

Cours destiné aux techniciens  
Des ISETs

# ELECTRONIQUE ANALOGIQUE

Ce cours est issu du cours

ELECTRONIQUE ANALOGIQUE de **Y.Darbellay**

Bibliographie:

Principes d'électronique **Albert Paul Malvino**

Réalisé par : **GRIRI Faouzi.**



## 1. INTRODUCTION

### *1.1 Représentation des grandeurs*

Nombreux sont les systèmes qui utilisent des grandeurs en entrée, les traitent et délivrent en sortie des commandes ou des informations pour l'utilisateur. Les grandeurs peuvent être représentées de deux façons :

- Représentation analogique
- Représentation numérique

#### **1.1.1 La représentation analogique**

La plupart des capteurs transforment une grandeur physique (température, pression...) en grandeur électrique. De même, le microphone transforme la pression acoustique en grandeur électrique proportionnelle.

Caractéristique des grandeurs analogiques :

Elles peuvent prendre toutes les valeurs en variant graduellement entre deux limites, par exemple une automobile peut avoir une vitesse variant entre 0 et 220 km/h.

#### **1.1.2 La représentation numérique**

La grandeur mise sous forme numérique n'est plus proportionnelle à la grandeur d'entrée. Elle s'exprime par symboles ou codes (chiffres) par exemple, le tachymètre (se prononce "takimetre") d'une automobile s'il est numérique, indique une valeur par pas de 1 km/h : la progression est discontinue s'il est analogique (à aiguille) la progression est continue. La représentation numérique est donc DISCONTINUE.

### *1.2 Les systèmes analogiques*

Les systèmes analogiques regroupent les montages utilisés pour le contrôle ou pour le réglage. Ils utilisent des composants fonctionnant de manière linéaire, sans discontinuité. Ce sont ces

systèmes que nous allons étudier dans le présent cours, les systèmes numériques sont traités dans le cours électronique numérique.

Cette séparation en deux systèmes est faite pour les besoins du cours, dans la pratique, on trouve des circuits composés de systèmes numériques et analogiques.

### ***1.3 Outils utilisés***

L'étude de ce cours nécessite la maîtrise des lois suivantes:

- Loi d'Ohm
- Lois de Kirchhoff
- Théorème de superposition
- Théorème de Thévenin
- Théorèmes de Norton

## **2. COMPOSANTS DE BASE**

### ***2.1 Introduction***

Les résistances et les potentiomètres sont des éléments passifs, c'est-à-dire qu'ils n'apportent aucune énergie (amplification) dans le montage où ils sont utilisés. Ils ne peuvent que diminuer l'amplitude d'un signal.

Leur action est proportionnelle à leur valeur, ils ont un comportement linéaire.

### ***2.2 Les résistances***

#### **2.2.1 Les résistances de faible puissance**

Ce sont les plus couramment utilisées en électronique. Elles sont marquées par bagues de couleur.

#### **2.2.2 Les résistances à couche de carbone**

On dépose une couche mince de carbone et de résine sur un bâtonnet isolant de céramique ou de verre. On trace ensuite une hélice au faisceau laser qui enlève le carbone sur une très faible largeur. La piste de carbone résistante est alors semblable au fil d'une résistance bobinée. On place ensuite les capsules de sertissage avec les fils de raccordement aux deux extrémités puis on fait l'enrobage de protection et le marquage de couleur.

### 2.2.3 Les résistances à film métallique

Procédé de fabrication identique aux résistances à couche de carbone à l'exception du dépôt qui est à base d'oxydes métalliques ou de métaux précieux ou d'alliage Nickel-Chrome.

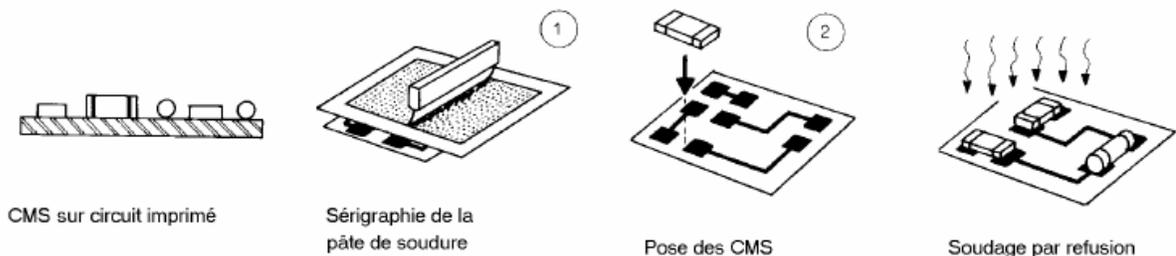
### 2.2.4 Les résistances agglomérées au carbone

Moulage d'un mélange de silice, Bakélite et carbone comprimés dans un tube de Bakélite. Ces résistances sont de moins en moins utilisées à cause de leur stabilité médiocre, tension de bruit importante. On les trouve encore pour des valeurs très élevées de 1 M $\Omega$  à 100 M $\Omega$ .

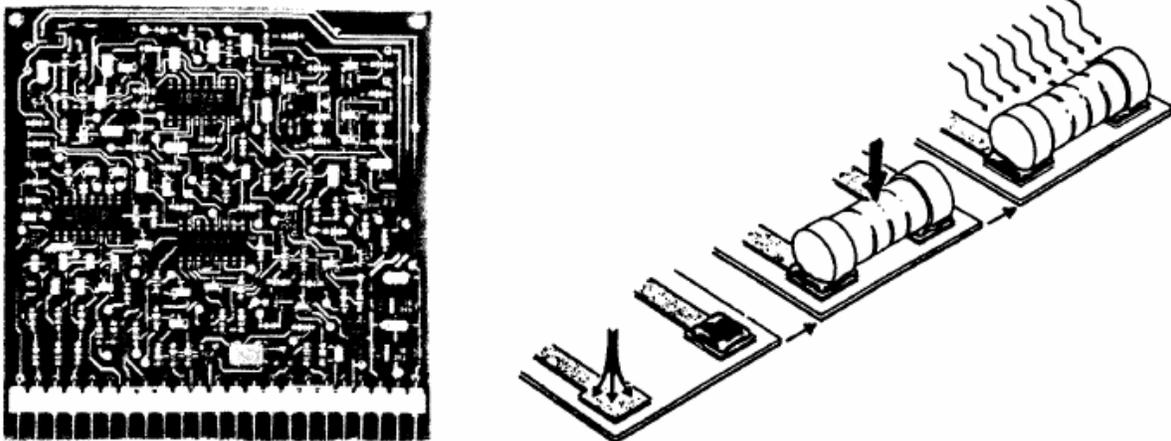
### 2.2.5 Les résistances SMD ou CMS (composants montés en surface)

Cette nouvelle technologie utilise des composants très petits permettant un gain de place important et un encombrement réduit des circuits.

Il n'y a plus de fils pour le soudage mais les extrémités des composants permettent le soudage direct sur le cuivre du circuit imprimé.



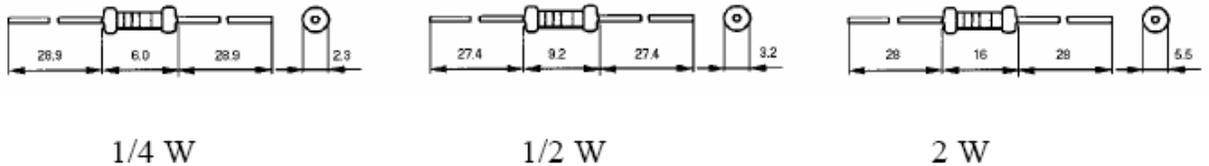
#### 2.2.5.1 Montage des CMS sur une face du circuit imprimé et soudure par refusions



## 2.2.6 La puissance des résistances

Sur les petites résistances, aucun marquage ne donne une indication de puissance, seules les dimensions permettent de savoir quelle puissance maximum peut dissiper une résistance.

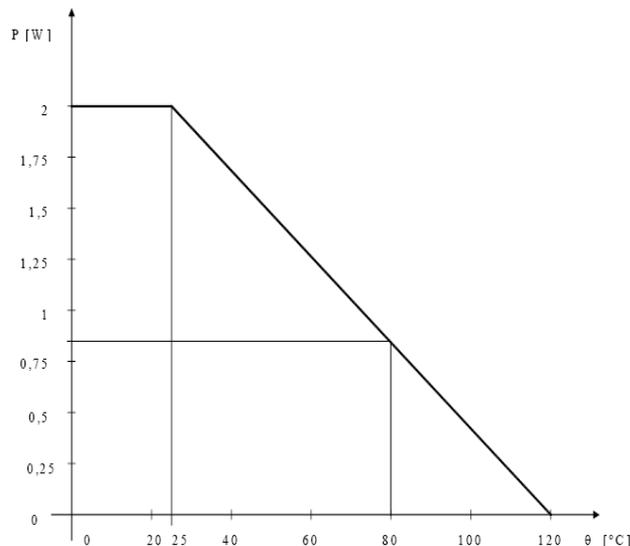
Exemples :



Il existe d'autres valeurs (1/8 W, 1 W) moins courantes pour lesquelles on se réfère aux indications du fournisseur.

**ATTENTION** : Ces puissances limites d'utilisation ne sont valables que jusqu'à 25°C (température ambiante). Au-delà de cette température, il faut se baser sur les courbes de réduction de puissance des fabricants. La plupart des résistances sont utilisables jusqu'à 120°C.

Exemple : Résistance 2 W



Supposons que la température ambiante atteigne 80°C.

- Par lecture graphique : la résistance ne peut plus dissiper 2 W, mais seulement 0,85 W
- Par calcul : on a 2 triangles rectangles semblables :

le 1<sup>er</sup> a pour cotés de l'angle droit

- En vertical de 0 à 2 W
- En horizontal de 25 à 120°C = 95°C

Le 2ème a pour cotés de l'angle droit

- En vertical, la valeur cherchée x
- En horizontal de 80 à 120°C = 40°C

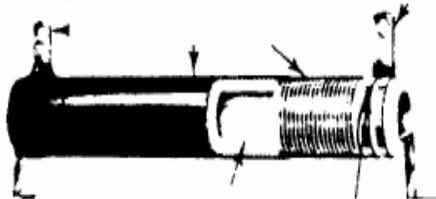
Il y a proportionnalité de telle façon que

$$\frac{2W}{X} = \frac{95^{\circ}c}{40^{\circ}c} \implies X = 0.84W$$

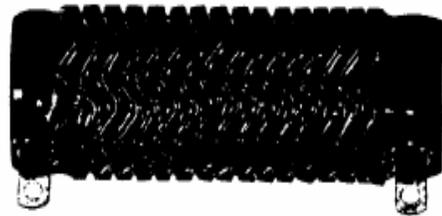
### 2.2.7 Les résistances de puissance

On trouve ces résistances dans les valeurs de puissance allant de 4 W à 2500 W. Elles supportent des températures de service allant jusqu'à 350 ° C. Elles sont soumises aux lois de réduction de puissance entre 25 ° C et par exemple 350 ° C. Elles sont réalisées en fil bobiné (généralement alliage Fer-Nickel).

