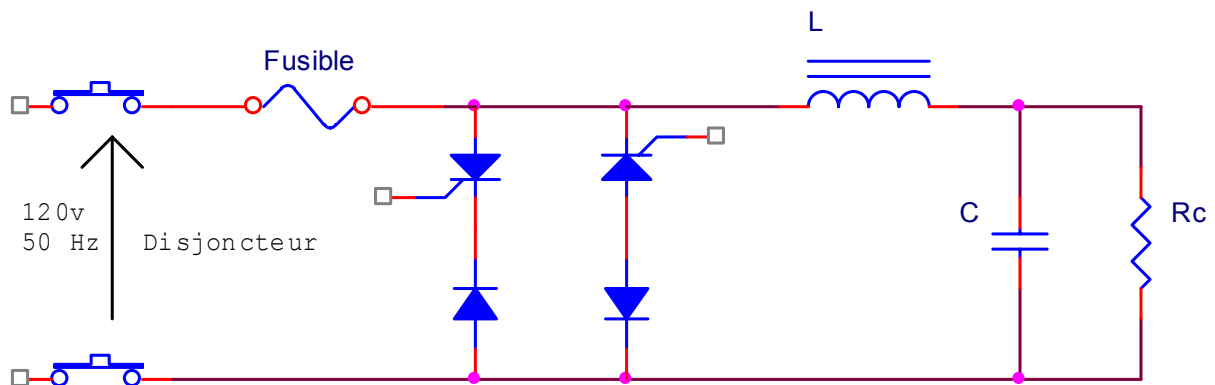


Figure 1-15 : Circuit de protection contre les surintensités accidentelles.

### 1.4.3 Protection contre les échauffements excessifs

La bonne utilisation des thyristors exige que l'énergie thermique provenant du passage du courant soit dissipée afin que la température de la jonction se maintienne à un niveau admissible. Les différents procédés de refroidissement sont :

- **Le refroidissement par le boîtier** : il est utilisé pour les thyristors de faible puissance.
- **Le refroidissement par dissipateur de chaleur** : le dissipateur est fixé sur le thyristor. Il est généralement en aluminium et muni d'ailettes augmentant sa surface totale.
- **Le refroidissement par des fluides intermédiaires (eau, huile, etc.)** : il est réservé aux thyristors de forte puissance. Le liquide circulant dans les radiateurs évacue la chaleur.

## 1.5 Différents types de SCR

Les types de SCR que l'on peut rencontrer sur le marché dépendent de l'application dans laquelle ils sont utilisés. On distingue :

**SCR standard** : sert principalement au redressement des tension alternatives en tensions continues pulsatives. Il est conçu pour des fréquences ne dépassant pas 1 kHz et des puissances dépassant plusieurs kilo-watts.

**SCR sensible** : appelé aussi le darlistor, tient son nom du fait qu'il s'amorce très facilement comparativement au SCR standard (le courant de gâchette est au dessous du milliampère). Il se trouve généralement dans des circuits électroniques de basse puissance.

**SCR rapide** : se différencie des autres SCR par sa fréquence d'utilisation qui peut atteindre 10 kHz. Il est caractérisé par un très faible temps de désamorçage qui ne dépasse pas 5  $\mu$ s et des tensions de blocage pouvant atteindre les 700 V. On le retrouve surtout dans les premiers convertisseurs de puissance.

**SCR asymétrique** : sa particularité vient du fait que sa tension de blocage en polarisation inverse est très faible par rapport aux autres types de SCR, ce qui se traduit par un temps de désamorçage parmi les plus faible qui puissent être. Conçu pour des applications à puissance élevée et à des fréquences qui peuvent atteindre les 50 kHz. Il remplace le SCR rapide dans la nouvelle génération de convertisseurs de puissance plus compact et plus légers.

### Exercice 1.3

1. Quelles sont les différentes façons de bloquer un SCR?
2. Quelle est la particularité d'un SCR standard?
3. Qu'est-ce qui distingue le SCR asymétrique de tous les autres types de SCR?



## 1.6 Les thyristors unidirectionnels spéciaux

### 1.6.1 Thyristor blocable par gâchette – GTO

#### Structure et symbole :

La figure 1-16 montre la structure physique et le symbole électrique d'un GTO. En gros, cette structure est la même que celle du SCR. Elle est composée de quatre couches semi-conducteurs PNPN.

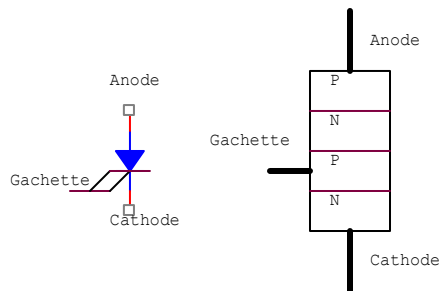


Figure 1-16 : Symbole et Structure d'un GTO

#### Fonctionnement :

Le fonctionnement du GTO est très similaire à celui du SCR, sauf en ce qui a trait à l'amorçage. Dans le cas d'un GTO, l'amorçage et le blocage se font par la gâchette. La figure 1-17 montre le circuit équivalent d'un GTO.

Une impulsion positive à la gâchette amorce le GTO. La partie SCR et le transistor Q3 conduisent alors le courant principal du GTO.

Une impulsion négative appliquée à la gâchette du GTO a donc comme effet l'extinction du transistor Q3 et, par conséquent, le blocage du GTO.

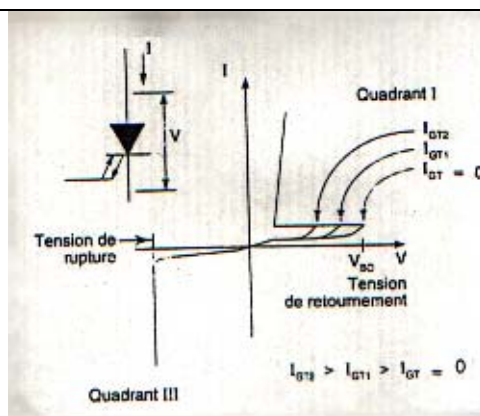


Figure 1-18 : Caractéristique « courant-tension » d'un GTO

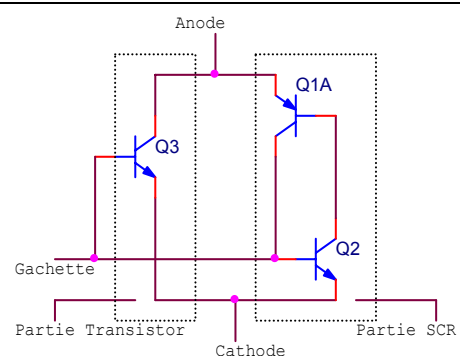


Figure 1-17 : Circuit équivalent d'un GTO

### 1.6.2 Photothyristor -LASCR

Le photothyristor est dérivé directement du SCR. Il est souvent désigné par son abréviation LASCR qui signifie en anglais Light Activated SCR. C'est ni plus ni moins un SCR qui peut être amorcé par lumière.

#### Symbole et circuit équivalent :

La figure 1-19 montre le symbole et le circuit équivalent d'un LASCR. C'est un composant à trois électrodes. Il peut être amorcé soit par la lumière, soit par une impulsion électrique à la gâchette.

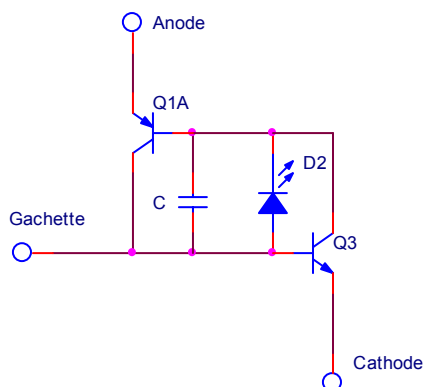


Figure 1-19 : Symbole et circuit équivalent d'un LASCR

#### Fonctionnement :

La lumière qui atteint la photodiode crée un courant entre les deux électrodes de base des transistors. Si l'énergie lumineuse est suffisante, la photodiode génère le courant de gâchette nécessaire pour amorcer le LASCR.

Dans les applications courantes, le LASCR est souvent utilisé pour la fabrication des optocoupleurs, comme le montre la figure 1-20.

Un signal de commande est appliqué aux bornes de la DEL qui constitue un dispositif d'entrée. Ce signal électrique est transformé en signal lumineux que le LASCR transforme à son tour sous forme d'un signal électrique. L'optocoupleur réalise ainsi une isolation électrique entre le signal d'entrée et le signal de sortie. L'un des premiers avantages des optocoupleurs réside dans la simplicité d'interface, qu'ils permettent de mettre en place, entre deux circuits alimentés par des sources distincts.

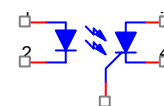
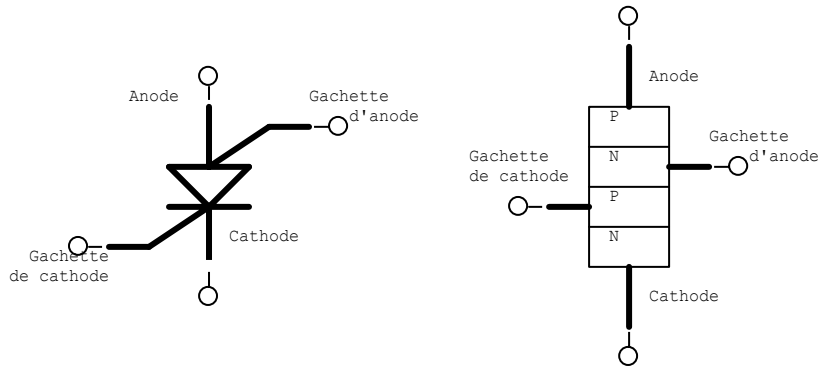


figure 1-20 :  
Diagramme d'un  
optocoupleur à sortie  
LASCR

### 1.6.3 Thyristor à double gâchette SCS

**Structure et Symbole :**

Il est constitué de quatre couches semi-conductrices PNPN. Par contre, les deux gâchettes le différencient des autres thyristors unidirectionnels. Il possède quatre électrodes qui sont : l'anode, la cathode, la gâchette d'anode Ga et la gâchette de cathode Gk.



**Figure 1-21 : Structure et Symbole d'un SCS**

**Fonctionnement :**

Le fonctionnement d'un SCS est similaire à celui de deux transistors connectés en mode de régénération.

<p>Pour amorcer un SCS, il faut :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soit une impulsion positive à la gâchette de la cathode (gâchette standard) ;</li> <li>• Soit une impulsion négative à la gâchette de l'anode (gâchette complémentaire).</li> </ul> <p>Pour bloquer un SCS, il faut :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soit une impulsion positive à la gâchette d'anode ;</li> <li>• Soit la commutation du courant de maintien.</li> </ul>	<p><b>Figure 1-22 : Circuit équivalent d'un SCS</b></p>
---	---

## II. ELEMENTS DE DECLENCHEMENT

### 2.1 Introduction

Les techniques d'amorçages résistif et par circuit RC sont rarement utilisées à cause du fait que le signal de gâchette doit être présent pendant une grande partie du temps durant lequel le SCR est amorcé. Cela implique une surchauffe de la gâchette du SCR, ce qui risquerait de l'endommager.

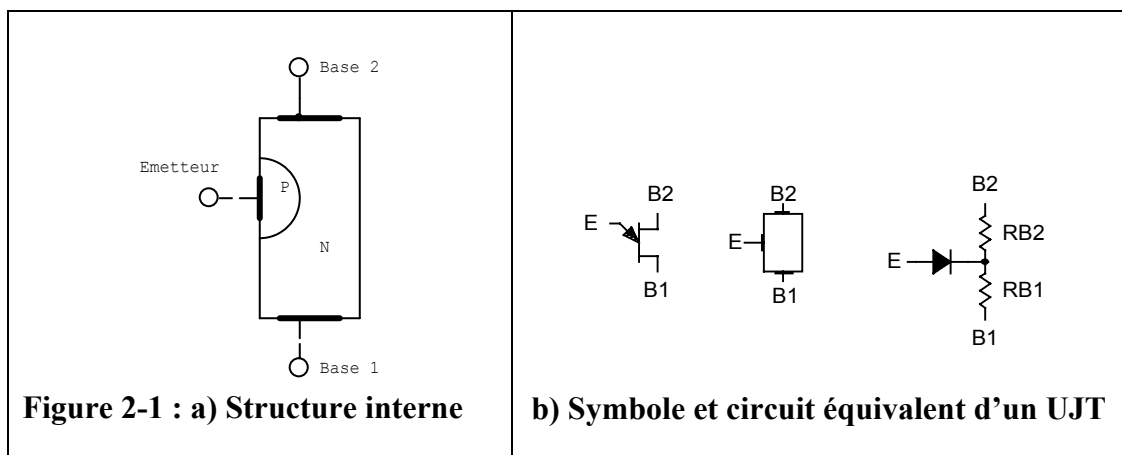
Les thyristors de déclenchement sont spécialement conçus pour réaliser des circuits d'amorçages plus performants afin de faciliter l'utilisation des thyristors de puissance comme le SCR et le TRIAC. Ces thyristors peuvent être classés comme unidirectionnels et bidirectionnels.

### 2.2 Les thyristors de déclenchement unidirectionnels

#### 2.2.1 Transistor Unijonction – UJT

##### Structure et circuit équivalent:

Le transistor unijonction est formé de deux couches semi-conductrices PN et comporte trois électrodes : un émetteur et deux bases. La figure 2-1 a) et b) représente la structure interne ainsi que le symbole et le circuit équivalent de l'UJT.



##### Principe de fonctionnement :

Un UJT est essentiellement composé d'une diode et d'une résistance variable RB1 et d'une résistance fixe RB2.

Les fabricants spécifient généralement pour chaque type des UJT les paramètres suivants :

**VA** : tension aux bornes de RB1.

$\eta$  : le rapport intrinsèque ;

$$\eta = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.1)$$

Les valeurs typiques de  $\eta$ , pour chaque UJT, sont données par le fabricant. Elles peuvent généralement varier entre 0.5 et 0.8.

Avec la valeur du rapport intrinsèque du UJT, on calcule la valeur de la tension  $V_A$  à l'aide de la formule :

$$V_A = \eta V_{BB} \quad (2.2)$$

Dans laquelle  $V_{BB}$  représente la tension entre les bases B1 et B2 du UJT.