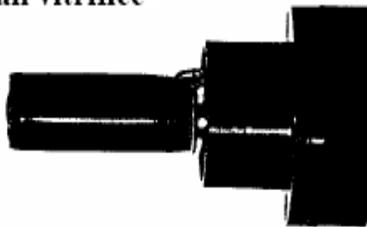
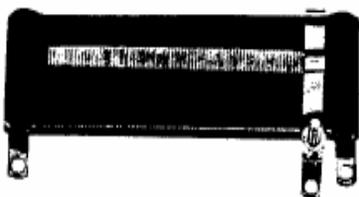
*Borne étamée en alliage*    *Couche d'email vitrifiée*    *Bobinage à pas uniforme*    *Borne soudée*

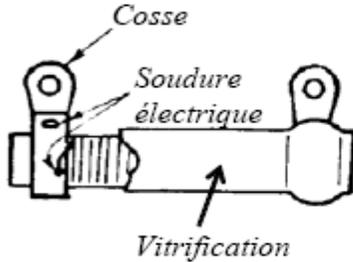
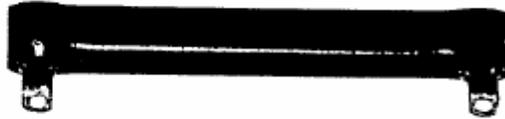


*Support résiliant*    *Robuste mandrin de céramique*    *Fil résistant soudé à la borne*



#### Résistances sous couche d'email vitrifiée

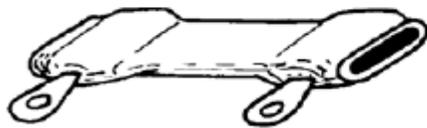




Résistance bobinées

Type RH-25 1% 25 [W]

Type RH-50 1% 50 [W]

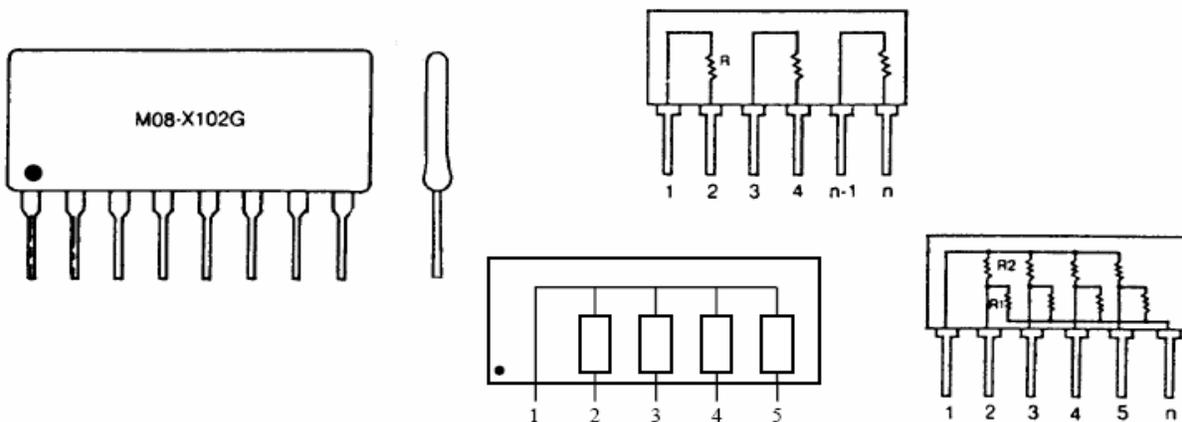


Attention : Ces résistances atteignent des températures dépassant le point de fusion de la soudure à l'étain (environ 180 ° C). Dans les cas où la résistance est fortement sollicitée, les connexions se feront sans soudure à l'étain (vissées, par fiche AMP, etc.).

Les résistances vitrifiées avec intérieur creux auront une meilleure évacuation thermique si elles sont montées verticalement avec tube intérieur libre pour le passage de l'air (effet de cheminée).

### 2.2.8 Les réseaux de résistance

On peut grouper plusieurs résistances de faible puissance (0,2 à 0,3 W par résistance) dans des boîtiers semblables à ceux des circuits intégrés ou circuits hybrides.



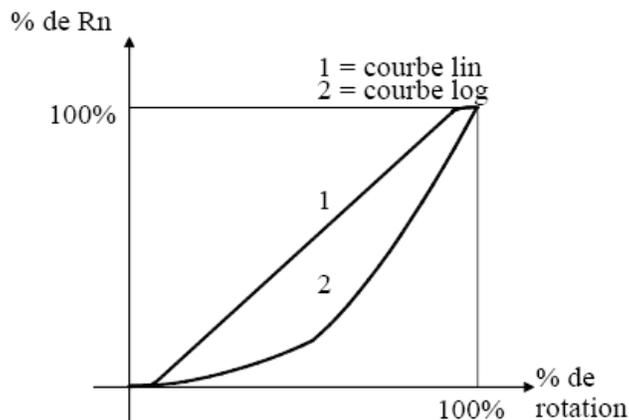
## 2.3 Les potentiomètres

### 2.3.1 Les potentiomètres variables (réglages par l'utilisateur)

La plupart sont à variation linéaire, c'est-à-dire que la variation de résistance est proportionnelle à l'angle de rotation.

L'indication suivante est portée sur le potentiomètre, par exemple pour 10 k $\Omega$  10 k LIN ou 10 KA. La rotation se fait sur 270° (potentiomètre à butée min-max), sur 360 ° (potentiomètre sans butée) ou sur plusieurs tours (système en hélice 10 tours ou 15 tours).

D'autres modèles sont à variation logarithmique :

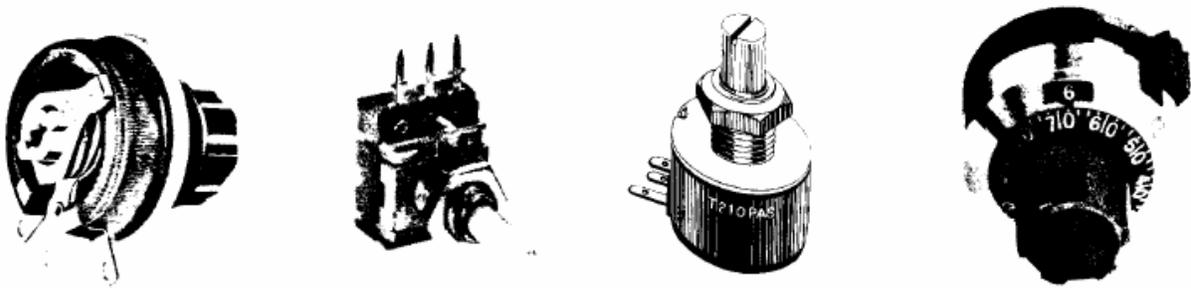


L'oreille humaine perçoit les bruits au logarithme de leur intensité. Par exemple, un bruit 100 fois plus fort est perçu 2 fois plus fort, 1000 fois plus fort perçu 3 fois plus fort. D'où l'utilité des potentiomètres à progression logarithmique pour le réglage du volume sonore des amplificateurs. Ils sont marqués pour 10 k $\Omega$  : 10 k LOG ou 10 kB

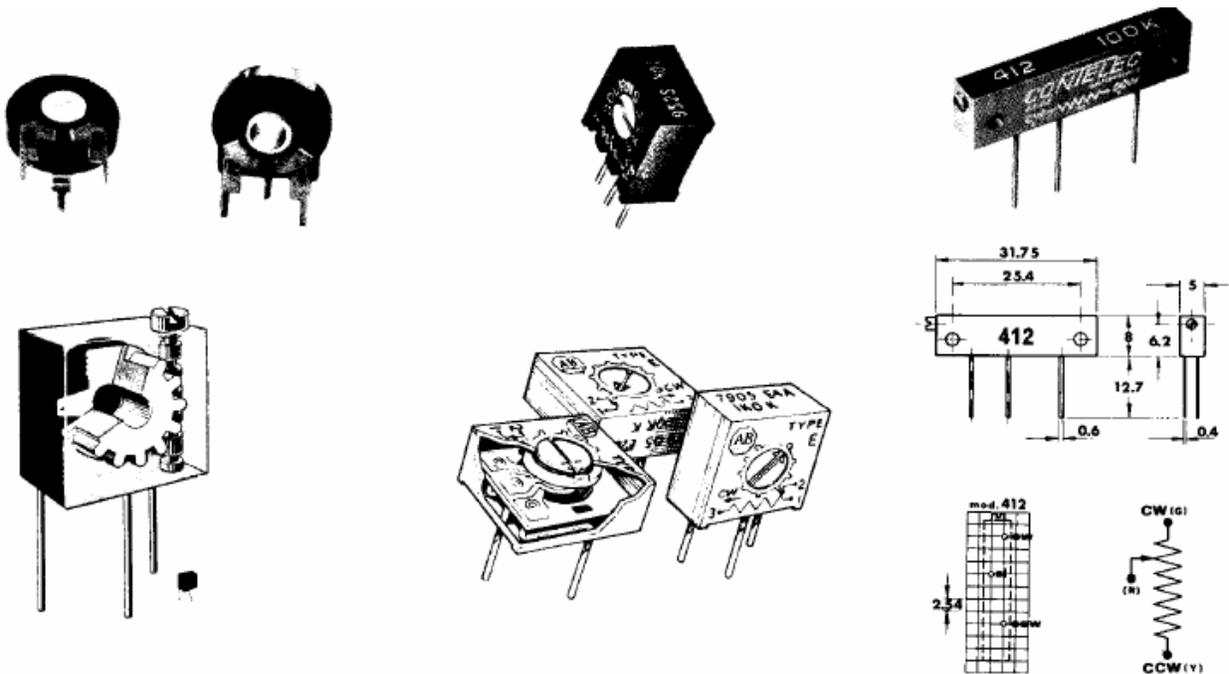
### 2.3.2 Les potentiomètres ajustables

On trouve les mêmes modèles que précédemment, mais leur réglage nécessite l'usage d'un outil. Dans un appareil, ces potentiomètres, aussi appelés "trimmers", sont prévus pour des ajustages ou réglages par des professionnels.

### 2.3.3 Quelques modèles de potentiomètres



### 2.3.4 Quelques modèles de trimmers



## 2.4 Condensateurs

Le condensateur est certainement l'un des plus importants composants de l'électrotechnique, en particulier dans la technique des courants alternatifs. Citons quelques applications de ce composant:

- Filtrage dans les circuits à courant continu.

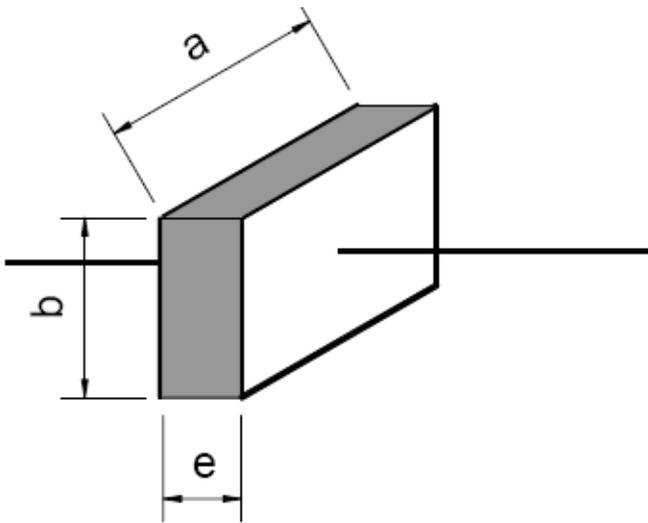
- Protection contre les surtensions sur les composants travaillant en commutation.
- Couplage B.F.
- Circuits oscillants.
- Bascule monostable.
- Intégrateur, dérivateur.
- ...

### 2.4.1 Définition

Le condensateur est un composant qui a la propriété d'accumuler une charge électrique.

### 2.4.2 Principe

Un condensateur se compose de deux plaques métalliques isolées entre elles. L'isolant peut être de l'air ou tout autre matériau bon isolant. Le matériau isolant s'appelle *diélectrique*.



$$C = \frac{S \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}{e}$$

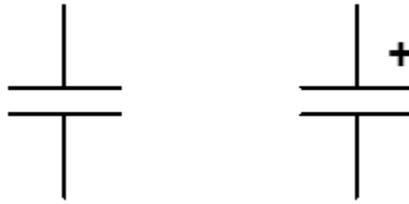
avec

C: Capacité en farads. [F]

$S = a \cdot b$ : Surface des plaques. [m<sup>2</sup>]

e: Epaisseur de l'isolant. [m]

### 2.4.3 Symboles



### 2.4.4 Charge du condensateur

$$Q = CU$$

Q : Quantité d'électricité en coulombs C

C : Capacité F

U : Tension V

Si la charge du condensateur est faite par une source de courant alors  $Q = CU = It$



Cette relation n'est valable que si le courant est constant.

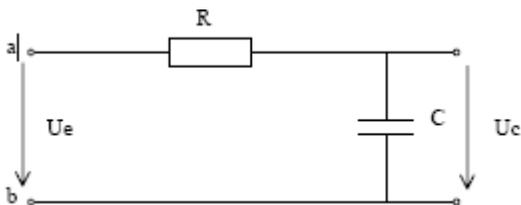
### 2.4.5 Energie emmagasinée dans un condensateur

$$W = \frac{1}{2}CU^2$$

W : Energie emmagasinée J

### 2.4.6 Circuit RC

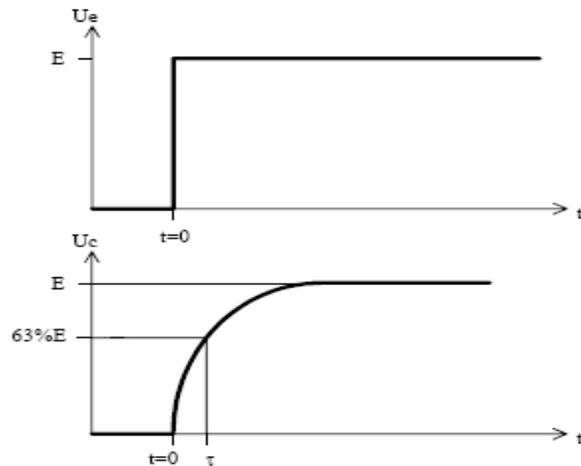
Dans le circuit RC série ci-contre, la tension aux bornes du condensateur varie selon les deux lois suivantes.



### 2.4.6.1 Charge de condensateur

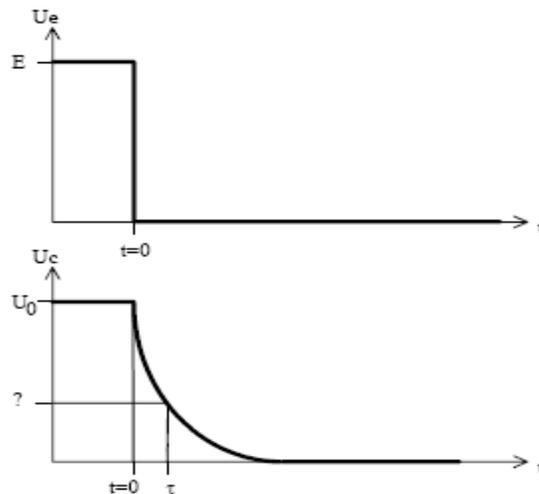
Le temps de charge d'un condensateur dépend de la constante de temps  $\tau$  du circuit.

Après un temps de  $1 \tau$  la tension aux bornes de C est de 63% de la tension d'entrée E et après  $5 \tau$  le condensateur peut être considéré comme chargé. La courbe de charge du condensateur est une fonction exponentielle.



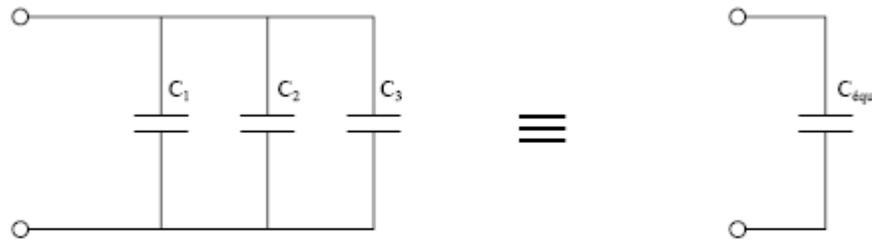
### 2.4.6.2 Décharge de condensateur

Si l'on applique une tension nulle entre les points a et b le condensateur est complètement déchargé après  $5 \tau$ .



### 2.4.7 Mise en parallèle de condensateurs

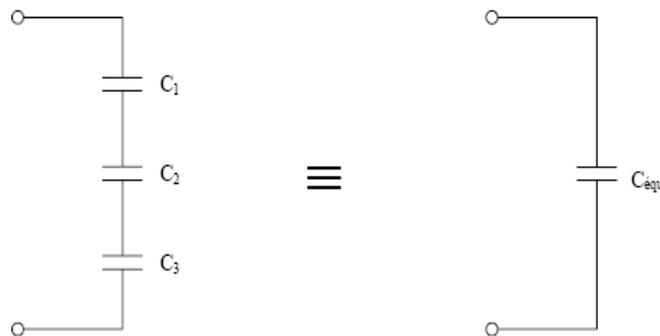
La capacité équivalente de condensateurs montés en parallèle vaut la somme de toutes les capacités.



$$C_{\text{équi}} = C_1 + C_2 + C_3$$

### 2.4.8 Mise en série de condensateurs

L'inverse de la capacité équivalente de condensateurs montés en série vaut la somme de tous les inverses des capacités.



$$\frac{1}{C_{\text{équi}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

### 2.4.9 Choix du condensateur

Le choix d'un condensateur dépend des critères suivants:

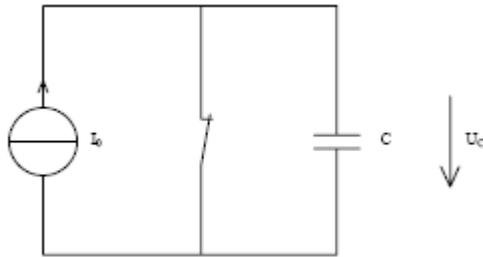
- Capacité nominale
- Tension de service
- Type du diélectrique
- Encombrement
- Prix

Le choix du diélectrique est à faire selon l'application le tableau que vous allez remplir ci-dessous résume les principaux types.

### 2.4.11 Exercice

Représenter l'allure de la courbe

$U_c = f(t)$  si au temps  $t = 0$  on ferme le contact.



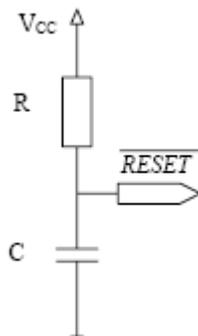
$$R = 1 \text{ k}\Omega$$

$$C = 1000 \text{ }\mu\text{F}$$

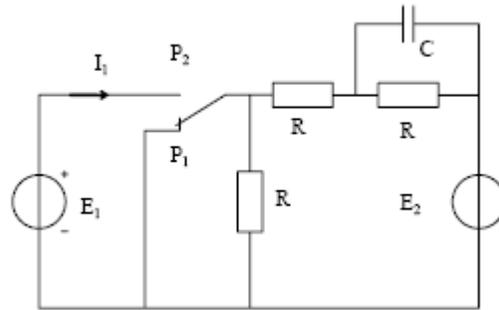
$$E = 15 \text{ V}$$

### 2.4.13 Exercice

Le schéma ci-contre est utilisé pour imposer un niveau logique bas ( $< 0,8 \text{ V}$ ) au moins 10 ms sur le signal *RESET*. Dimensionner le condensateur  $C$  si  $R = 100 \text{ k}\Omega$  et  $V_{CC} = 5 \text{ V}$ . Quel type de condensateur peut-on utiliser pour cette application?



### 2.4.14 Exercice



a) Calculer la valeur de  $U_C$  lorsque le commutateur se trouve depuis très longtemps dans la position  $P_1$ .

b) Que vaut le courant  $I_1$  immédiatement après la commutation en position  $P_2$  ?