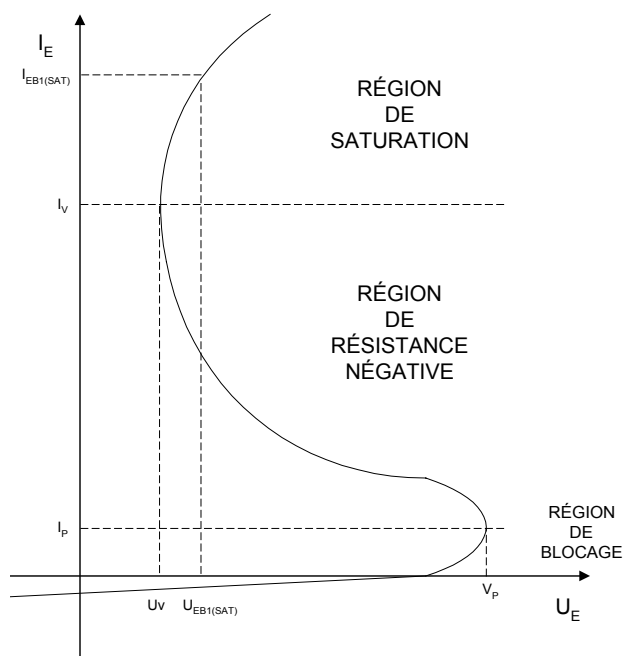


Figure 2.2 : Courbe  $I_E-U_E$  d'un TUJ

$U_V$  : tension de vallée

$U_P$  : tension de PIC (tension de pincement)

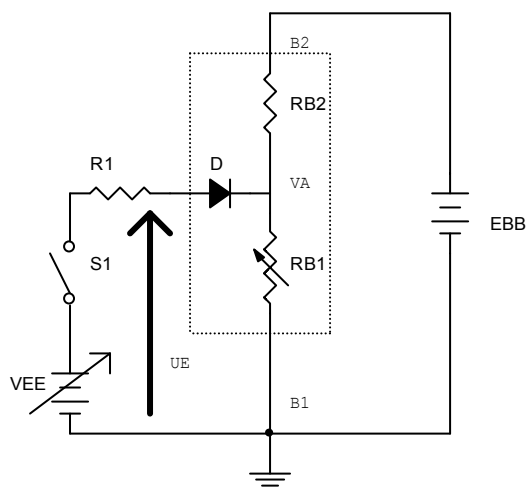


Figure 2-3 : Circuit d'amorçage d'un UJT

Si l'interrupteur S1 est ouvert, le courant dans l'émetteur est nul. La résistance entre la base 1 et la base 2 est alors égale la somme des résistances internes  $R_{B1}$  et  $R_{B2}$  du UJT. Elle peut varier entre  $3\text{ k}\Omega$  et  $10\text{ k}\Omega$ .

Avec la connaissance de l'ordre de grandeur de la tension  $V_A$ , il sera facile de comprendre le fonctionnement du UJT. En effet, à la fermeture de S1, si la tension  $U_E$  est inférieure à  $V_A$ , la diode D se trouve polarisée en inverse. Par conséquent, il n'y a pas de courant qui circule entre l'émetteur et la base B1 du UJT.

En augmentant progressivement la tension  $U_E$  par la source VEE, la diode D devient conductrice dès que la tension  $U_E$  est supérieure à  $V_A$  de  $0.7\text{ V}$ . A ce moment, le UJT devient conducteur et agit comme une résistance négative. Le courant  $I_E$  qui circule à travers la diode augmente alors rapidement. Au même moment, la tension  $V_{EB1}$  tombe à une tension de vallée  $U_v$  minimale. Le courant  $I_E$  émetteur ne sera limité que par la résistance R1 et la tension VEE.

La figure 2-2 montre caractéristique courant-tension d'un UJT. Dans cette caractéristique on distingue trois régions d'opération : la région de blocage, la région de résistance négative et la région de saturation. C'est la région de résistance négative qui procure au UJT son utilité pour servir à réaliser des circuits de déclenchement des thyristors ou simplement d'oscillateurs à relaxation.

La tension de pointe  $V_p$  (point crête) est donnée par la relation :

$$V_p = \eta E_{BB} + V_D \tag{2.3}$$

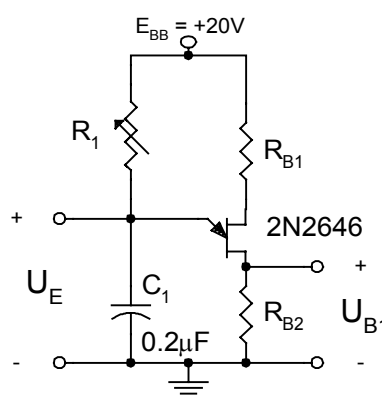
**Oscillateur relaxateur et transistor unijonction :**

Cet oscillateur relaxateur est fréquemment utilisé pour le déclenchement de thyristors, car il est simple et peu coûteux et qu'il ne comprend que quatre composants.

Lorsque la tension  $E_{BB}$  est appliquée au circuit, le condensateur C1 se charge à travers la résistance R1 selon la relation exponentielle :

$$V_c = E_{BB}(1 - \exp(-t/RC)) \tag{2.4}$$

Dès que la tension aux bornes de C1 atteint la valeur de  $PIC$ , le UJT laisse passer le courant et le condensateur se décharge à travers la résistance  $R_{B2}$ , produisant ainsi une impulsion positive à la borne B1.



**Figure 2-4 : Oscillateur relaxateur à UJT**

Une impulsion négative de plus faible amplitude est produite simultanément à la borne B2. Lorsque  $V_c$  atteint la valeur de la tension de vallée (environ 2 V), le UJT se bloque et le cycle recommence.

L'amplitude des impulsions dépend du diviseur de tension formé par la résistance interbase  $r_{bb}$  et les résistances  $R_{B1}$  et  $R_{B2}$ .

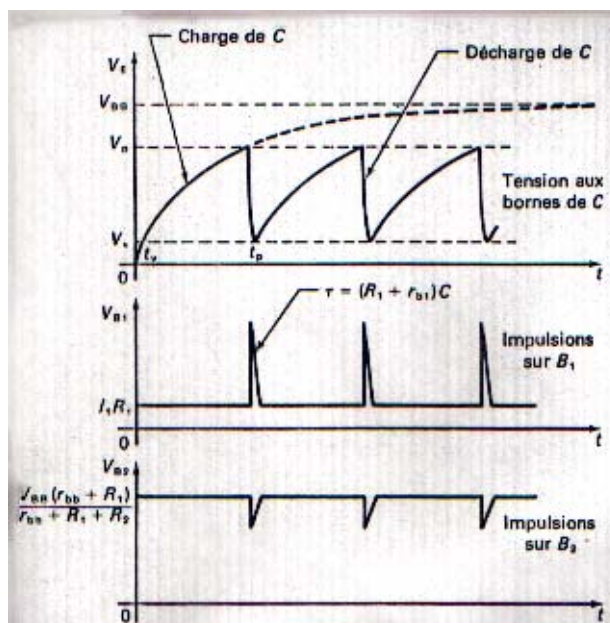


Figure 2-5 : Oscillogrammes relatifs à l'oscillateur relaxateur à UJT.

La période des impulsions dépend des valeurs de  $R$ ,  $C$  et  $\eta$ . La valeur de la période des oscillations est donnée par :

$$T \cong RC \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right) \quad (2.5)$$

Pour que l'oscillateur relaxateur puisse osciller la résistance  $R$  doit être telle que :

$$R(\min.) = \frac{E_{BB} - U_V}{I_V} < R < R(\max.) = \frac{E_{BB} - U_P}{I_P} \quad (2.6)$$

**Exercice 2.1**

Un oscillateur relaxateur est constitué d'un UJT 2N2646 et d'un condensateur de 0.2  $\mu$ F. on donne :

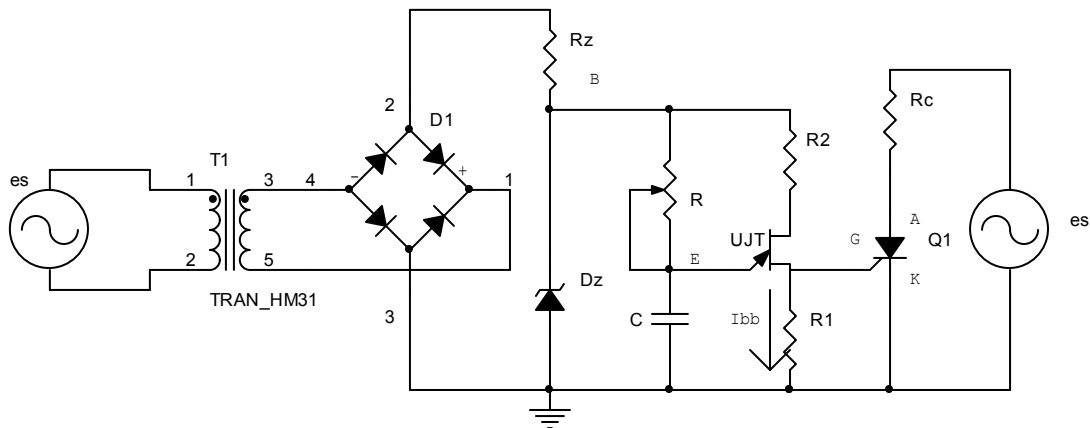
- $\eta_{typ.} = 0.69$
- $I_P(\max.) = 5 \mu A$
- $I_V(\min.) = 4 mA$
- $U_D \approx 0.5V$
- $U_V \approx 1.5V$

Calculez, lorsque  $E_{BB}$  est égale à 20 V :

1. la valeur de la résistance R requise pour obtenir une fréquence d'oscillation de 500 Hz ;
2. les valeurs limites théoriques de R et f.

**Amorçage du thyristor par un transistor unijonction :**

Un circuit d'amorçage du thyristor par un transistor UJT est représenté à la figure 2-6. Dans ce circuit de base, l'impulsion positive produite par l'oscillateur relaxateur est appliquée directement à gâchette du thyristor.



**Figure 2-6 : a) Amorçage d'un thyristor par un UJT**

L'angle d'amorçage du thyristor, qui correspond à la période d'oscillation T, est contrôlé par la variation de la vitesse de charge du condensateur à l'aide du potentiomètre R.

Ce circuit permet de faire varier l'angle d'amorçage de 0° à 180°. Le temps de retard à l'amorçage est déterminé par la relation :

$$tr \cong RC \ln \left( \frac{1}{1 - \eta} \right) \tag{2.7}$$

de sorte que l'angle d'amorçage est :

$$\alpha \cong \frac{2\pi tr}{T} \cong 2\pi f tr \tag{2.8}$$

La résistance R1 doit être suffisamment faible pour que le thyristor ne soit pas déclenché accidentellement par le courant Ibb circulant à travers R1. La valeur maximale de R1 est donc limitée à :

$$R_{1,max} \leq \frac{V_{GT,min}}{I_{bb}} \tag{2.9}$$

Où :



$$I_{bb} \cong \frac{V_{BB}}{R_1 + R_2 + r_{BB}} \quad (2.10)$$

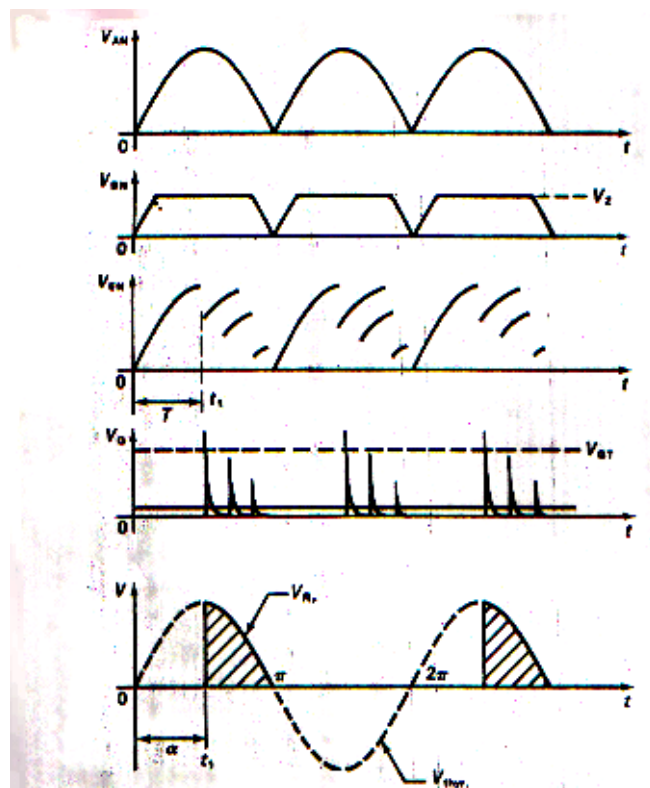


Figure 2-6 : b) formes d'onde du circuit d'amorçage.

Puisque ;  $r_{BB} \gg R_1 + R_2$ , on obtient :

$$R_{1,max} \leq \frac{V_{GT,min} r_{BB}}{V_{bb}} \quad (2.11)$$

### Exercice 2.2

Le circuit d'amorçage de la figure 2-6 comprend les éléments suivants :

- condensateur C de 0.1  $\mu$ F ;
- diode zener 1N5253B ;  $V_z=25$  V ;
- UJT 2N2646:  $\eta = 0.69$ ;  $r_{bb} = 6.7$  k $\Omega$ ;  $f = 50$  Hz.

Calculez:

1. le temps de retard à l'amorçage et l'angle d'amorçage du thyristor lorsque le potentiomètre R est ajusté à 10 k $\Omega$ ;
2. la valeur maximale de R1, sachant que la tension d'amorçage  $V_{GT} = 0.7$  V (il faut prévoir une marge de sécurité de 0.4 V pour la tension d'amorçage).

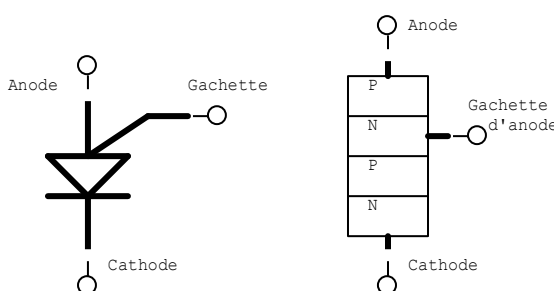
**Application du transistor unijonction :**

Les transistors unijonction sont principalement utilisés dans les circuits d’amorçage des thyristors, les oscillateurs relaxateurs, les circuits temporisateurs et les circuits détecteurs de tension.

**2.2.2 Transistor Unijonction Programmable – PUT**

**Structure et Symbole:**

Le transistor unijonction programmable est constitué par un dispositif semi-conducteur PNPN à trois jonctions et à trois électrodes de sortie (anode cathode et gâchette d’anode).



**Figure 2-7 : Symbole et structure d’un PUT**

**Principe de fonctionnement :**

Le montage du PUT peut être représenté par un circuit équivalent tel que celui illustré à la figure 2-8.b, dans lequel :

$$R_G \equiv \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.12)$$

Ce dispositif présente une caractéristique tension-courant semblable à celle de UJT (figure 2-8 ©)

La gâchette d’anode est polarisée à la tension VG par l’intermédiaire du pont de résistance constitué par R1 et R2. Lorsque la tension VA est inférieure à la tension VG, la diode anode-gâchette d’anode est polarisée en inverse et le PUT n’est traversé que par un très faible courant de fuite.