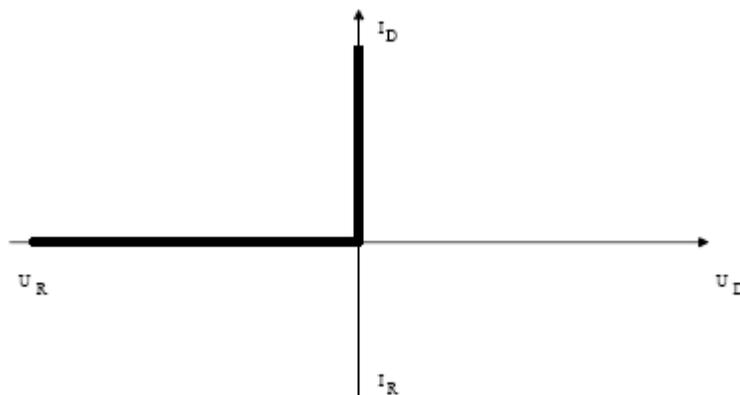
$$E_1 = 5 \text{ V } R = 100 \text{ } \Omega$$

$$E_2 = 12 \text{ V } C = 10 \text{ } \mu\text{F}$$

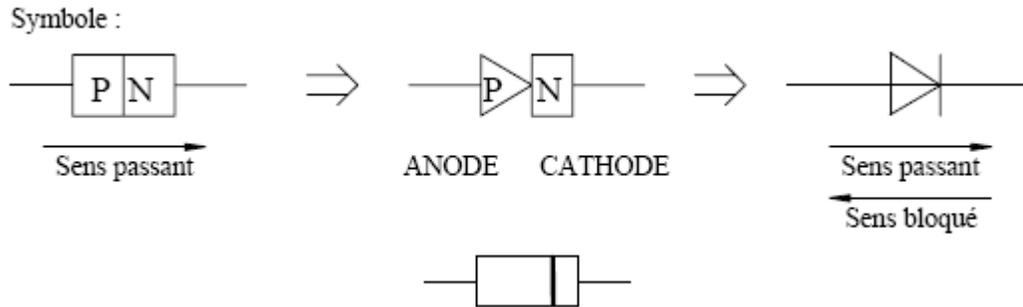
## 3. LA DIODE

### 3.1 Diode idéale

Une jonction qui bloquerait totalement en inverse sans courant de fuite et sans claquage et qui conduirait un courant infini en direct sans chute de tension serait une diode idéale.



Cette diode est théorique, elle n'existe pas.

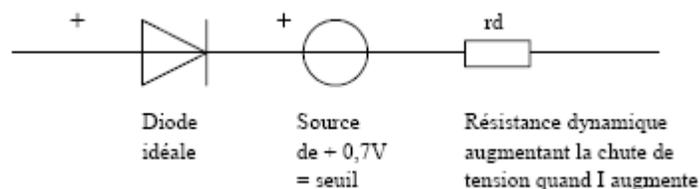


### 3.2 Diode réelle

La diode réelle se distingue de la diode idéale par

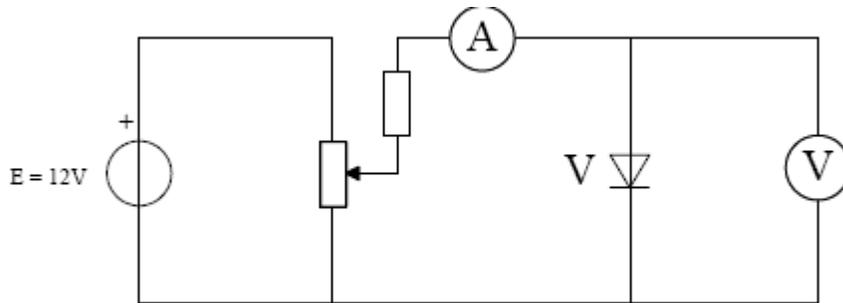
- Un seuil de tension dans le sens direct (0,7 V pour Si).
- Une chute de tension en direct qui dépend du courant (résistance du silicium dopé).
- Un seuil de tension qui varie en fonction de la température : il diminue de 2 mV chaque fois que la température augmente de 1 °C. C'est un coefficient de température négatif qui posera quelques problèmes dans le cas du transistor.
- Le blocage en inverse n'est pas parfait. Les courants de fuite de quelques nA à 20 °C double tous les 8 °C lorsque la température augmente.
- La tension inverse n'est pas infinie, le claquage apparaît en fonction de la construction de la diode.

Schéma équivalent de la diode réelle :

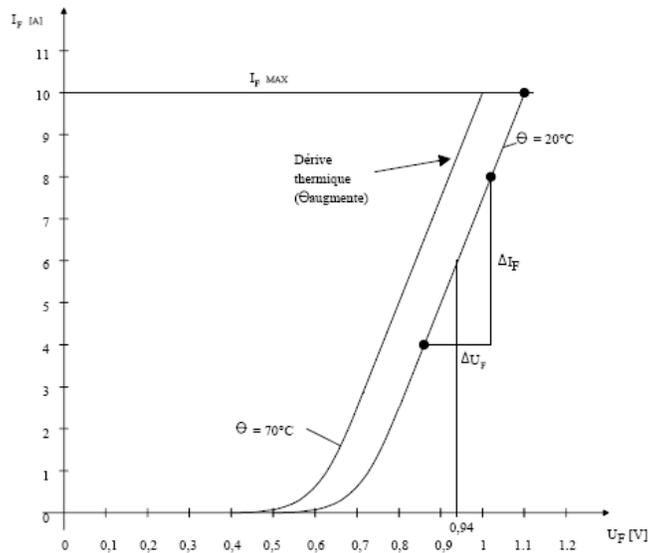


### 3.3 Caractéristique directe de la diode

Soit le montage ci-dessous :



Si l'on reporte sur graphique les résultats de la mesure, on obtient la fonction  $I_F = f(U_F)$  (F pour forward (direct)).



- On trouve une zone jusqu'à 0,5 V où le courant est nul, on n'a pas vaincu la barrière de potentiel.
- A partir de 0,5 V, le courant s'établit et on est en présence d'un coude.
- A partir de 0,65 V et jusqu'à 1 V, la droite est comparable à celle d'une résistance.
- $I_{FMax}$  est la limite max. de courant imposée par le fournisseur de la diode mesurée. Au delà, il ne garantit plus que la diode puisse dissiper la puissance sans dépasser la limite de température de 150 °C. Cette puissance est égale à  $I_D \cdot U_D = 10 \cdot 1 = 10 \text{ W}$  (pour 70° C).

Détermination de la résistance dynamique pour  $I = 6 \text{ A}$  (voir graphique) :

On trace une tangente à la caractéristique par rapport au point  $I_F = 6$  A. On forme un triangle rectangle donnant l'écart  $\Delta U_F$  pour l'écart correspondant  $\Delta I_F$  et la résistance dynamique :

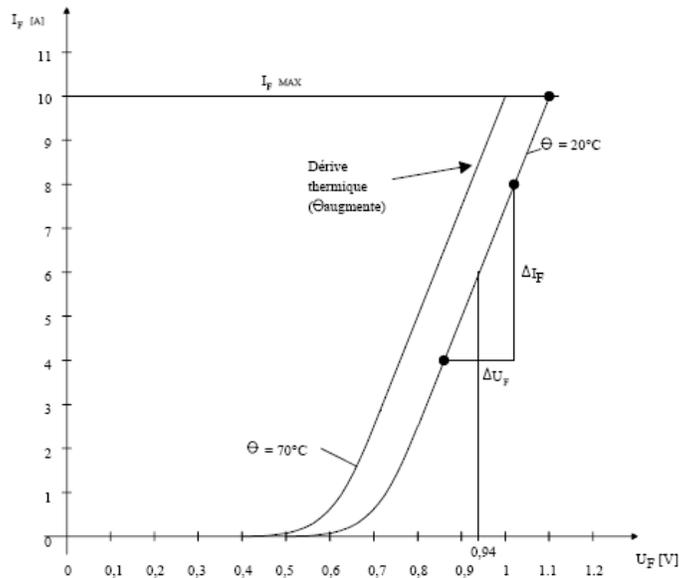
$$r_d = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{0.16}{4} = 40.10^{-3} \Omega$$

On retrouve la chute de tension à  $I_F = 6$  A par l'équation de la diode.

$$U_F = U_{seuil} + r_d \cdot I_F = 0.7 + 40.10^{-3} \cdot 6 = 0.94 \text{ V}$$

Ce qui correspond à la lecture graphique.

Nous constatons que la valeur standard de 0,7 V pour  $U_F$  prise dans la plupart des calculs est suffisante, mais il faut savoir que la chute de tension aux bornes d'une diode d'alternateur automobile qui débite par exemple 30 A est supérieure à 0,7 V.



### 3.4 La dérive thermique

Lorsque la température d'une diode au silicium augmente, on constate que son seuil de tension diminue.

Le seuil de tension diminue de 2 mV chaque fois que la température augmente de 1 °C.

Si une diode a un seuil de tension de 0,7 V à 20 °C, ce seuil pour 120 °C sera

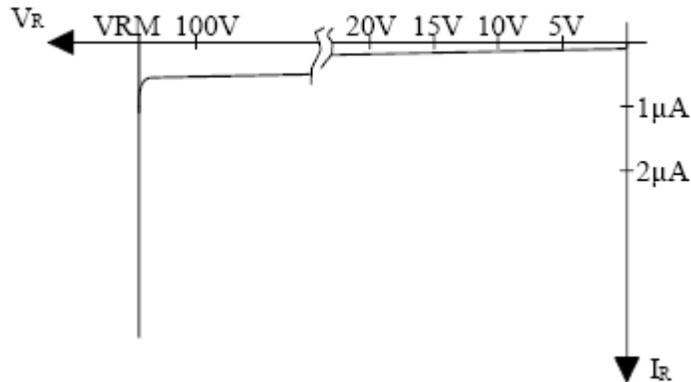
$$\Delta\Theta = 120 - 20 = 100 \text{ °C}$$

$$\Delta U = 2 \cdot 10^{-3} \text{ V} \cdot \Delta\Theta = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 0,2 \text{ V}$$

Seuil :  $0,7 \text{ V} - 0,2 \text{ V} = 0,5 \text{ V}$

De même, pour une température inférieure à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , le seuil de tension va augmenter.

### 3.5 Caractéristique inverse de la diode



En inverse, la diode se présente comme une valve fermée.

Il existe un léger courant de fuite en inverse de l'ordre des dizaines de nanoampères à quelques microampères.

Attention : ce courant de fuite double tous les  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  d'augmentation de température.

Le blocage est assuré jusqu'à un certain point dépendant de la construction de la diode. Ce point va de quelques volts à plusieurs milliers de volts.

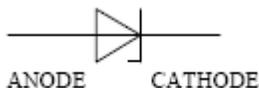
Lorsqu'on atteint cette tension de blocage ou tension d'avalanche, la diode se met à conduire brutalement et si aucune précaution n'est prise pour limiter le courant, elle sera détruite, d'où l'appellation courante de tension de claquage.

Certaines diodes sont construites pour travailler dans cette zone de claquage (diodes Zener, diodes de protection).

### 3.6 La diode Zener

C'est une diode destinée à la régulation de tension, c'est-à-dire qu'utilisée correctement, elle assure une tension constante et stable.