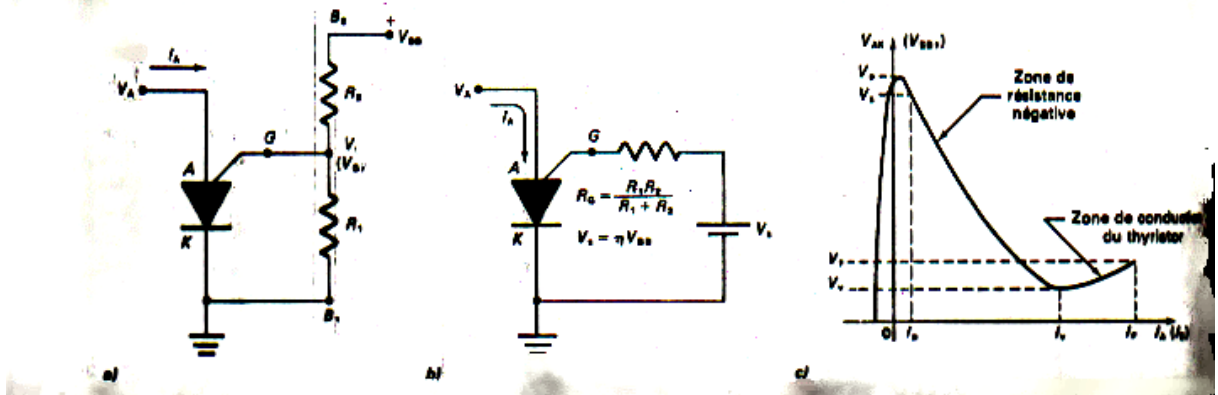


Figure 2-8 :a) Montage à PUT ; b) circuit équivalent de Thévenin ; c) caractéristique tension-courant.

Lorsque la tension d'anode \$V\_A\$ devient supérieure à la tension de gâchette \$V\_G\$, d'une valeur égale à environ 0.5 V, un courant circule dans l'anode et la gâchette et déclenche brusquement le thyristor cela a pour effet de réduire la résistance entre la gâchette et la cathode à une très faible valeur (de l'ordre de 10 \$\Omega\$). Il se produit un effet de résistance négative c'est-à-dire que le courant d'anode \$I\_A\$ augmente alors que la tension d'anode \$V\_A\$ diminue jusqu'à une valeur minimale appelée tension de vallée. Le courant d'anode nécessaire au déclenchement est le courant de pic \$I\_p\$ ; ce courant est d'autant plus faible que la résistance \$R\_G\$ est grande.

A l'état passant, la source de tension \$V\_S\$ fournit, à travers \$R\_G\$, un courant égal à :

$$I_{GA} = \frac{V_S - V_{GA}}{R_G} \quad (2.13)$$

Ce courant qui circuler en sens inverse du courant de déclenchement, est un courant de blocage du thyristor.

En résumé, le PUT laisse passer le courant, lorsque :

$$V_A = V_G + V_D$$

La tension de pic du PUT est donnée par :

$$V_p = \eta V_{BB} + V_D = \eta V_{BB} + V_{AG}$$

Le rapport intrinsèque du PUT est :

$$\eta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_p + V_D}{V_{BB}} \quad (2.14)$$

Ainsi en réglant les valeurs des résistances externes R1 et R2, on peut contrôler les valeurs de  $\eta$ , Ip et Iv.

**Oscillateur relaxateur PUT :**

Dans l'oscillateur relaxateur à PUT de la figure 2-8.a, la tension de cachette est fixée par l'intermédiaire du diviseur de tension constitué par R1 et R2. Cette tension de cachette détermine la tension de pic. Lorsque la tension aux bornes du condensateur C atteint la valeur e pic, le PUT laisse passer le courant, le condensateur se décharge brusquement et une impulsion apparaît aux bornes de Rk. Lorsque la tension Vc atteint la valeur de vallée, le PUT se bloque et le cycle recommence (figure 2-8.b)

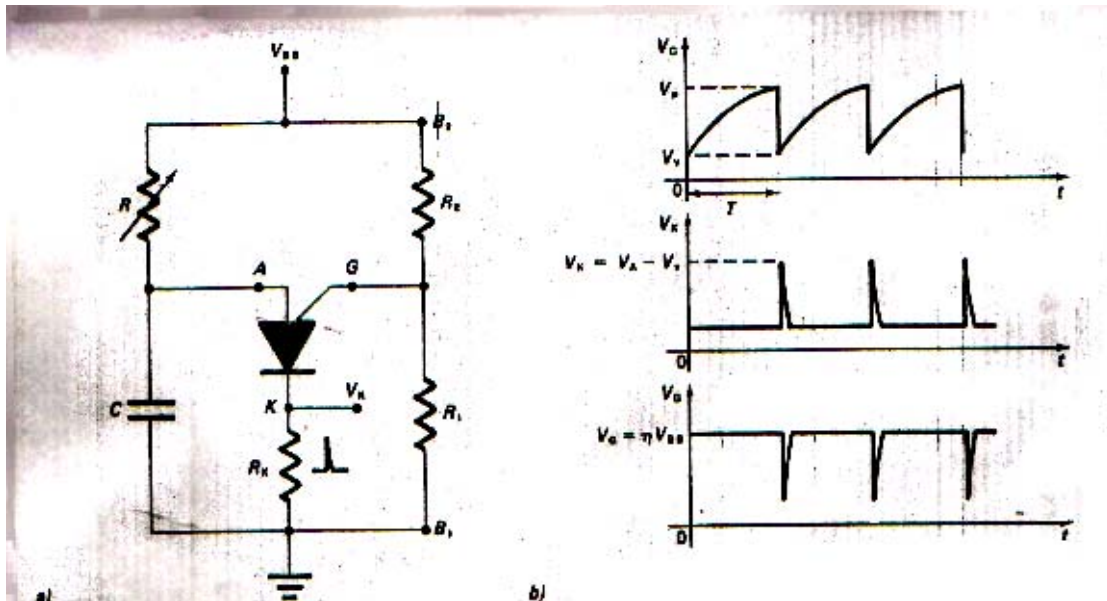


Figure 2-8 : a) oscillateur relaxateur à PUT ; b) formes d'onde de circuit.

La période de l'oscillation dépend des valeurs de R, C, R1 et R2 ; elle est déterminée par la relation :

$$T = RC \ln \left( \frac{V_{BB} - V_V}{V_{BB} - V_P} \right) \quad (2.15)$$

$$T = RC \ln \left( \frac{V_{BB}}{1 - \eta} \right)$$

Puisque :

$$\eta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Nous obtenons :

$$T = RC \ln \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (2.16)$$

La valeur de R doit être comprise entre les limites suivantes :

$$R(\text{min.}) = \frac{E_{BB} - U_V}{I_p} < R < R(\text{max.}) = \frac{E_{BB} - U_P}{I_v} \quad (2.17)$$

**Application du transistor PUT :**

Les principales applications des PUT sont :

- Les circuits d'amorçages de thyristors (figure 2-9) et de triac ;
- Les circuits temporisateurs à délai, de quelques secondes jusqu'à une heure ;
- Les oscillateurs relaxateurs.

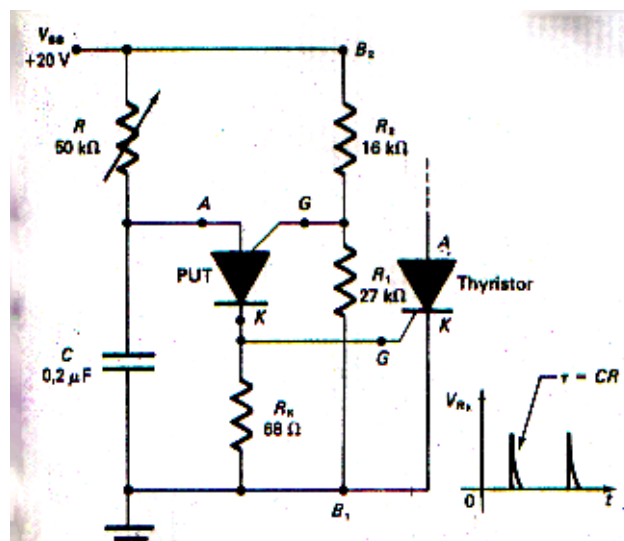


Figure 2-9 : amorçage d'un thyristor par un PUT.

**2.2.3 Diode SHOCKLEY**

**Structure et Symbole :**

La diode Shockley, appelée aussi diode à quatre couches, est un dispositif semi-conducteurs à quatre couches PNPN et à deux électrodes de sortie : anode et cathode (figure 2-10.a). Elle peut se comparer à l'association de deux transistors (figure 2-10.c).

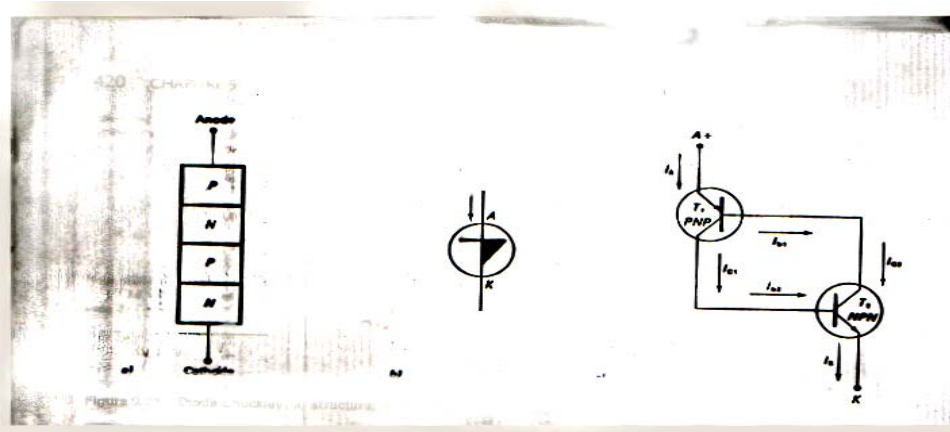
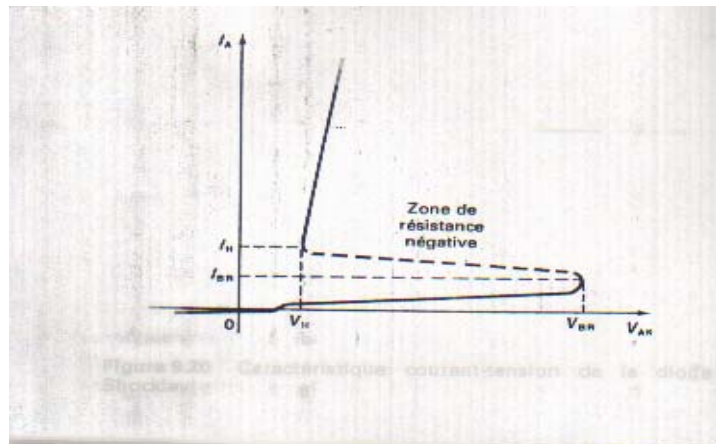


Figure 2-10 : Diode Shockley ; a) Structure ; b) Symbole ; c) Circuit équivalent.

**Principe de fonctionnement :**

La diode Shockley présente deux états stables : l'état passant l'état bloqué. La figure 2-11 représente la caractéristique courant-tension de la diode Shockley. Lorsque la tension appliquée aux bornes est inférieure à un certain seuil,  $V_s$ , appelé aussi tension de déclenchement ou tension de retournement ( $V_{BR}$ ), la diode est à l'état bloquée. Lorsque la tension anode-cathode atteint la valeur de la tension de déclenchement  $V_{BR}$ , la résistance de la diode s'effondre très rapidement et celle-ci laisse passer le courant.

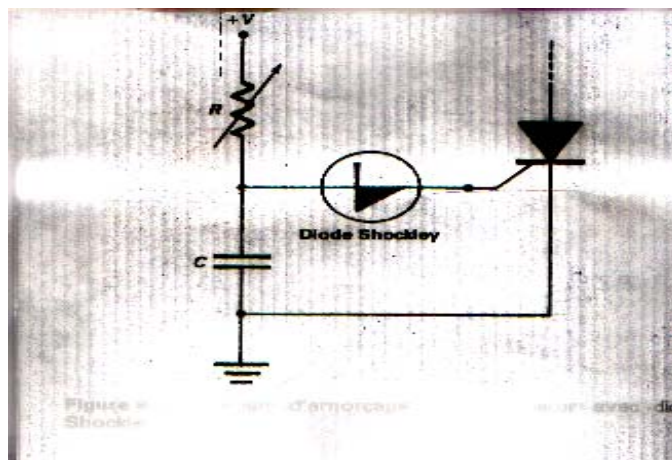


**Figure 2-11 : Caractéristique courant-tension de la diode Shockley**

Le reblocage de la diode s'effectue par la réduction soit du courant d'anode à une valeur inférieure au courant de maintien  $I_H$ , soit de la tension anode-cathode au-dessous de la valeur  $V_H$ .

**Applications :**

Les diodes Shockley sont utilisées dans les circuits d'amorçage de thyristors (figure 2-12) et de triacs, dans les générateurs d'impulsion, dans les générateurs de tension en dents de scie, etc.



**Figure 2-12 : Circuit d'amorçage d'un thyristor par diode Shockley.**



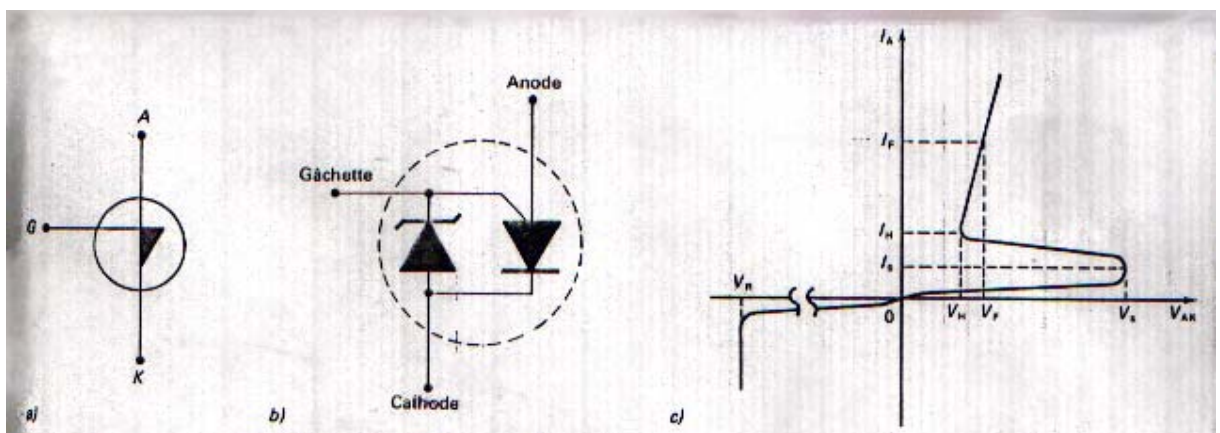
**Exercice 2.3**

1. dans quel cas un SCR conventionnel peut-il servir comme une diode Shockley ?
2. nommez deux applications de la diode Shockley.
3. combien de couches semi-conductrices constituent la structure interne d'une diode Shockley ?
4. pourquoi ajoute-t-on souvent une résistance  $R_G$  entre la gâchette et la cathode d'un SCR ?

**2.2.4 Commutateur Unilatéral – SUS**

**Structure et Symbole :**

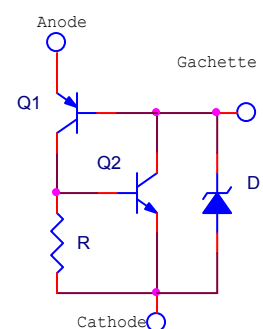
Le commutateur unilatéral SUS est un dispositif constitué par un thyristor miniature à cachette d'anode, auquel est associée une diode à avalanche à basse tension (figure 2-13). Il comporte trois électrodes qui sont l'anode, la cathode et la gâchette



**Figure 2-13 : le commutateur unilatéral SUS : a) symbole ; b) circuit équivalent ; c) caractéristique courant-tension**

**Fonctionnement :**

Le fonctionnement d'un SUS s'explique facilement à l'aide de la figure 2-14 qui représente le circuit équivalent d'un SUS. Il se déclenche lorsque une tension fixe, déterminée par sa diode à avalanche, est appliquée entre l'anode et la cathode. La cachette du SUS n'est utilisée que si l'on désire une synchronisation ou une commutation forcée. Dans ce cas, on applique à la cachette des impulsions ou une tension qui déclencheront le dispositif.



**figure 2-14 : circuit équivalent d'un SUS.**

**Applications :**

Le SUS est utilisé dans les oscillateurs relaxateurs (figure 2-15.a) pouvant fournir des impulsions de sortie capables de déclencher la plupart des thyristors (figure 2-15.b).

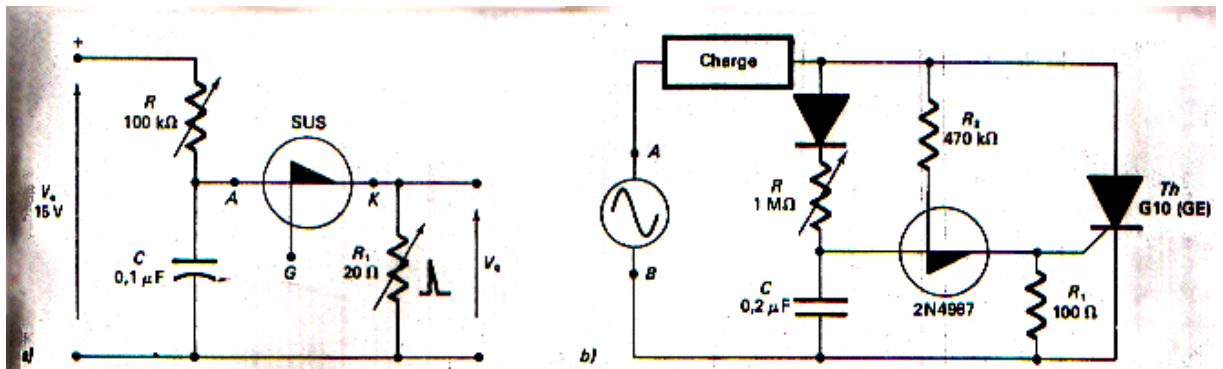


Figure 2-15 : a) Montage de principe de SUS. b) circuit d'amorçage d'un SUS.

Dans le circuit de la figure 2-15.b, la cachette du SUS est reliée à la branche supérieure de l'alimentation, ce qui permet de le déclencher à chaque alternance négative. Le condensateur C se décharge durant l'alternance négative et se charge à partir d'un certain niveau de tension fixe, lors des alternances positives.

## 2.3 Thyristors de déclenchement bidirectionnels

### 2.3.1 Commutateur Bilatéral – SBS

#### Structure et Symbole :

Le commutateur bilatéral SBS est un dispositif bidirectionnel à trois électrodes de sortie : l'anode 1, l'anode 2 et la gâchette II est constitué de deux commutateurs unilatéraux (SUS) identiques montés en parallèle-inverse (figure 2-16.b). Sa courbe caractéristique courant-tension (figure 2-16.c) est parfaitement symétrique et ses caractéristiques, lorsque la gâchette n'est pas utilisée, sont semblables à celles du SUS, sauf que la tension inverse  $V_r$  n'existe pas.

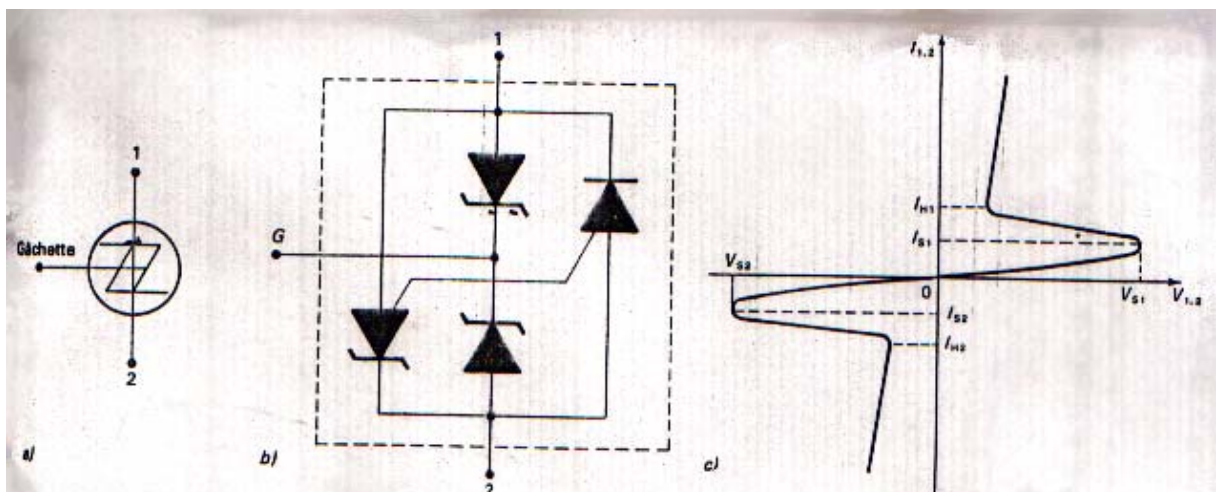


Figure 2-16 : Commutateur bilatéral SBS : a) symbole ; b) circuit équivalent ; c) caractéristique courant-tension

L'électrode de la gâchette du SBS sert à programmer le seuil de tension de retournement  $V_s$  du SBS dans les deux sens.



**Fonctionnement :**

Le fonctionnement du SBS est similaire à celui du SUS. Il est amorcé dans les deux sens par une tension de retournement adéquate. Il demeure conducteur tant que le courant du SBS ne tombe pas sous le courant de maintien IH du SBS

**Applications :**

Le commutateur bilatéral fonctionne dans les deux sens. Il est surtout utilisé pour amorcer des triac. Mais du fait que sa tension de retournement se situe entre 6 et 10 V et qu'il peut délivrer des impulsions de courant de 1 A, il est utilisé aussi pour amorcer des thyristors fonctionnant à très basse tension.

**Exercice 2.4**

1. nommez le thyristor de déclenchement unidirectionnel qui permet de réaliser un SBS.
2. nommez les électrodes d'un SBS.
3. à quoi sert la gâchette dans un SBS ?
4. si la tension de retournement de polarisation directe Vs1 est de +10 V, que vaudra Vs2 en polarisation inverse pour ce même SBS ?

**2.3.2 DIAC**

**Structure et Symbole :**

Le DIAC est un dispositif bidirectionnel comprenant trois couches PNP et deux électrodes de sortie (figure 2-17 a) et b): anode 1 et anode 2.

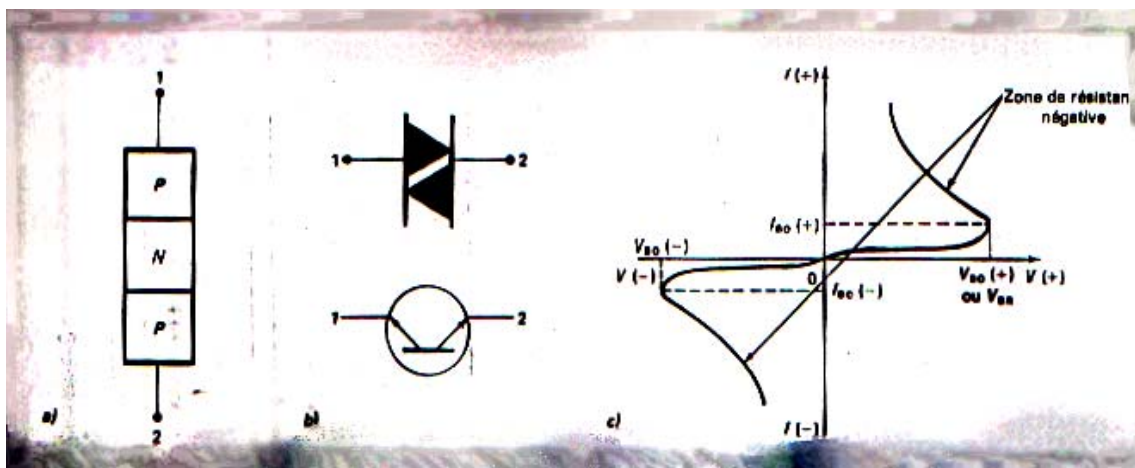


Figure 2-17 : DIAC :a) Structure; b) symbole; c) caractéristique courant-tension.

**Fonctionnement :**

Le Diac se comporte comme un commutateur dont l'état (bloqué ou saturé) dépend de la tension appliquée a ses bornes :

$$V_{12} < V_{bo} \quad \text{état bloqué}$$

$$V_{12} > V_{bo} \quad \text{état saturé} \quad (V_{bo} \text{ tension de retournement})$$

Le fonctionnement du Diac est similaire à celui de deux diodes Zeners montées tête-bêche. Quand la tension aux bornes du Diac atteint la valeur de retournement, le Diac devient conducteur ou amorcé. La tension à ses bornes est alors de 1 à 2V.

**Applications :**

Le Diac est surtout utilisé dans les circuits d'amorçage de triacs. Alimenté en courant alternatif, il permet d'obtenir avec des condensateurs de faible valeur (0.1 µF et 35 V par exemple) deux impulsions par période, l'une positive et l'autre négative, décalées de 180° l'une de l'autre. On peut ainsi amorcer un triac ou deux thyristors.

**Exercice 2.5**

1. en quoi le DIAC ressemble-t-il au transistor ?
2. comment s'amorce un DIAC ?
3. le courant dans le DIAC est-il unidirectionnel ou bidirectionnel ?

**2.4 TRIAC**

Les thyristors ne fonctionnent en courant alternatif que durant une seule alternance par période. Pour pallier cet inconvénient et obtenir un contrôle de puissance en courant alternatif, on a alors utilisé un montage tête-bêche de deux thyristors. Ce dispositif, appelé TRIAC, qui peut laisser passer ou bloquer le courant dans les deux sens, est adapté à la commande de charges de puissance sur les réseaux alternatifs.

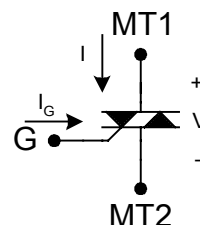


Figure 2-18 : Symbole du triac

**2.4.1 Structure du TRIAC**

Le triac est un élément semi-conducteur bidirectionnel de la famille des thyristors. Il est composé de cinq couches semi-conductrices NPNPN. Il comporte trois électrodes de sortie: la gâchette et deux bornes principales B1 et B2 (figure 2-19 a et b).

Le triac est l'équivalent de deux thyristors associés en parallèle - inverse et diffusés sur le même cristal (figure 2-19.c)

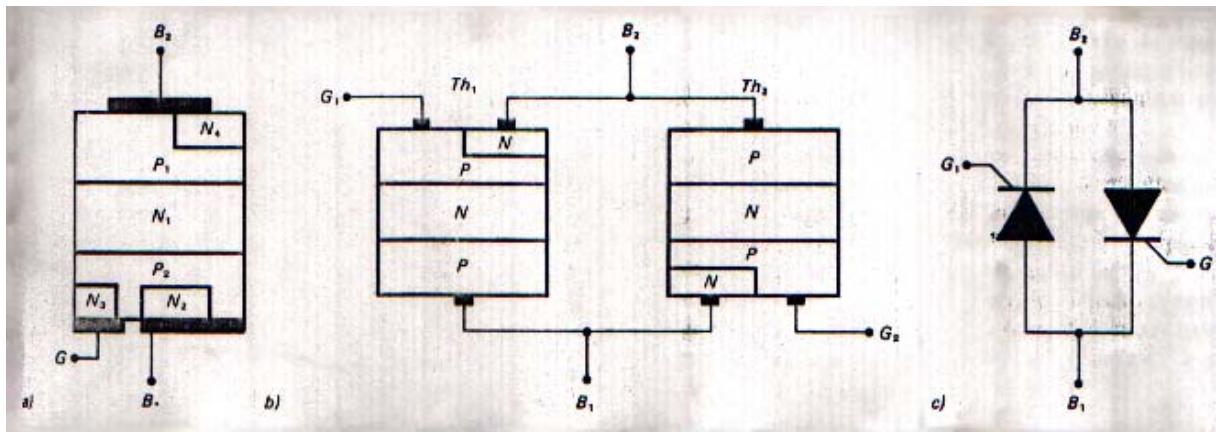


Figure 2-19 : a) structure du triac ; b) et c) équivalent à deux thyristors

### 2.4.2 Principe de fonctionnement

Le triac est à l'état bloqué dans les deux sens lorsque aucun signal n'est appliqué à la gâchette, soit lorsque  $I_G$  est égal à 0. Comme il n'existe qu'une électrode de commande, le déclenchement est effectué par des impulsions de gâchette positives et négatives à faible énergie dans le quadrant I ( $B_2$  positive par rapport à  $B_1$ ) ou le quadrant II ( $B_1$  positive par rapport à  $B_2$ ).

#### Modes d'amorçage du TRIAC

Le TRIAC peut être amorcé de quatre façons différentes:

- Quadrant I + :  $B_2$  positif par rapport à  $B_1$

$I_G$  positif

- Quadrant I - :  $B_2$  positif par rapport à  $B_1$

$I_G$  négatif

- Quadrant III + :  $B_2$  négatif par rapport à  $B_1$

$I_G$  positif

- Quadrant III - :  $B_2$  négatif par rapport à  $B_1$

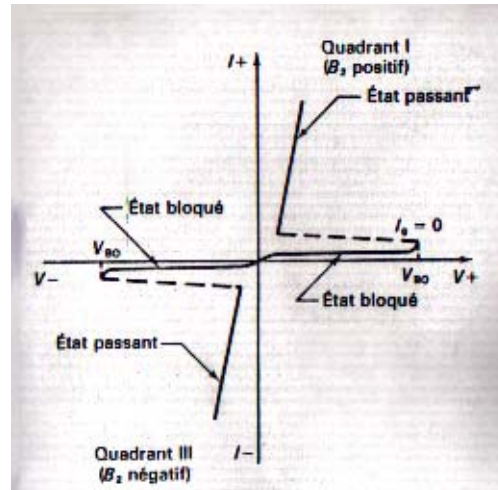
$I_G$  négatif

Mode	Quadrant	Polarité de $B_2$ par rapport à $B_1$	Polarité de $G$ par rapport à $B_1$
I+	I	Positive	Positive
I-	I	Positive	Négative
III+	III	Négative	Positive
III-	III	Négative	Négative

Tableau 2-1 : Différents modes d'amorçage du triac.