#### 3.6.1 Symbole graphique



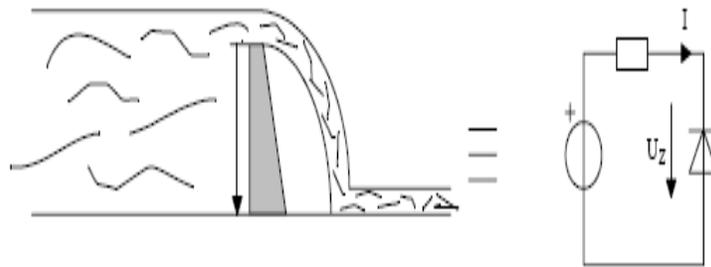
### 3.6.2 Fonctionnement

- En sens direct : cette diode fonctionne comme une diode conventionnelle et ne présente pas d'intérêt particulier.
- En sens inverse : c'est le domaine d'utilisation de la diode Zener.

La tension d'avalanche ou tension Zener\* est bien définie, elle est précise et se situe, selon le modèle de diode, entre 2,4 et 200 V.

Le courant que peut supporter la diode Zener en inverse varie de quelques mA à quelques ampères. Toujours se référer aux indications du fabricant.

### 3.6.3 Comparaison hydraulique

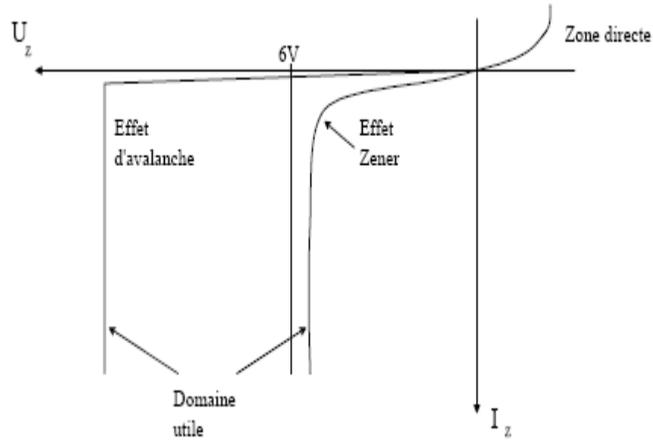


Il y a débit d'eau seulement si le niveau atteint et dépasse légèrement la hauteur du barrage.

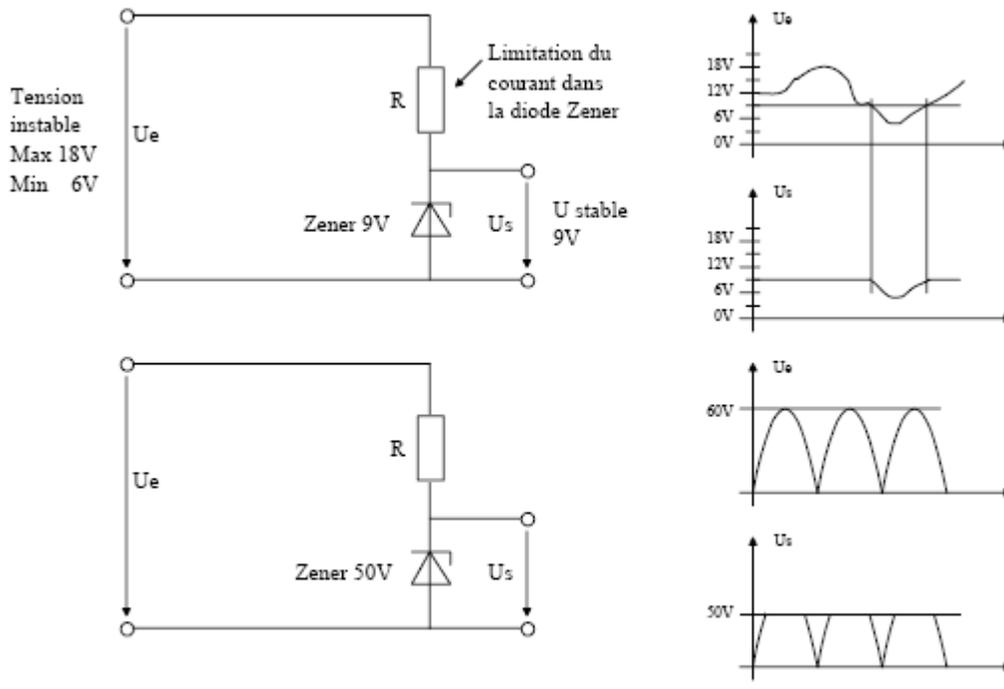
De même, la diode Zener conduira seulement à partir du moment où la tension qui lui est appliquée est supérieure à la tension Zener. Dès que la diode conduit, elle offre très peu de résistance au passage du courant. Attention à respecter les limitations de courant en ajoutant une résistance en série. Sans cela, la diode Zener peut être détruite.

**Remarque :** On parle de tension Zener entre 2,4 et 6 V, le passage en conduction inverse est progressif. On parle de tension d'avalanche à partir de 6 V, le passage en conduction inverse est brutal.

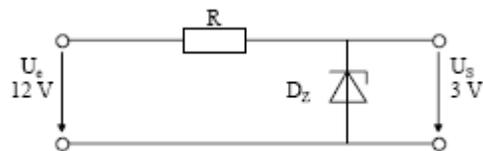
### 3.6.4 Courbe caractéristique de la diode Zener



### 3.6.5 Exemples d'application



On veut créer une tension de référence de 3 V à partir d'une source de 12 V.



On choisit une diode Zener de 3 V pour laquelle le fabricant recommande un courant nominal de 15 mA. Quelle devra être la valeur de R ?

Tension aux bornes de R :  $U_R = U_e - U_S = 12 - 3 = 9\text{V}$

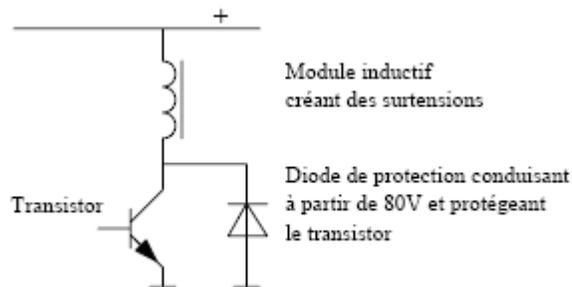
Courant dans R = 15 mA  $\rightarrow R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{9}{15 \cdot 10^{-3}} = 600\Omega$

### 3.7 Les diodes de protection

Ces diodes sont principalement destinées à protéger les semi-conducteurs contre les surtensions dangereuses.

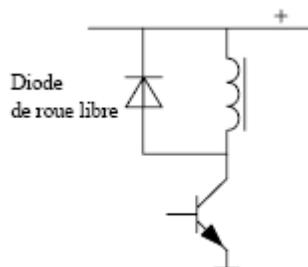
Une construction particulière leur permet de conduire un courant important en inverse (jusqu'à 1/3 du courant direct en permanence).

Comme les diodes Zener, on les branche en inverse.



La mise en conduction des diodes de protection est rapide, elle assure ainsi une protection immédiate.

Il est à noter que les diodes destinées au redressement sont parmi les plus lentes à se mettre à conduire (construites pour le redressement de 50 Hz et jusque vers 500 Hz).

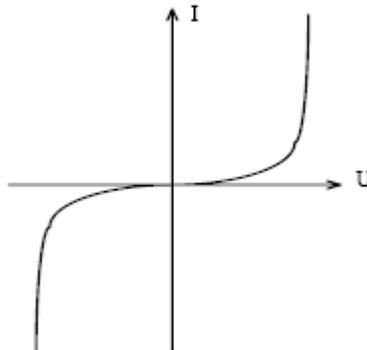


Si la mise en conduction de la diode est trop lente au moment de la surtension, une tension dangereuse a le temps d'apparaître sur le transistor pouvant entraîner des dommages.

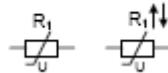
### 3.8 La VDR

Les varistances ou VDR sont des résistances dont la valeur est fonction de la tension. Elles sont constituées de poudre de carbure de silicium, frittée à des températures élevées en faisant intervenir des liants. La résistance de contact entre les particules de carbure de silicium est largement dépendante de la tension. Le fonctionnement d'une varistance s'explique par le nombre élevé de jonctions PN.

#### 3.8.1 Caractéristique d'une VDR



#### 3.8.2 Symbole de la VDR



#### 3.8.3 Boîtier d'une VDR



#### 3.8.4 Application de la VDR

Les VDR sont surtout utilisées dans les circuits pare-étincelles et dans les circuits stabilisateurs de tension. Lorsque utilisée dans les circuits en pare-étincelles, la VDR peut être montée en ..... à la fois sur la charge inductive et sur le contact de commutation. Dans les deux

cas, la VDR joue le même rôle que la diode de roue libre, elle empêche que toute la tension d'induction arrive à la hauteur du contact.

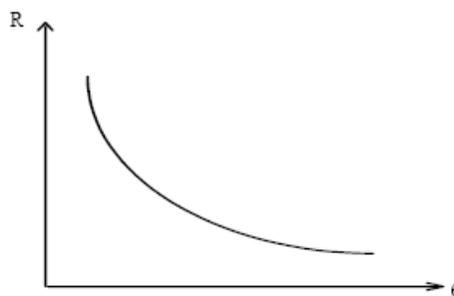
### 3.9 Résistances NTC

Les résistances **NTC** ont une valeur de résistance qui diminue lorsque la température augmente, d'où la désignation qui se traduit par **Coefficient de Température Négatif**.

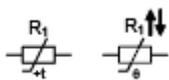
La conductivité d'une substance dépend du nombre de porteurs de charges libres et de leur mobilité, celle-ci diminuant lorsque la température augmente, à cause de la plus grande agitation des atomes. La réduction de la valeur de résistance dépend de l'accroissement du nombre de porteurs de charges libres. Dans un semi-conducteur, il y a augmentation d'électrons libres et de trous lorsque la température augmente. C'est pourquoi les résistances NTC sont faites de matériaux semi-conducteurs.

Les semi-conducteurs ne comprennent pas que des éléments comme le germanium et le silicium, ils comprennent également des composés chimiques ayant des propriétés semi-conductrices. Les résistances sont fabriquées aussi à partir d'oxyde de fer, de nickel et de cobalt, auxquels sont adjoints d'autres oxydes pour augmenter la stabilité des composants. Ces oxydes sont frittés, c'est-à-dire pressés avec un liant sous haute pression à des températures élevées.