**Caractéristique courant-tension :**

La caractéristique typique courant tension du triac, représentée à la figure 2-21 est symétrique. Le premier quadrant, où B2 est positive par rapport à B1, correspond au fonctionnement du thyristor P1N1P2N2. Le troisième quadrant, où B2 est négative par rapport à B1, correspond au fonctionnement du thyristor P2N1P1N4 disposé en parallèle-inverse avec le thyristor précédent.



**Figure 2-21 : Caractéristique courant-tension d'un TRIAC.**

On définit, comme dans le cas du thyristor, une tension critique de claquage  $V_{bo}$  (tension de retournement) dans les deux sens pour un courant de gâchette  $I_g$  nul.

Cette tension doit être supérieure à la valeur maximale de la tension alternative d'alimentation appliquée, pour que le triac puisse rester à l'état bloqué dans les deux sens et qu'il puisse garder son effet de contrôle par la gâchette

Les définitions des courants de maintien ( $I_h$ ) et d'accrochage ( $I_L$ ) sont identiques à celles données pour les thyristors.

**Amorçage d'un triac par un diac :**

Le circuit de la figure 2-22.a représente le montage le plus simple et le plus connu. Il est utilisé dans les variateurs de lumière.

Au départ, la tension entre la gâchette et la borne B1 est nulle. Dès que la tension est appliquée, le condensateur C commence à se charger à travers la résistance  $R_{prot}$  et le potentiomètre  $R_v$ .

Lorsque la tension à ses bornes atteint la tension de retournement du diac, positive ou négative, le diac laisse passer brusquement le courant, ce qui provoque la décharge partielle de C dans le circuit de gâchette du triac qui est alors amorcé.

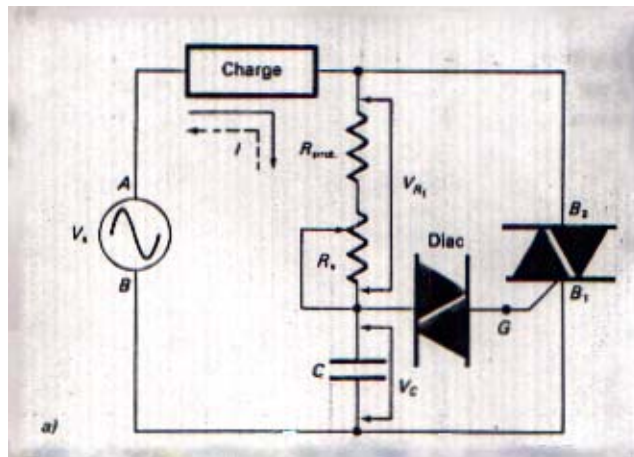


Figure 2-22 : amorçage d'un triac par diac : a) schéma de principe

L'angle d'amorçage du triac (figure 2-22.b) est :

$$\alpha = \phi_1 + \phi_2 \quad (2.18)$$

avec :

$\phi_1$  : déphasage arrière de  $V_c$  par rapport à la tension source  $V_{source}$  ;

$\phi_2$  : délai provenant du temps de charge du condensateur C.

L'angle  $\phi_1$  est donné par :

$$\phi_1 = \arctan\left(\frac{IR_t}{IX_c}\right) = \arctan\left(\frac{R_t}{X_c}\right) \quad (2.19)$$

Où :

$$R_t = R_v + R_{prot}$$

et :

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

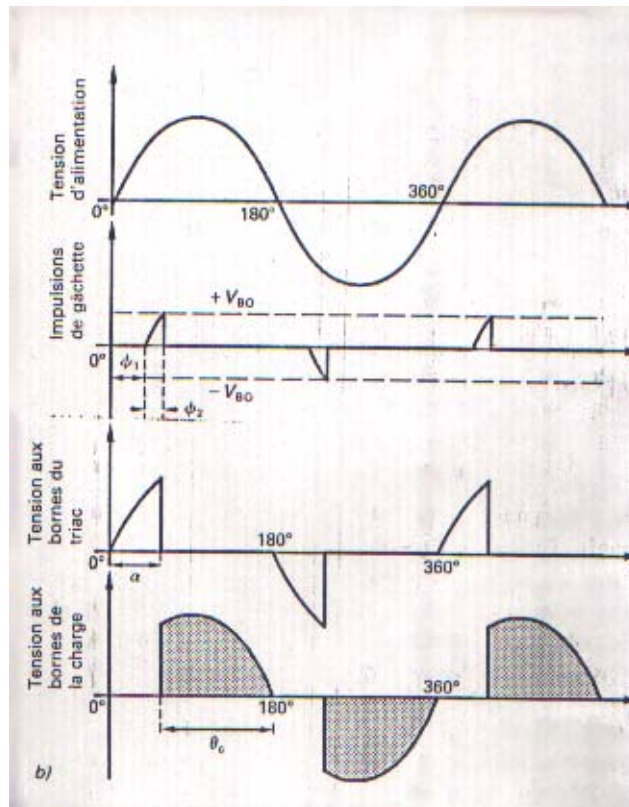


Figure 2-22 : amorçage d'un triac par diac : b) formes d'onde des tensions.

L'angle  $\phi_2$  correspond au temps de charge nécessaire pour que la tension  $V_c$  aux bornes du condensateur atteigne la valeur de tension  $V_{BO}$  du diac :

$$\phi_2 = \arcsin\left(\frac{V_c}{V_{source,max}}\right) \quad (2.20)$$

Où :

$$V_c = V_{BO}$$

$$V_{source,max} = \sqrt{2}V_{source,eff}$$

Au moment de l'amorçage du triac, par déclenchement du diac, l'amplitude du courant  $I$  qui circule dans le circuit RtC est :

$$I = \frac{V_{R_t}}{R_t} = \frac{V_c}{X_c} \quad (2.21)$$

de sorte que :

$$R \approx \frac{V_{R_t} X_c}{V_c} \quad (R_c \text{ est négligeable})$$

Pour un angle d'amorçage  $\alpha$  de  $90^\circ$ , on a :

$$V_{R_t} = \sqrt{V_{source,max}^2 - V_c^2} \quad (2.22)$$

**Exercice 2.6**

Les composants du circuit illustré à la figure 2-22.a sont :

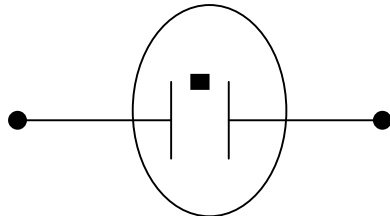
$R_{prot} = 3,3 \text{ k}\Omega$  ;  $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$  ; diac ST2 ( $V_{bo} = 32 \text{ V}$ ) ;  $R_c = 10 \text{ }\Omega$ .

La tension d'alimentation est de 120 V et 50Hz. Calculez :

- A) le temps de retard à l'amorçage et l'angle de conduction du triac lorsque le potentiomètre  $R_v$  est réglé à 10 k $\Omega$  ;
- B) la valeur du potentiomètre requise pour obtenir un contrôle de l'angle d'amorçage entre 0° et 90°.

**2.5 Lampe au NEON****Symbole :**

La lampe au néon miniature à deux électrodes de sortie peut être utilisée comme dispositif bidirectionnel.



**Figure 2-23 : Représentation symbolique de la lampe au NEON**

**Fonctionnement :**

Lorsque la tension aux bornes de la lampe au néon atteint un certain seuil (tension de claquage), le gaz est ionisé et la lampe laisse passer le courant. La caractéristique courant-tension est semblable à celle du DIAC, mais la tension de retournement est de l'ordre de 90 V et le courant fourni est assez faible, ce qui a pour effet de limiter son emploi.

La lampe au néon est un dispositif peu coûteux peut être utilisé pour l'amorçage des triacs et des thyristors à faible courant de gâchette.



## APPAREILS DE MESURE

### 3.1 Introduction

Les appareils de mesure sont très nombreux qu'ils ne pourront pas être tous décrits. Ce chapitre sera consacré à l'étude des appareils de mesure suivant : oscilloscope, voltmètre électronique et fréquencesmètre. Le principe de fonctionnement de ces instruments est parfois nécessaire, en tous cas toujours utile. Il permet bien souvent d'éviter les mauvaises manipulations et de savoir quel crédit apporter aux résultats obtenus.

### 3.2 Oscilloscope

Comme les téléviseurs, l'oscilloscope est équipé d'un écran sur lequel il affiche la forme de la tension présente sur son entrée. La plupart des oscilloscopes sont équipés de deux entrées et ils permettent de visualiser deux tensions simultanément.

#### 3.2.1 Principe

L'oscilloscope est un VOLTMETRE PERFECTIONNE :

- **VOLTMETRE** parce qu'il mesure une différence de potentiel (ou tension) entre 2 points d'un circuit. Il se place donc en dérivation sur le circuit aux 2 points considérés.

Sur le schéma ci-dessous, l'oscilloscope mesure  $V_{AB}$ .

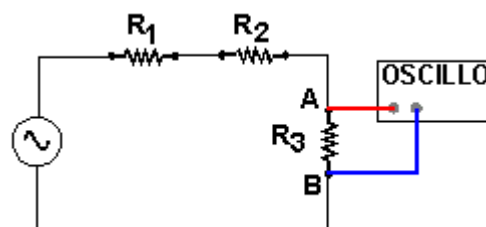


Figure 3-1 : Mesure de la d.d.p aux bornes d'une résistance

- **PERFECTIONNE** parce qu'il permet de visualiser cette tension et de mesurer des paramètres comme l'amplitude ou la période si cette tension est périodique. Dans ce cas, il fonctionne en mode Y-t, qui est le mode le plus courant.  
*L'oscilloscope peut aussi représenter une tension en fonction d'une autre : c'est le mode X-Y qui est moins courant.*

L'oscilloscope est le plus polyvalent des appareils électroniques. Seul, ou associé à d'autres appareils, il permet simultanément de mesurer et de visualiser la grandeur à laquelle on s'intéresse.

Un oscilloscope comprend essentiellement un système de visualisation, le tube cathodique et des circuits électroniques associés.



**Le TUBE OSCILLOSCOPIQUE, cœur de l'appareil,  
est formé de 3 parties.**

Il peut être schématisé de la façon suivante :

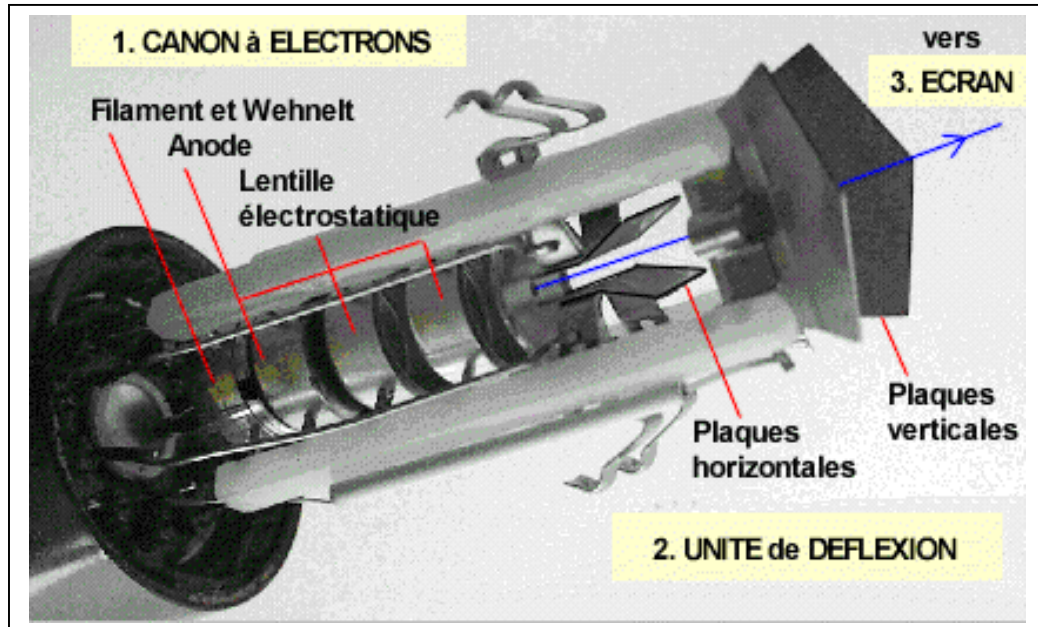
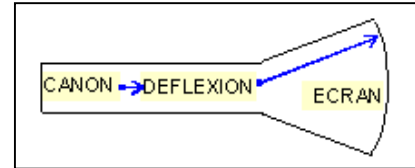


Figure 3-2 : Tube oscilloscopique

**3.2.2 CANON A ELECTRONS - CATHODE**

La cathode se présente sous la forme d'un cylindre de Nickel d'un diamètre de 1 à 2 mm, recouvert à l'avant d'un oxyde alcalin qui émet des électrons lorsqu'il est chauffé. Le chauffage est réalisé par un filament de tungstène parcouru par un courant alternatif. La cathode est au potentiel "0" (à la masse comme on le dit couramment) : ceci signifie que toute électrode qui est à un potentiel positif ou négatif, l'est par rapport à la cathode.

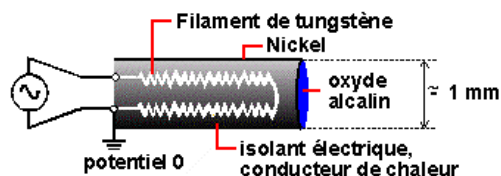


Figure 3-3 : canon à électrons (cathode)

### 3.2.3 UNITE de DEFLEXION - Déflexion verticale et horizontale

Elle est constituée de 2 systèmes de plaques placés l'un derrière l'autre :  
un ensemble de plaques horizontales  
un ensemble de plaques verticales

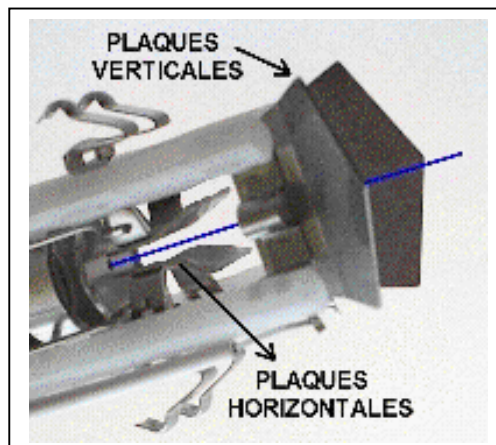


figure 3-4 : Unité de déflexion

De la même façon, le système de plaques verticales est responsable de la déviation horizontale

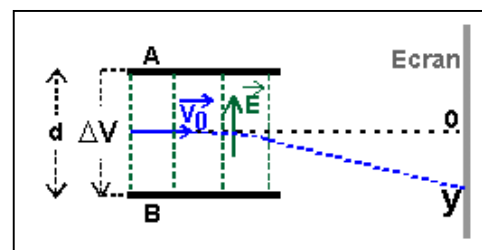


Figure 3-5 : principe d'action des plaques horizontales.

\*

Le principe d'action de ces 2 ensembles est identique. Concentrons-nous sur les plaques horizontales. Une tension  $DV$  est appliquée entre les plaques. Cette tension crée un champ électrique  $E$  uniforme et perpendiculaire aux plaques :  $E = DV / d$  où  $d$  est la distance entre les plaques. Le faisceau d'électrons entre avec une vitesse  $V_0$  à mi-distance entre les plaques et perpendiculairement aux lignes de force du champ. Il subit une déviation verticale. On peut montrer que suite à la déflexion du faisceau, l'ordonnée  $Y$  du point d'impact sur l'écran est proportionnelle à  $DV$ .

Notez que pour des tensions supérieures à 40 V ou inférieures à -40 V, le faisceau d'électrons sort de l'écran. Le problème de l'obtention d'une déviation raisonnable pour des tensions très importantes ou très faibles sera résolu plus tard (voir Mode d'emploi - Description des commandes - Bouton *Volts/Div*).

### 3.2.4 UNITE de DEFLEXION - La synchronisation

Pour faire des mesures sur les signaux périodiques, il faut **stabiliser la trace** à l'écran. Les décalages successifs sont causés par le fait que la période de la dent de scie générée dans l'oscillo, n'a aucune relation avec la période du signal à analyser.

Les tensions mises en jeu  
se réfèrent au schéma suivant :

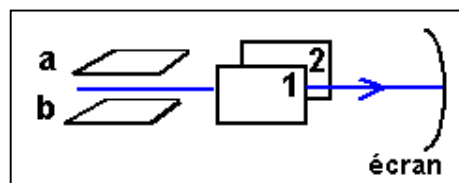


figure 3-6 : la synchronisation.

Remarquez qu'ici, au moment de la synchronisation, le signal démarre à 0 V avec une pente négative. En réalité, les conditions de démarrage (tension et pente) peuvent être choisies. C'est le bouton *LEVEL* (voir Mode d'emploi - Description des commandes) de la face avant de l'oscillo qui permet ce choix. Un autre commutateur, *TIME/DIV*, permet de choisir différentes périodes de la tension en dent de scie de façon à rendre les mesures aisées.

### 3.2.5 L'ECRAN

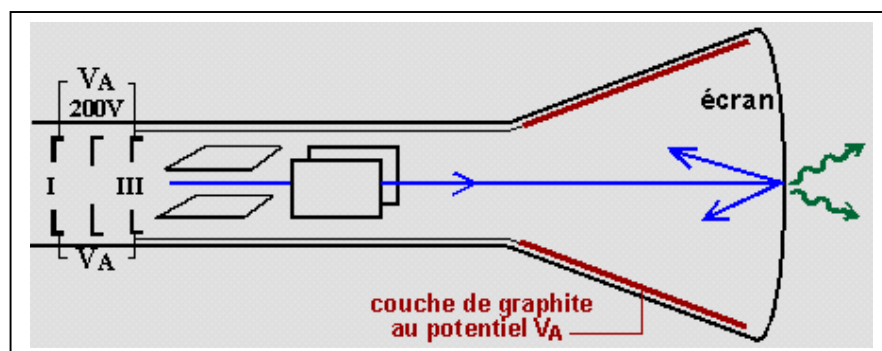


figure 3-7 : Ecran d'oscilloscope

L'écran est formé par une matière fluorescente déposée sur la face intérieure du tube oscilloscopique. L'impact du faisceau rend cette matière lumineuse. La trace paraît continue à cause de la persistance rétinienne.

### 3.2.6 CANON à ELECTRONS - La lentille électrostatique

La lentille électrostatique est formée par un ensemble de 3 électrodes percées d'un trou en leur centre. Elles ont pour but de ramener le faisceau issu du point A en un point A' aussi fin que possible sur l'écran.

L'électrode I (l'anode) et l'électrode III sont à un même potentiel positif  $V_A$ . L'électrode II, intermédiaire, est à un potentiel négatif  $V_F$  : le réglage de ce potentiel par le bouton *FOCUS* permet d'ajuster la position A' par rapport à l'écran.

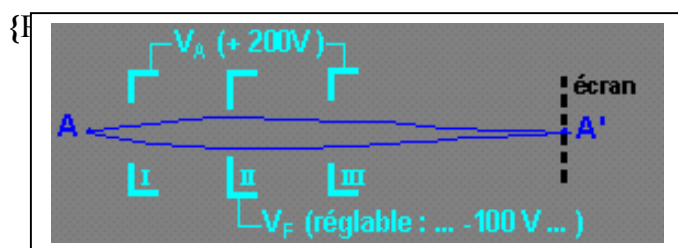


Figure 3-8 : Schéma des 3 électrodes qui forment la lentille

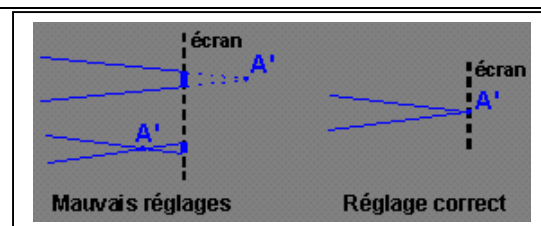


Figure 3-9 : Effet de l'ajustement de  $V_F$  par le bouton *FOCUS*

### 3.2.7 Précautions de sécurité

Les précautions générales de sécurité qui doivent être observées pendant toutes les phases d'emploi et de réparation d'un oscilloscope sont :

- Mise à la terre : afin de réduire les risques d'électrocution ;
- Ne pas utiliser l'instrument dans une atmosphère explosive ;
- S'éloigner des circuits non isolés ;
- Ne jamais changer les éléments ou modifier l'appareil ;

### 3.2.8 Précautions avant emploi

Les principales précautions avant emploi qui doivent être vérifiées sont :

- Tester la tension du réseau ;
- Environnement : respecter la plage de température d'utilisation de l'appareil ;
- Intensité du tube cathodique : afin de ne pas altérer votre vue et de protéger le phosphore du tube cathodique, ne pas trop augmenter l'intensité du spot et de la trace ;
- Tension d'entrée maximum : respecter les limites des tensions d'entrées des différents canaux ;

### 3.2.9 Manipulations

- Ne jamais soumettre l'appareil à un choc important ;
- Ne jamais insérer un fil, une pièce métallique par les trous d'aération ;
- Ne jamais mettre un fer à souder chaud sur le boîtier ou l'écran ;
- Ne jamais approcher un aimant du tube cathodique ou de l'appareil ;

### 3.2.10 Exemple d'oscilloscope



LOCALISATION des COMMANDES

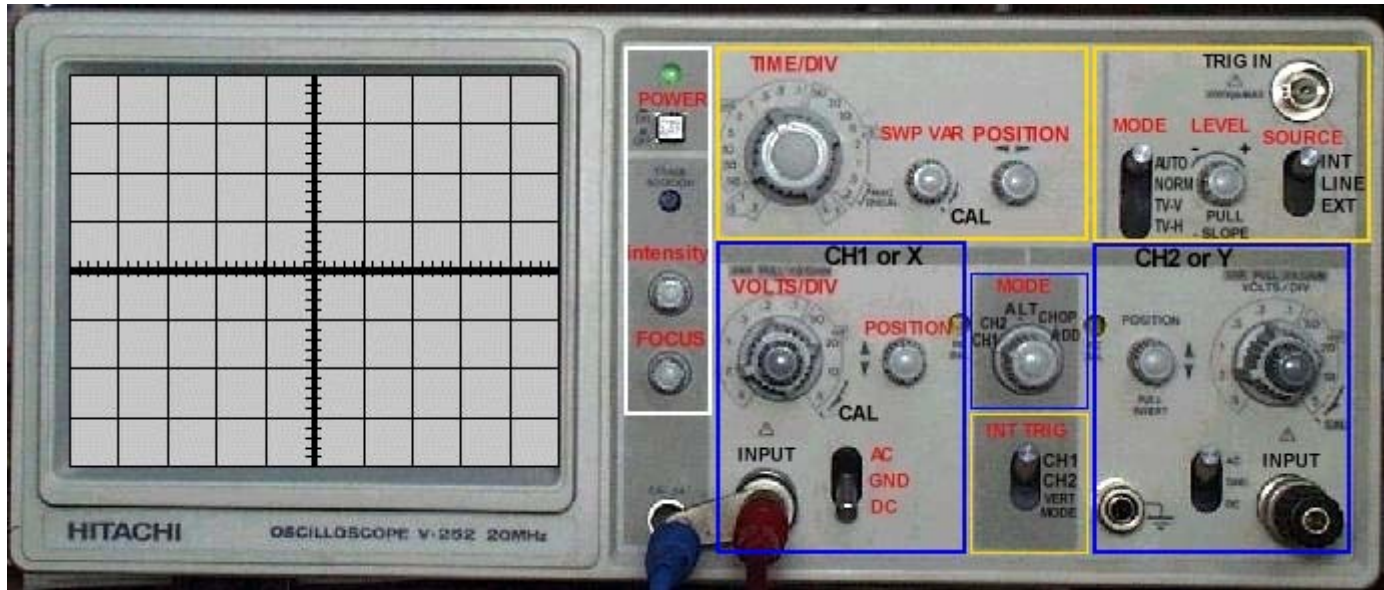


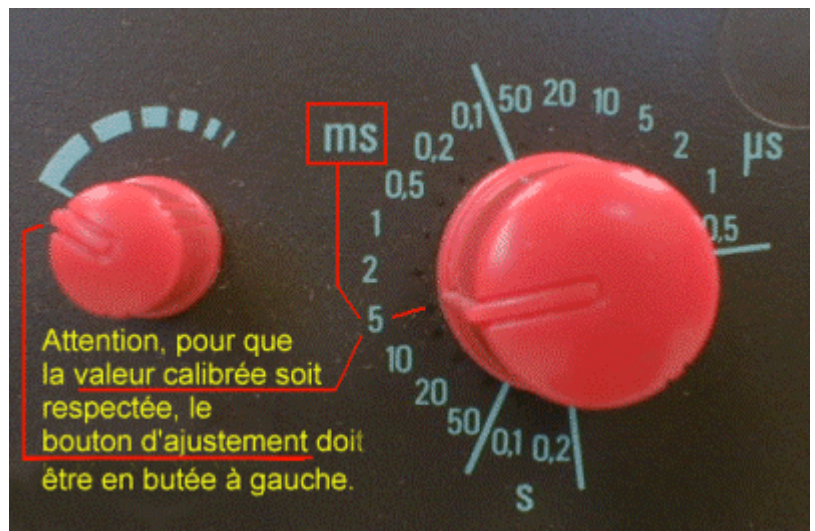
Figure 3-10 : Face avant d'un oscilloscope.

Description des commandes :

**Base de temps :**

Le réglage de la base de temps détermine la vitesse de déplacement du spot selon la direction horizontale.

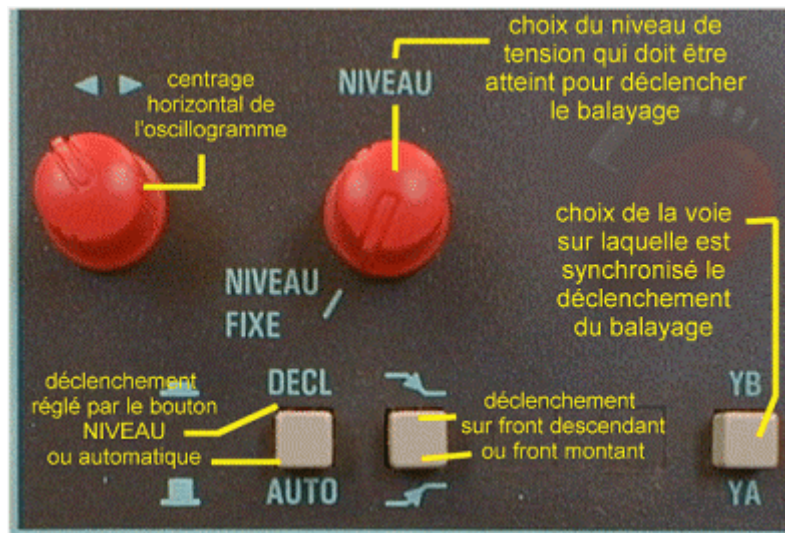
Ici, le bouton indique 5 ms / carreau.  
C'est la durée nécessaire pour que le spot avance, horizontalement, d'un carreau.



**Déclenchement du balayage et positionnement horizontal de la trace :**

Le spot se déplace de gauche à droite sur l'écran à une vitesse réglée par la base de temps. Arrivé à l'extrémité droite de l'écran, le spot est éteint et ramené à l'extrémité gauche où il est mis en attente.

Le système de déclenchement réactive le spot quand la tension reprend la valeur et le sens de variation qui existait au début du tracé du précédent oscillogramme. Ainsi, les tracés successifs se superposent et on obtient une image stable sur l'écran.



### Allumage

Enfoncer le bouton "marche-arrêt", le voyant "MARCHE" s'allume.

### Réglage du spot

Ajuster la luminosité du spot en agissant sur le bouton "INTENSITE". Veiller à ce que le spot n'ait pas une luminosité excessive, en particulier s'il est immobile sur l'écran.

Pour une bonne précision de lecture, donner à la trace du spot une épaisseur aussi fine que possible. Agir pour cela sur le bouton "FOCALISATION".

### 3.2.11 Exemple de mesures

Les signaux proposés dans les exercices sont **sinusoïdaux** :  $E = A_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$

**L'amplitude  $A_m$  et la période  $T$**  (voir schéma ci-dessous) peuvent être mesurés sur l'écran de l'oscilloscope.

#### a. Mesure de la période

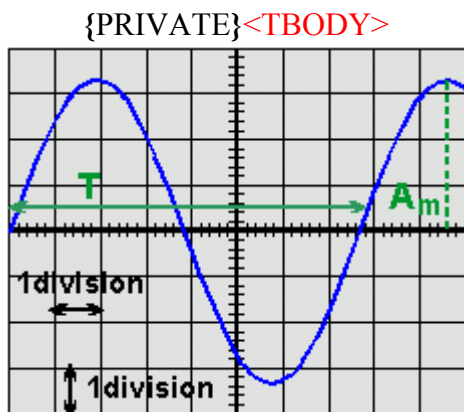


figure3-11 : mesure de la période.