#### 3.9.1 Caractéristique de la résistance d'une NTC



#### 3.9.2 Symbole de la NTC



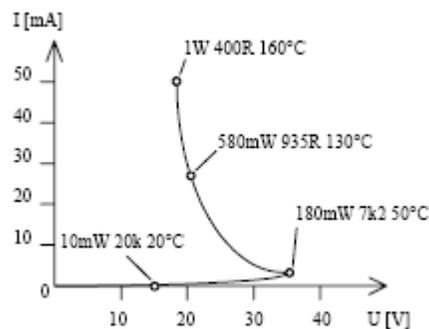
#### 3.9.3 Boîtier d'une NTC



### 3.9.4 Applications de la NTC

Il existe deux possibilités de varier la résistance des composants NTC, soit en agissant sur la température ambiante soit en faisant varier la charge électrique du composant. Dans le premier cas, le courant doit être infime si l'on veut éviter toute hausse de température dans le composant due à la puissance électrique dissipée. C'est selon cette méthode que l'on utilise les résistances NTC pour mesurer les températures ou les régler. On exploite la deuxième possibilité pour allonger le temps de commutation dans les relais.

La caractéristique  $I = f(U)$  ci-dessous, nous montre que pour une NTC ayant une résistance à 20°C de 20 k $\Omega$ , aucun effet d'auto-échauffement ne se produit jusqu'à environ 14 V (10 mW). La NTC peut donc être utilisée dans cette portée pour réaliser des mesures de températures. A des tensions plus élevées, la dissipation d'énergie est plus grande, la température de la NTC devient beaucoup plus élevée et sa valeur de résistance diminue.



### 3.10 Résistances PTC

Les résistances PTC ont une valeur de résistance qui augmente lorsque la température augmente, d'où la désignation qui se traduit par **Coefficient de Température positif**. Les résistances PTC sont composées de titanate de baryum fritté, mélangé d'oxydes métalliques ou autres additifs.

Ce n'est que dans une plage de température relativement réduite, autour de la température de Curie, que la valeur de résistance augmente lorsque la température augmente. Dans cette région

de la courbe, une très légère hausse de la température entraîne un accroissement considérable de la résistance. Le coefficient de température, dans cet écart, varie jusqu'à  $+ 0.6/K$ , c'est à dire que pour un accroissement de 1% de la température, la résistance augmente de 60%. La résistance à froid des résistances PTC est comprise entre 20 et  $100\Omega$ , l'accroissement de résistance le plus prononcé a lieu entre  $50^{\circ}C$  et  $120^{\circ}C$  et la résistance à chaud est de quelques dizaines de  $k\Omega$ .

### 3.10.1 Symbole de la PTC

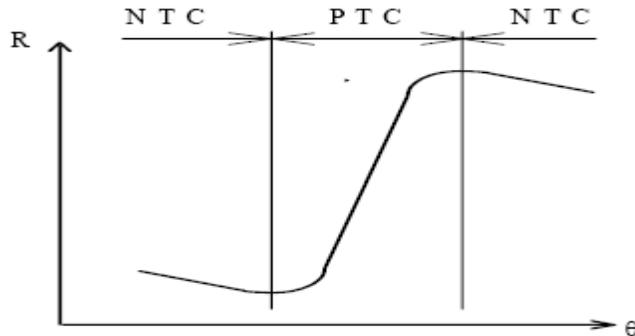


### 3.10.2 Boîtier d'une PTC



### 3.10.3 Caractéristique de la PTC

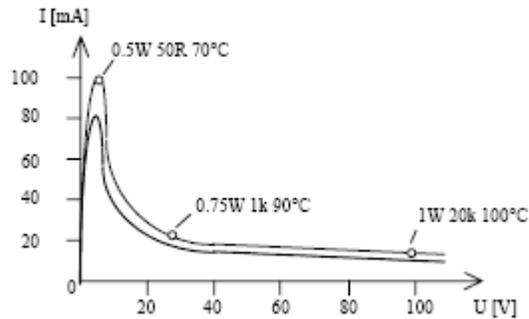
La caractéristique  $R = f(\theta)$  nous montre la variation de la résistance PTC lors d'un échauffement extérieur, à partir de la température ambiante. Pour effectuer cette mesure, il faut s'assurer que la puissance électrique dissipée dans la résistance PTC soit suffisamment basse et qu'elle ne provoque pas de hausse de la température.



La figure suivante représente la caractéristique  $I = f(U)$  d'une résistance PTC. Dans le cas de faibles tensions, il est impossible de déceler l'auto-échauffement et la résistance PTC reste à un

niveau faible. Dès que le point de transition est atteint, on observe une forte augmentation de la résistance et le courant diminue malgré l'augmentation de la tension.

Si la température ambiante est plus élevée, le point de transition est déjà atteint à de basses valeurs de dissipation. (Voir courbe en trait tillé)



Comme pour les résistances NTC, on a pour les résistances PTC des applications soit avec échauffement externe par température ambiante, soit avec auto-échauffement dû à la dissipation.

## 4. LE TRANSISTOR BIPOLAIRE

### 4.1 Principe physique

Associons ensemble trois plaques de silicium dopées pour avoir successivement : zone N - zone P - zone N et effectuons le branchement suivant :

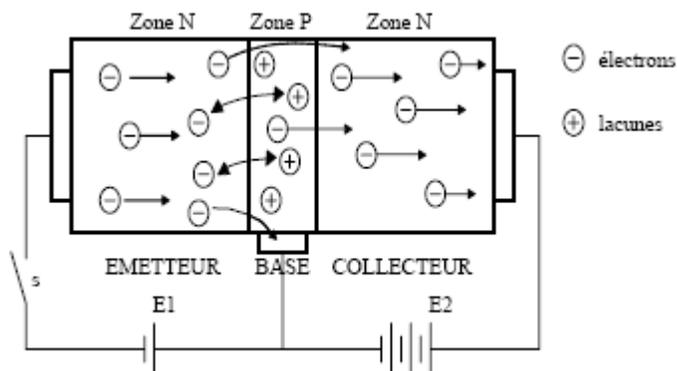
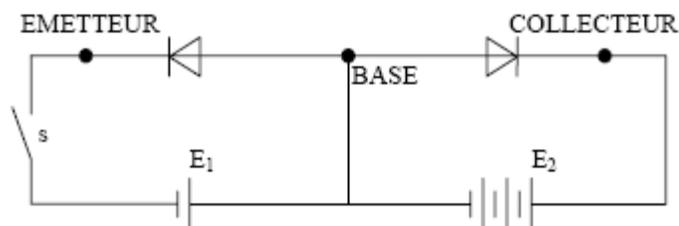


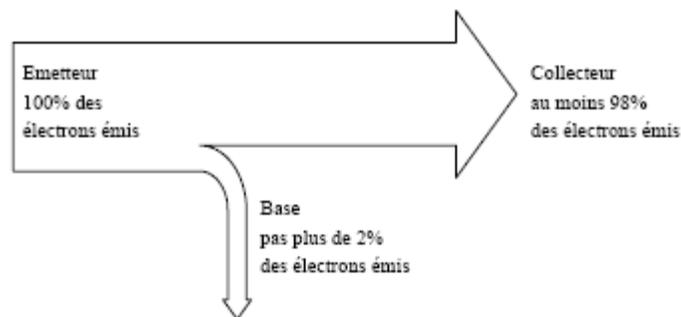
Schéma équivalent :



Situation 1 : l'interrupteur S est ouvert. Aucun courant ne circule entre les points appelés "Base" et "Emetteur". La jonction dans le circuit formé entre les bornes "Base" et "Collecteur" est polarisée en inverse. Cette jonction est donc bloquée. Il ne circule que le courant de fuite de quelques nanoampères.

Situation 2 : l'interrupteur S est fermé. Il suffit que la source E1 ait un potentiel légèrement supérieur à la tension de seuil (0,7 V) et la diode Base - Emetteur conduit. Il s'établit un mouvement ou courant d'électrons de l'émetteur vers la base. Ceci correspond à un sens conventionnel du courant électrique de base vers l'émetteur. C'est ici qu'apparaît l'effet transistor. La zone P de base a une épaisseur extrêmement faible. Lorsque le courant d'électrons s'établit de l'émetteur vers la base, on ne voit pas apparaître à la base la totalité des électrons partis de l'émetteur. L'explication est la suivante :

Lorsque les électrons arrivent dans la zone de base, cette dernière étant très mince, ils sont attirés par la tension positive de collecteur plus élevée que la tension de base. Ils traversent la zone base collecteur qui est pour eux une diode en inverse et se retrouvent au collecteur. On récolte ainsi au minimum 98 % des électrons partis de l'émetteur sur le collecteur et au maximum 2 % de ces électrons sur la base. Ceci se traduit par le schéma ci-dessous :

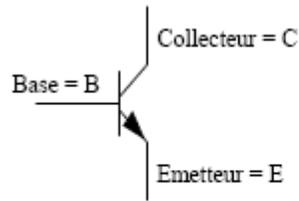


En général, on considère

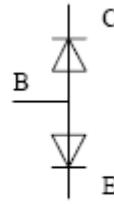
- Courant de collecteur : 99,8 à 98 % du courant d'émetteur.
- Courant de base : 0,2 à 2 % du courant d'émetteur.

#### **4.2 Symbole graphique**

Le transistor que nous venons de décrire est de type NPN (alternance des couches). Son symbole est le suivant :



Transistor NPN

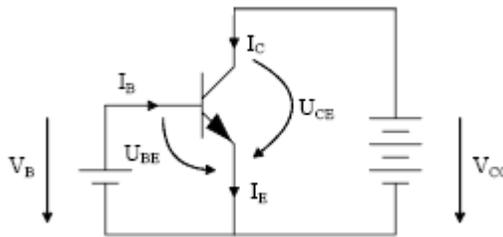


Analogie à diodes

- Malgré la symétrie apparente sur le schéma équivalent à diodes entre le collecteur et l'émetteur, on ne peut pas croiser ces deux bornes.
- Le collecteur a la plus grande tension à ses bornes et la puissance qu'il doit dissiper est importante ( $P = U \cdot I$ ). Il a une grande surface pour cela.
- L'émetteur a une faible tension à ses bornes et pour un courant sensiblement égal à celui du collecteur, la puissance dissipée est beaucoup plus faible. Sa surface est faible.
- A noter que la flèche sur la borne émetteur indique le sens direct de la diode base - émetteur.

### 4.3 Schéma électrique

Le montage ci-dessous est un montage de principe élémentaire du transistor NPN avec sens conventionnel des courants.