Le commutateur de la base de temps (**Time/div**) permet "d'étirer" le signal au maximum, de façon que la lecture, qui se fait en divisions, soit la plus précise possible. Il faut cependant qu'une période entière soit visible sur l'écran.

Sur la figure ci-contre,

$T = 7.7$  divisions

Si le commutateur Time/div est sur la position

$20 \mu s$ ,

$T = 7.7 * 20 \mu s = 154 \mu s$

### b. Mesure de l'amplitude pointe à pointe

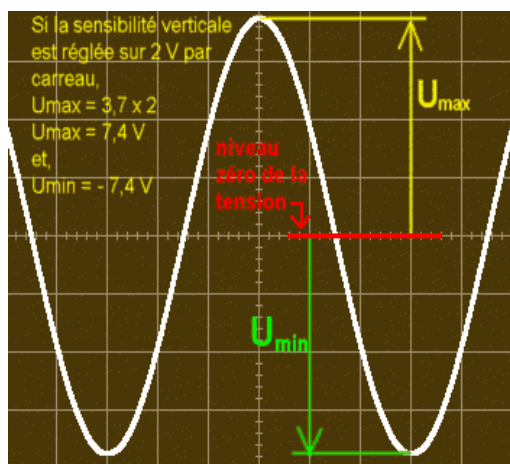


Figure 3-12 : mesure de l'amplitude C.C

On mesure en général l'amplitude pointe à pointe,  $A_{p\grave{a}p} = 2 * A_m$ .

Le commutateur **Volts/div** permet d'agrandir au maximum le signal à l'écran. On peut également :

- à l'aide du bouton **Position**, déplacer la trace verticalement pour amener le bas au niveau d'une division (points jaunes).
- à l'aide du bouton **Level**, amener le maximum du signal au centre de l'écran (point rose) pour profiter des petites graduations.

On mesure alors :  $A_{p\grave{a}p} = 7.4$  divisions

Si le commutateur Volts/div est sur la position  $1 V$ ,  $A_{p\grave{a}p} = 7.4 * 5 mV = 37 V$

## 3.3 Multimètres électroniques

### 3.3.1 Multimètre électronique analogique

Ce sont des appareils à affichage à aiguille qui nécessitent une alimentation (par pile ou secteur).

Dans le cas d'un fonctionnement en courant continu, la grandeur d'entrée (tension, courant ou résistance) est :

- Eventuellement transformée en tension ;
- Cette tension est atténuée par un atténuateur à plots ;
- Par la suite conditionnée est amplifiée, et appliquée à un voltmètre à aiguille ;

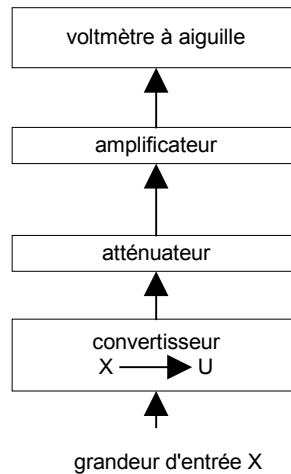


Figure 3-13 : organisation interne d'un multimètre électronique analogique.

### 3.3.2 Multimètre électronique numérique

#### Principe de fonctionnement et organisation interne :

Ce sont des appareils à affichage numérique qui nécessitent une alimentation (par piles ou secteur).

Les grandeurs mesurables par un multimètre électronique numérique sont :

- Des tensions continues ou alternatives ;
- Des courants continus ou alternatifs ;
- Des résistances (en continu) ;

Le schéma général typique d'un multimètre électronique numérique est donné par la figure.

#### Caractéristiques générales :

Les commandes d'un multimètre électronique numérique peuvent se faire :

- Soit par l'intermédiaire de commutateurs rotatifs et de poussoirs ;
- Soit dans le cas des appareils à microprocesseur incorporé, par touches ;



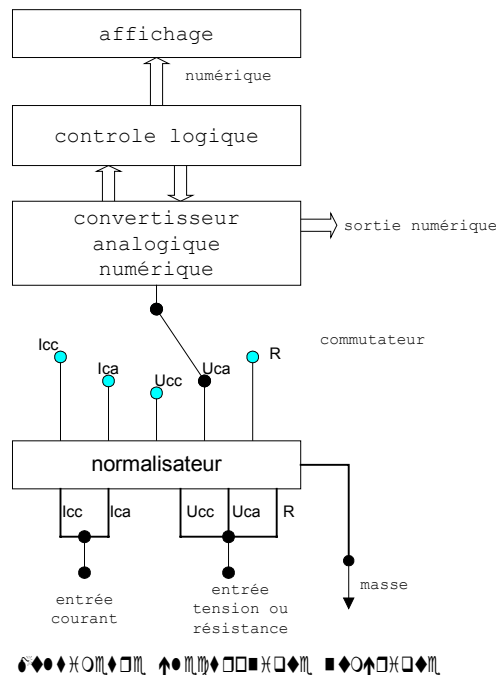


Figure 3-14 : Organisation interne d'un multimètre électronique numérique.

Les différentes commandes qui peuvent exister sont les suivantes :

- commande de fonction
- commande de gamme
- durée de mesure
- commande de test

Les bornes d'entrées et de sorties peuvent exister sont en BNC ou des bornes 4 mm.

**Précautions d'emploi :**

Lorsque l'appareil est utilisé comme voltmètre ou ampèremètre, il suffit d'appliquer sur l'entrée une tension ou un courant inférieur aux limites prévues par le constructeur (se référer aux fiches techniques des constructeurs).

Pour le fonctionnement en ohmmètre, il suffit de ne pas établir entre les bornes d'entrées une d.d.p supérieure à quelques centaines de volts (200 à 300 volts crête).

**Exemples de mesure :**

La plupart des multimètres peuvent jouer le rôle de : voltmètre, ampèremètre et ohmmètre.

Pour choisir la fonction du multimètre :

1. sélectionner la position du commutateur de fonction,

- connecter un fil à la borne COM  
(pour faciliter les repérages on emploie souvent un fil noir)
- connecter un deuxième fil à la borne marquée du symbole de l'unité qui correspond à la grandeur qu'on veut mesurer (on emploie souvent un fil rouge).



L'ampèremètre pour mesurer une intensité de courant :

Choisir la fonction ampèremètre :



- Se renseigner sur le type du générateur qui alimente le montage où on fera les mesures.
- Choisir la position du commutateur

Si la **tension du générateur est continue**, on sélectionnera un des calibres de la zone :

Ce multimètre n'est pas capable de mesurer l'intensité d'un courant alternatif.

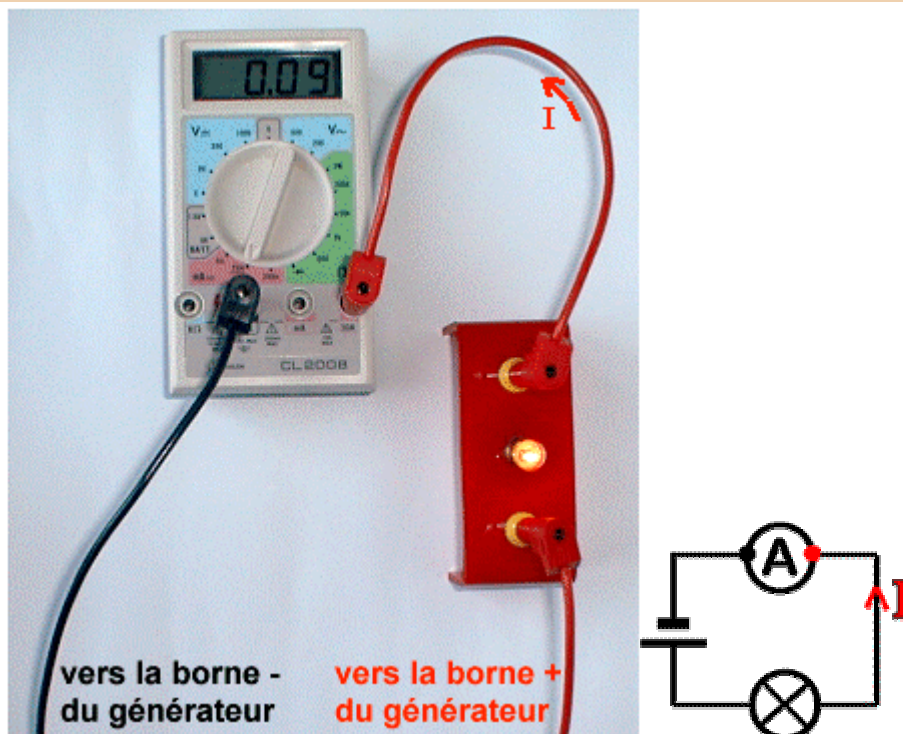
**Choisir l'emplacement des fils**



Faire une estimation de l'intensité de courant à mesurer et adopter un calibre supérieur à la valeur estimée.

Ici, ne sachant pas bien estimer l'intensité du courant, on a d'abord choisi le calibre 10 A.

**L'ampèremètre est branché en série** avec les dipôles dans lesquels on veut connaître l'intensité du courant.



Après avoir réalisé une première mesure, la meilleure précision sera obtenue en adoptant le calibre immédiatement supérieur à la valeur mesurée.

Ici, la première mesure donne 0,09 A soit environ 90 mA. On peut donc adopter le calibre 200 mA.

Pour adopter ce calibre, il faut non seulement déplacer le commutateur mais aussi l'un des fils de branchement.

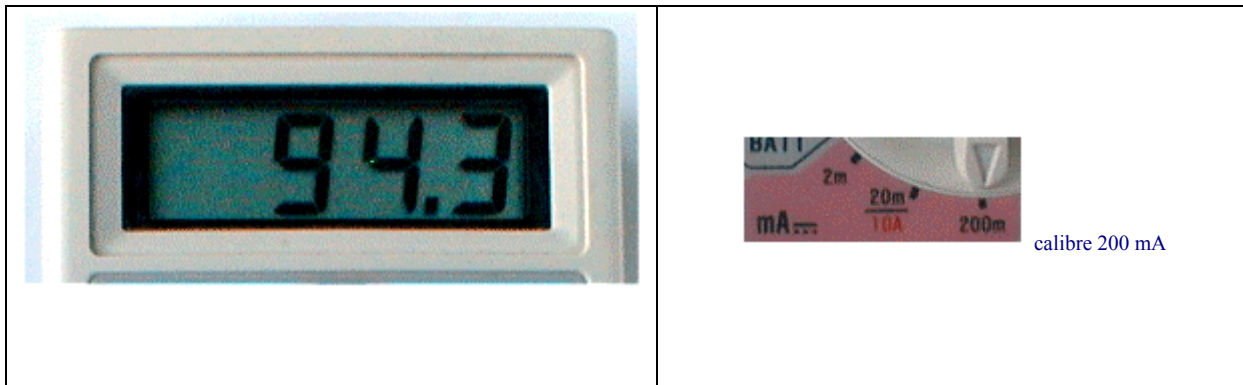
**Lire et exprimer le résultat de la mesure**

Ici, par exemple, on lit :

$$I = 94,3 \text{ mA}$$

On écrira raisonnablement :

$$I = 94 \text{ Ma}$$



calibre 200 mA

Le voltmètre pour mesurer une tension :

Choisir la fonction voltmètre :



1. Se renseigner sur le type du générateur qui alimente le montage où on fera les mesures.

2. Choisir la position du commutateur



Si la **tension est continue**, on sélectionnera un des calibres de la zone :

Si la **tension est alternative**, on le choisira dans la zone :



Choisir l'emplacement des fils.



Choisir le calibre :

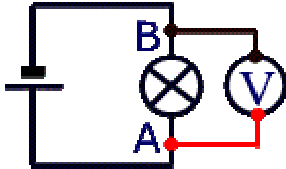
Faire une estimation de la tension à mesurer et adopter un calibre supérieur à la valeur estimée.

Par exemple, si le montage est alimenté par un générateur de tension 6 V, le calibre 20V conviendra.

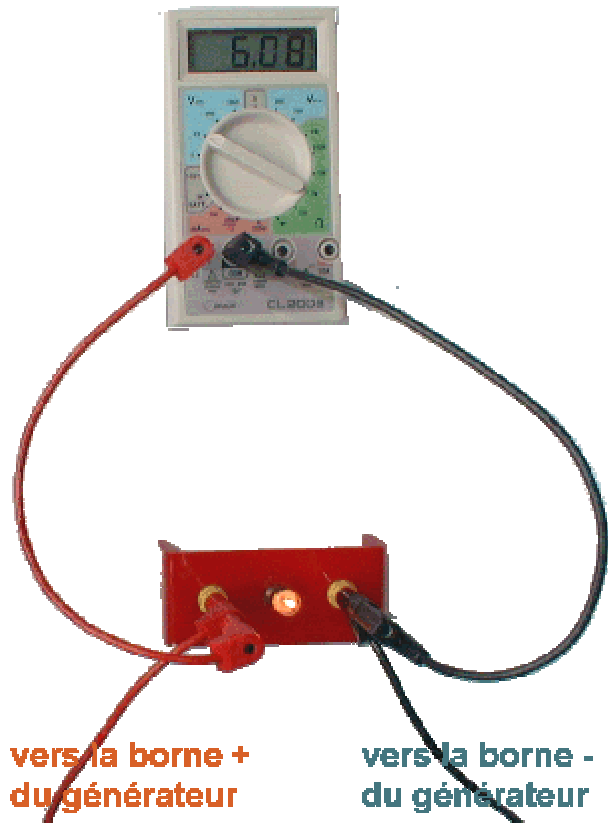
**Après avoir réalisé une première mesure, la meilleure précision sera obtenue en adoptant le calibre immédiatement supérieur à la valeur mesurée.**

**Brancher le voltmètre**

Le voltmètre est **branché en dérivation** entre les deux points où on veut mesurer la tension.



Ici, le voltmètre mesure la tension entre les bornes de la lampe. Cette tension sera désignée par  $U_{AB}$ .



Remarque : Le voltmètre se comporte comme un très mauvais conducteur du courant. Dans le montage précédent, le courant qui passe dans le voltmètre a une intensité négligeable par rapport à celle qui passe dans la lampe.

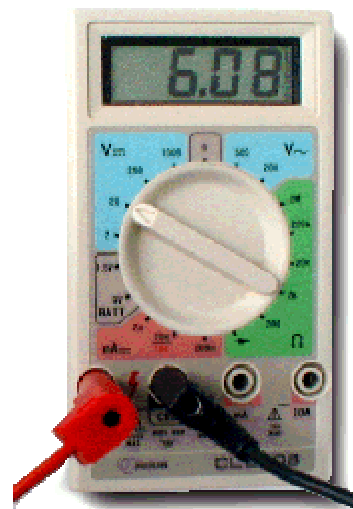
**Lire et exprimer le résultat de la mesure**

Ici, par exemple, on lit :

$$U_{AB} = 6,08 \text{ V}$$

On remarquera que le dernier chiffre est incertain. Il sera raisonnable d'écrire :

$$U_{AB} = 6,1 \text{ V}$$



Remarque : Le résultat de la mesure est positif si le très faible courant qui passe dans le voltmètre sort de celui-ci par la borne COM.