De cette figure, on déduit la relation fondamentale du transistor :

$$I_E = I_B + I_C$$

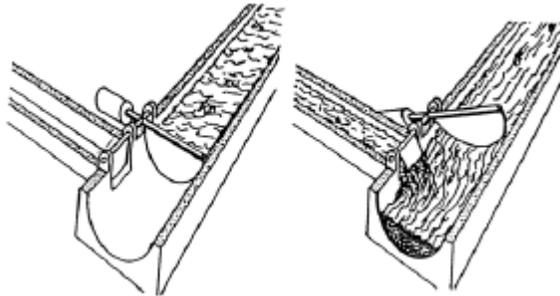
- Si  $U_B$  est inférieure à 0,4 V, il n'y aura pas de courant  $I_B$ , donc pas de courant  $I_C$  car  $I_C$  dépend de  $I_B$

C'est le courant  $I_B$  qui commande le courant  $I_C$

ou

Un petit courant d'entrée ( $I_B$ ) commande un grand courant de sortie ( $I_C$ )

#### **4.4 Modèle hydraulique**



Canal principal en haut : comparable au collecteur

Canal principal en bas : comparable à l'émetteur

Canal latéral : comparable à la base

Poids du clapet - contrepoids sur levier : comparable à la tension de seuil de 0,7 V

Fonctionnement : En l'absence de débit latéral, le débit principal ne peut s'établir.

Dès que le liquide est présent dans le canal latéral avec une pression suffisante (analogue au seuil), il peut pousser le volet de fermeture du canal principal.

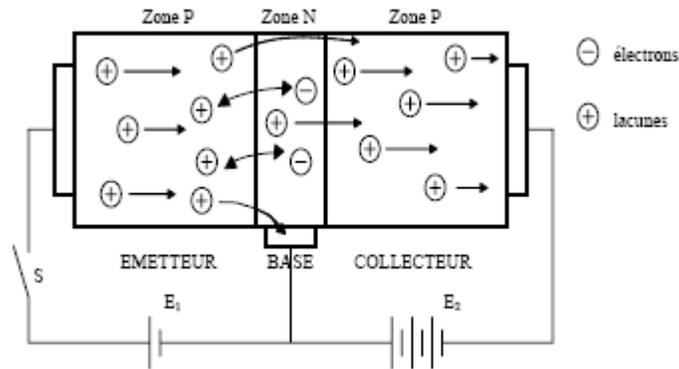
Plus la pression du canal latéral sera forte donc plus le débit de ce dernier sera important et plus le débit du canal principal sera important (jusqu'au débit maximum).

Il y a une proportion entre le débit du canal latéral (base) et le débit du canal principal (collecteur).

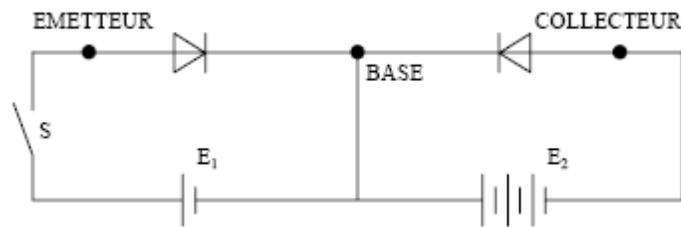
Le débit total se retrouve dans le canal principal en aval du volet de commande (c'est la zone de l'émetteur).

#### **4.5 L'autre transistor : le PNP**

### 4.5.1 Principe physique



### 4.5.2 Schéma équivalent

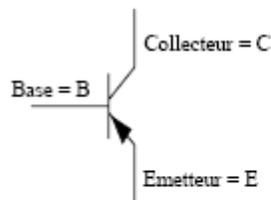


Le comportement physique est similaire à celui du transistor NPN avec les différences suivantes :

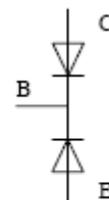
- Nous avons affaire à un courant de trous (charges positives) au lieu d'un courant d'électrons (charges négatives)
- Les polarités des alimentations sont inversées. C'est cette fois le pôle négatif de E2 qui attire les trous de l'émetteur vers le collecteur.
- Le sens physique du mouvement des charges correspond au sens conventionnel du courant.

Les mêmes proportions de courant sont respectées.

### 4.5.3 Symbole graphique



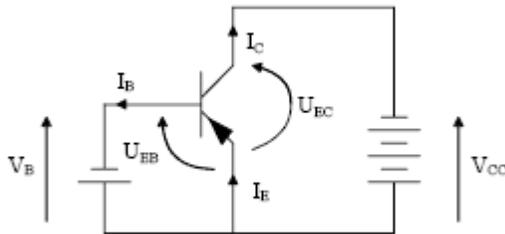
Transistor PNP



Analogie à

La flèche sur la borne émetteur indique le sens de la diode base émetteur.

#### 4.5.4 Schéma électrique



Les mêmes remarques que pour le transistor NPN s'appliquent au transistor PNP.

#### 4.6 Les paramètres des transistors

Nous savons qu'en entrée du transistor un petit courant de base commande un grand courant de collecteur en sortie.

Le transistor est donc un composant actif commandé en courant et amplifiant ce courant entre l'entrée et la sortie. Il serait intéressant de connaître le rapport de démultiplication de ce courant que nous appellerons rapport d'amplification.

Il se note par :

$$\beta = H_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

- $\beta$  (bêta)
- $h_{FE}$  que l'on trouvera plus couramment dans les catalogues de données techniques.

Ce coefficient d'amplification sera le rapport du courant de sortie sur le courant d'entrée.

Si on a 98 à 99,8% du courant dans  $I_C$  et 2 à 0,2% dans la base, alors :

$$\beta = \frac{98}{2} = 49 \text{ jusqu'à } \beta = \frac{99.8}{0.2} = 499$$

ce qui donne  $50 < \beta < 500$

On trouve dans la gamme commerciale  $\beta$  entre 20 et 900.

Ce qui signifie que  $I_C$  peut être 20 fois (transistors de forte puissance) à 900 fois (transistors petits signaux) supérieur à  $I_B$ .

Un autre paramètre se note  $\alpha$  (alpha)

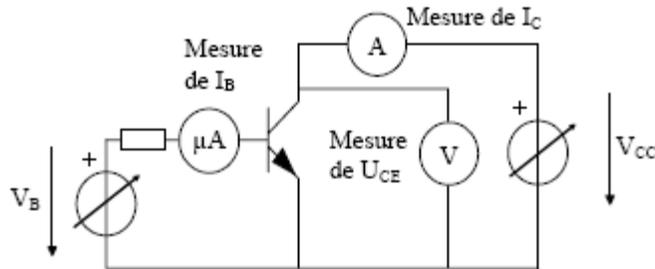
$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \text{ avec } 0,98 < \alpha < 0,998$$

Cela signifie que pour 100% des électrons partant de l'émetteur, 98% à 99,8% se retrouvent au collecteur.

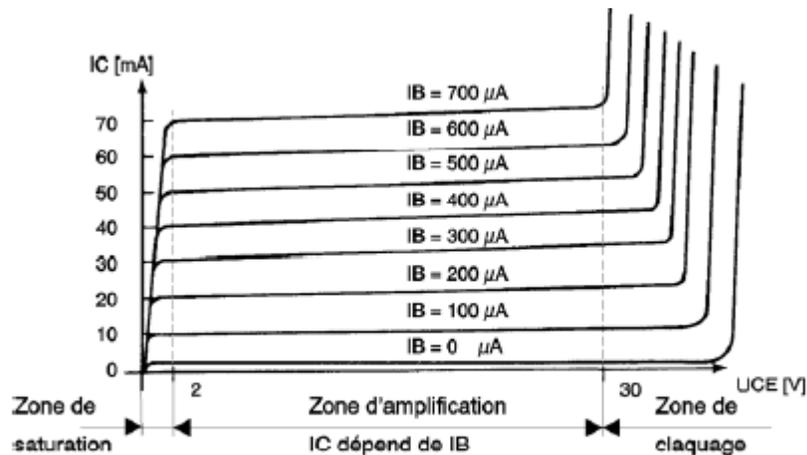
#### 4.7 Réseau de caractéristiques

4.7.1 Le courant de collecteur  $I_C$  en fonction du courant de base  $I_B$  et de la tension collecteur émetteur  $U_{CE}$

##### 4.7.1.1 Schéma du montage de mesure



##### 4.7.1.2 Réseau obtenu



Chaque courbe correspond à un courant  $I_B$  maintenu constant pendant la mesure.

- On constate qu'à partir de 2 V et jusqu'à 30 V dans notre exemple,  $I_C$  dépend peu de  $U_{CE}$  mais se trouve dans un rapport  $\beta = 100$  par rapport à  $I_B$ . C'est la zone d'amplification.

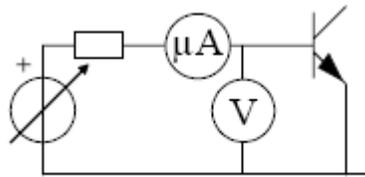
- On distingue également une zone de saturation pour  $U_{CE} = 0$  à 2 V.

C'est une zone à comportement résistif : La tension  $U_{CE}$  doit vaincre la résistance du silicium avant d'atteindre le courant  $I_C$  imposé par  $I_B$ .

- Enfin, une troisième zone, dite zone de claquage. Si la tension  $U_{CE}$  dépasse la tension maximum admissible entre collecteur et émetteur, on a, comme dans une diode en inverse, une brutale augmentation du courant entraînant la destruction du transistor si elle n'est pas contrôlée. Il faut bien choisir le transistor en fonction de l'application pour ne pas atteindre cette zone.

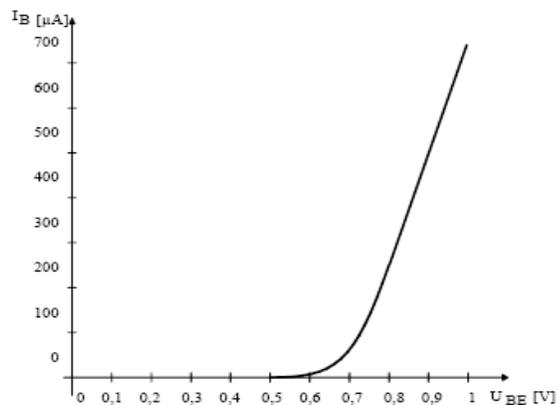
## 4.7.2 Le courant $I_B$ en fonction de la tension base émetteur $U_{BE}$

### 4.7.2.1 Schéma du montage de mesure



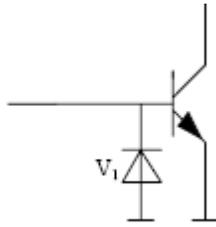
C'est la mesure de la caractéristique de diode base - émetteur analogue à la caractéristique directe d'une diode au silicium

### 4.7.2.2 Réseau obtenu



**IMPORTANT** : il est à retenir que la diode base émetteur d'un transistor ne supporte pas de grandes tensions inverses. La tension de claquage se situe vers -5 V à -20 V.

En cas de risque d'impulsions négatives sur la base, on adaptera le montage ci-dessous.



En plaçant la diode  $V_1$ , la tension négative  $U_{BE}$  ne dépassera pas  $-0,7\text{ V}$

#### ***4.8 Influence de la température***

Lorsqu'un transistor est traversé par un courant, sa température augmente.