L'ohmmètre pour mesurer une résistance :

Choisir la fonction ohmmètre :

Utiliser l'un des calibres de la zone verte.

- On a le choix entre
- 2 MΩ (mégohm)
- 200 kΩ (kilo-ohm)
- 20 kΩ
- 2 kΩ
- 200 Ω (ohm)

Actuellement, rien n'étant connecté aux deux bornes de l'ohmmètre, on mesure la résistance de l'air entre ces deux bornes. Cette résistance est supérieure à 2 MΩ. L'ohmmètre ne peut pas donner le résultat de cette mesure, il affiche à

gauche de l'écran.



**Choisir le calibre**

Si on n'a aucune idée de la valeur de la résistance à mesurer, on peut garder le calibre 2 MΩ et faire une première mesure.

Si on connaît l'ordre de grandeur de la résistance, on choisit le calibre juste supérieur à la valeur estimée.



**Brancher l'ohmmètre**

Si la résistance est utilisée dans un montage, il faut l'en extraire avant de la connecter à l'ohmmètre.

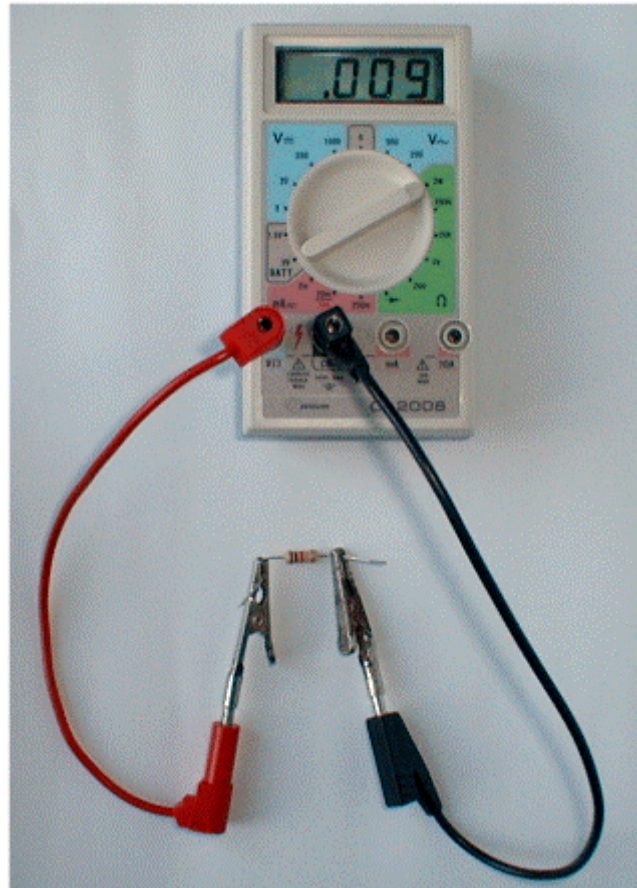
La résistance à mesurer est simplement branchée entre la borne COM et la borne repérée par la lettre  $\Omega$ .

Lecture du résultat

Ici, par exemple, on lit :

**R = 0,009 M $\Omega$**

Autrement dit **R = 9 k $\Omega$**





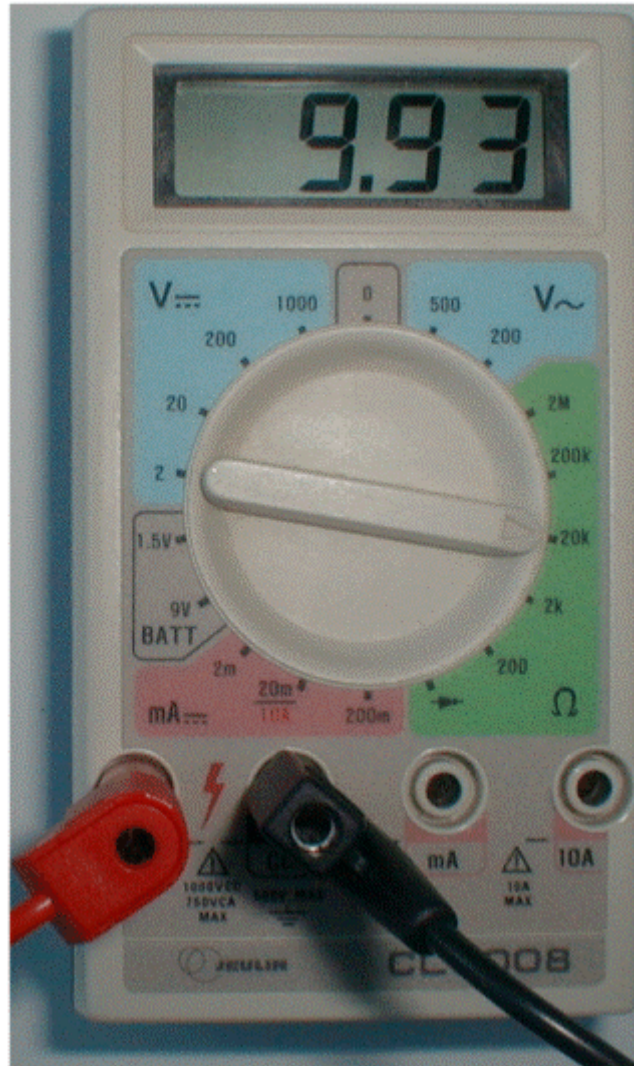
**Choix d'un calibre plus précis**

Puisque la valeur de la résistance est de l'ordre de 9 kΩ, on peut adopter le calibre 20 kΩ.

On lit alors :

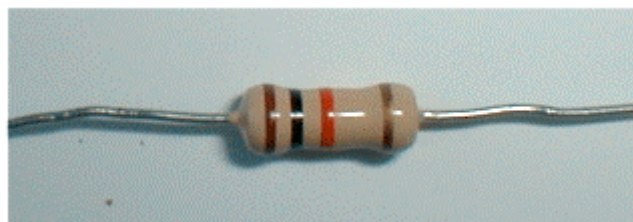
**R = 9,93 kΩ**

Le calibre suivant (2 kΩ) est inférieur à la valeur de R. Nous ne pourrions donc pas l'utiliser.



**Cohérence du résultat de la mesure avec la valeur marquée sur le corps de la résistance**

La valeur de la résistance est indiquée par trois bandes colorées. Une quatrième bande indique la précision du marquage. Ici, cette bande de couleur or signifie que la précision est de 5%.



A chaque couleur correspond un chiffre :

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Ici le marquage indique :

$$R = 10 \times 10^3 \Omega \text{ à } 5\% \text{ près.}$$

soit :  $R = 10 \text{ k}\Omega$  à 5% près.

$$5\% \text{ de } 10 \text{ k}\Omega = 0,5 \text{ k}\Omega.$$

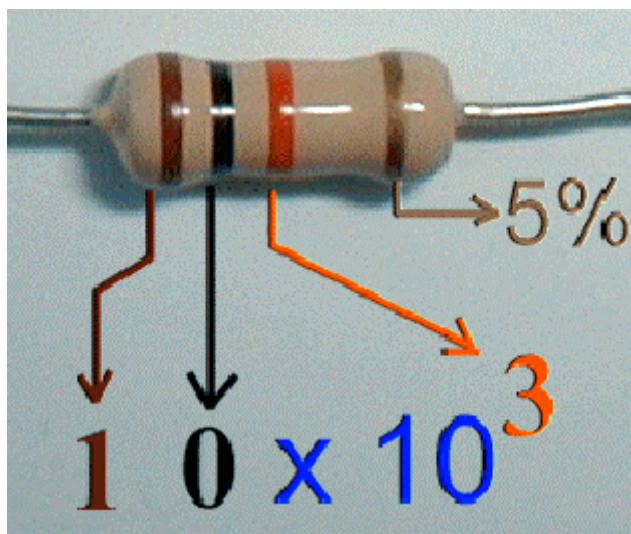
La résistance  $R$  est donc comprise dans l'intervalle :

$$9,5 \text{ k}\Omega \leq R \leq 10,5 \text{ k}\Omega$$

Le résultat de la mesure  $R = 9,93 \text{ k}\Omega$  est bien compatible avec le marquage.

On pourra finalement écrire :

$$R \approx 9,9 \text{ k}\Omega$$



### 3.4 Fréquencemètres

#### 3.4.1 Introduction

Un appareil appelé fréquencemètre permet de mesurer la fréquence d'un signal. Mais peut aussi permettre de mesurer :

- La période d'un signal,
- Le quotient de deux fréquences,
- Un nombre d'événements entre deux dates,
- Un intervalle de temps entre deux événements.

Un fréquencemètre permet d'afficher et de sortir le résultat de la mesure sous forme numérique. Pour cette raison, il est parfois appelé fréquencemètre numérique.

#### 3.4.2 Organisation générale

Un fréquencemètre comprend quelques circuits de base, interconnectés dans une configuration correspondant à la fonction choisie :

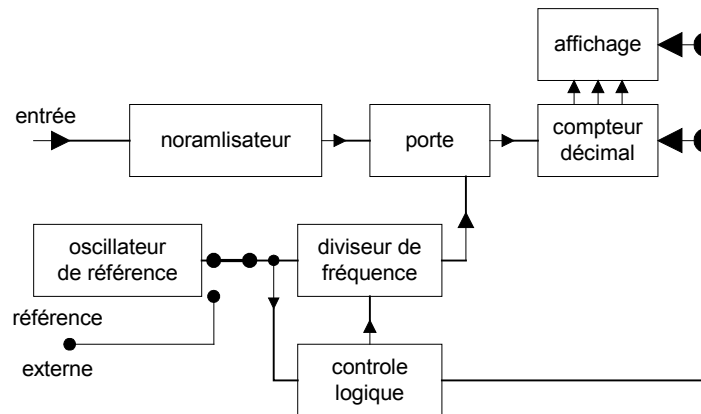


Diagramme fonctionnel d'un Fréquencemètre

Figure 3-15 : schéma bloc général d'un fréquencemètre.

**Oscillateur de référence, horloge :** c'est un oscillateur dont la fréquence  $f_0$  est connue avec précision. Cette fréquence vaut en général 5 MHz ou 10 MHz ; elle est obtenue à partir d'un oscillateur à quartz.

**Diviseur de fréquence :** ce circuit divise par décades successives la fréquence  $f_E$  du signal appliqué à son entrée. La précision de la fréquence de sortie  $f_S$  n'est pas altérée par ces divisions successives, elle reste celle de la fréquence d'entrée.

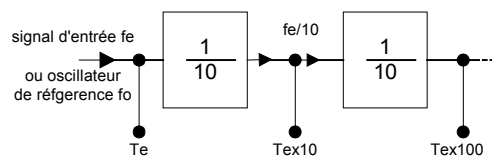


Figure 3-16 : diviseur de fréquence.

**Normalisateur :** ce circuit fournit, à partir des signaux d'entrée de fréquence  $f$  à mesurer, de formes et d'amplitudes variées, des impulsions calibrées compatibles avec la partie logique de l'appareil.

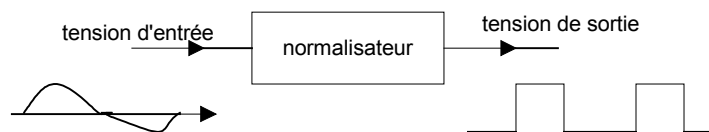


Figure 3-17 : normalisateur.

**Porte :** la porte est un circuit logique qui :

- Soit laisse passer les impulsions de son entrée vers le compteur,
- Soit bloque ces impulsions.

La commande de porte est effectuée par un circuit de départ-arrêt constitué de deux bascules.

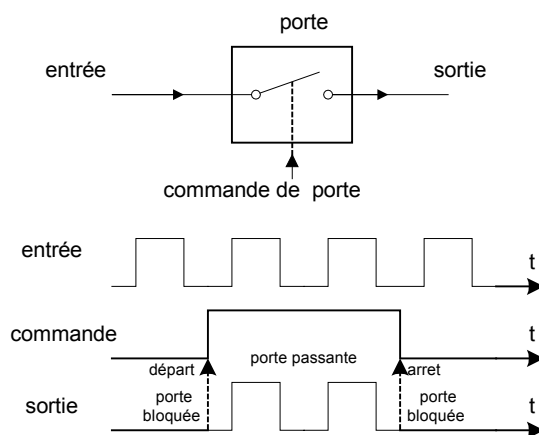


Figure 3-18 : fonctionnement de la porte.

**Compteur décimal :** Le compteur compte les impulsions qui franchissent la porte. Il est caractérisé par sa capacité décimale et sa fréquence maximale de comptage.

**Affichage et contrôle logique :** ce circuit mémorise les chiffres de décades de comptage, affiche le résultat, indique l'unité de mesure, positionne la virgule et remet à zéro le compteur avant une nouvelle mesure.

### 3.4.3 Réglages d'un fréquencemètre

Les appareils les plus simples ne possèdent qu'un seul type de fonctionnement, celui en mesure de fréquence. Les appareils les plus complets permettent l'ensemble des mesures décrites en introduction. Ils sont souvent appelés compteurs universels.

L'utilisateur choisit, soit par commutateur, soit par boutons poussoirs, la fonction utilisée pour la mesure et la durée de la mesure. Parmi les réglages effectués par l'opérateur on cite :

- Cadence de mesure,
- Réglages des entrées,
- Réglages pour le fonctionnement en fréquencemètre ou périodemètre,
- Réglages pour la mesure d'intervalle de temps,
- Réglages pour le fonctionnement en totalisateur.

### 3.4.4 Précision du fréquencemètre

La précision d'une mesure au fréquencemètre dépend à la fois du type de mesure et de la précision de l'oscillateur de référence. Cette dernière est fonction :

- Du type de l'oscillateur de référence,
- De la température,
- Du temps qui s'est écoulé entre l'étalonnage et l'utilisation (vieillessement),
- Des fluctuations de la tension du secteur.

### 3.4.5 Précautions d'emploi d'un fréquencesmètre

La seule précaution d'emploi d'un fréquencesmètre concerne la tension d'entrée qui ne doit pas être trop élevée. En fait la tension efficace maximale admissible dépend de la fréquence. En général le constructeur donne les valeurs de  $V_1$ ,  $f_1$ ,  $V_2$ ,  $f_2$  sous la forme :

250 V efficaces ( $V_1$ ) jusqu'à 400 Hz ( $f_1$ )  
5v efficaces ( $V_2$ ) au-dessus de 10 MHz ( $f_2$ )

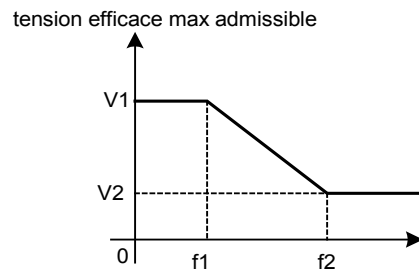


Figure 3-19 : caractéristique tension-fréquence.