Ceci a pour effet de diminuer le seuil de tension de la diode B-E ce qui correspond en hydraulique à baisser la hauteur d'un barrage de régulation de débit au fil de l'eau.

Conséquence : si  $U_{BE}$  diminue, le courant  $I_B$  augmente (comme le débit du cours d'eau pris en exemple).

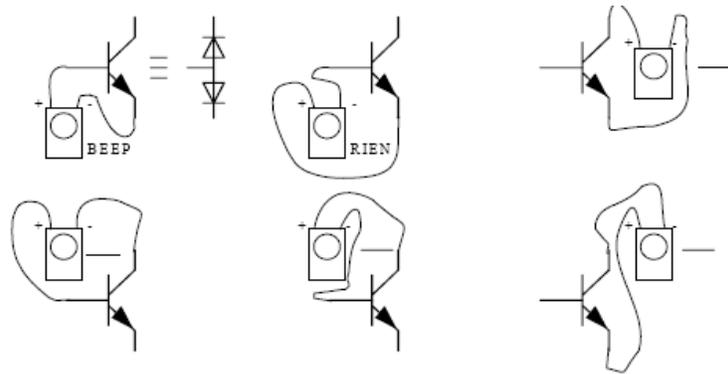
- Si  $I_B$  augmente,  $I_C$  augmente aussi.
- Si  $I_C$  augmente, le transistor chauffe davantage.

Ceci entraîne une nouvelle diminution du seuil  $U_{BE}$ . C'est l'emballement thermique dû au coefficient de température négatif des semi-conducteurs au silicium et au germanium. Cet emballement peut entraîner la destruction du transistor si aucune disposition n'est prise dans le montage.

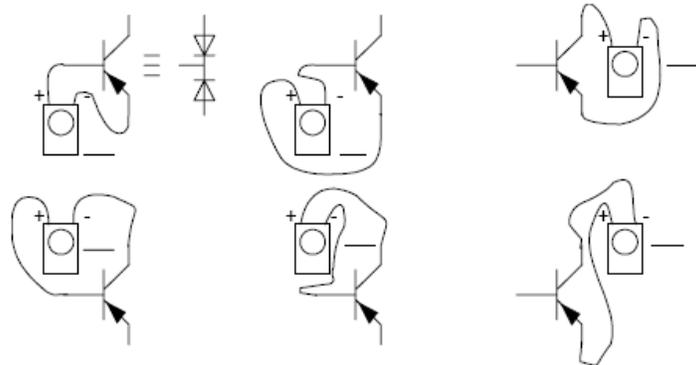
#### ***4.9 Test statique d'un transistor***

Le test peut se faire à l'aide d'un ohmmètre ou mieux avec un vibreur électronique ou la position "test diode" d'un multimètre numérique. Le courant délivré par l'appareil ne doit pas dépasser quelques dizaines de microampères.

### 4.9.1 Test du transistor NPN



### 4.9.2 Test du transistor PNP



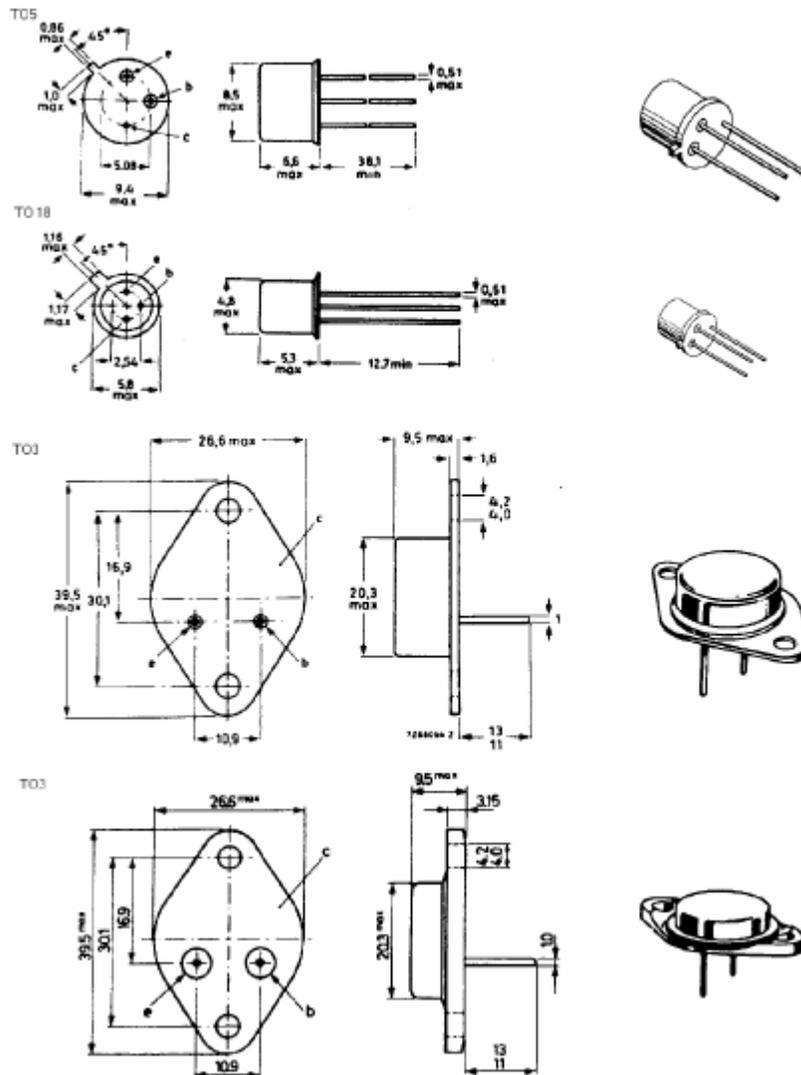
### 4.10 Identification des bornes

Le montage dans un circuit ou le test du transistor ne peut se faire si l'on ne peut identifier les bornes de base, collecteur et émetteur.

Le meilleur moyen d'identifier un transistor est de disposer du livre de données techniques d'un fabricant ou d'un lexique international.

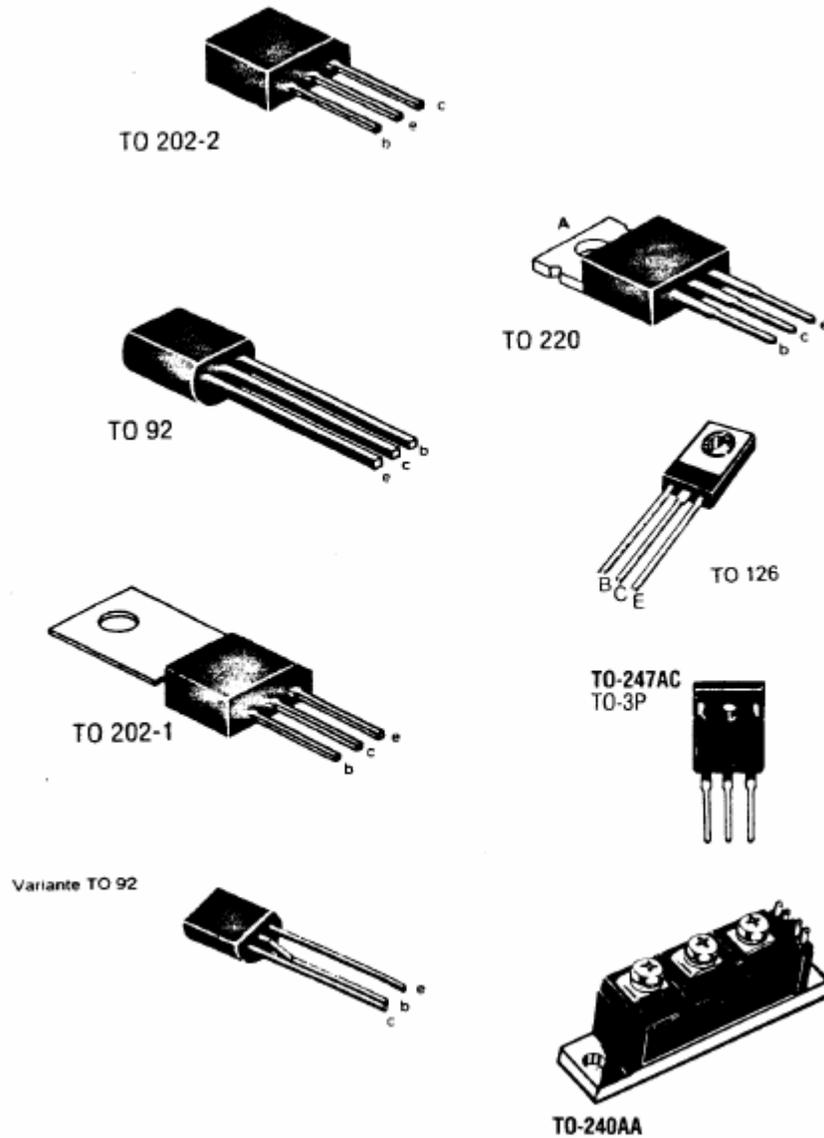
Les boîtiers les plus courants figurent ci-après.

#### 4.10.1 Les boîtiers métalliques



Attention : le collecteur des transistors à boîtier métallique est relié au boîtier. Un contact entre ce dernier et le châssis ou un point à la masse provoque un court-circuit.

### 7.10.2 Les boîtiers plastiques



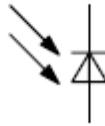
**Attention** : Les ailettes ou surfaces métalliques de fixation des transistors de puissance en boîtiers plastiques sont reliées au collecteur. Une fixation non isolée sur le châssis provoque un court-circuit.

## 5. La photodiode

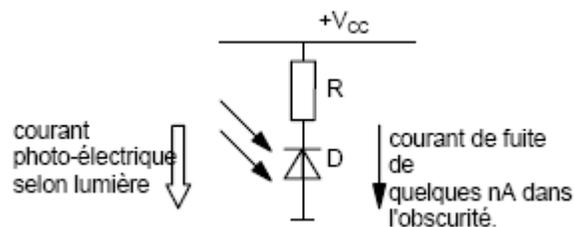
C'est le premier composant actif de l'optoélectronique que nous allons étudier. Il fonctionne comme une source de courant commandée par la lumière.

C'est une diode sur laquelle la lumière peut arriver jusqu'à la surface du silicium à travers une lentille (verre ou plastique).

## 5.1 Symbole



*Attention:* Cette diode se branche toujours en inverse, soit + du côté cathode (Zone N).



- Sans lumière: la diode est bloquée.
- Avec lumière: Les photons qui ont une énergie suffisante font passer des électrons en bande de conduction. Cet effet photoélectrique donne naissance à un courant qui va de la cathode à l'anode.

Le courant photoélectrique ou photovoltaïque est compris entre 10 et 30 nA/lx (lx = lux).

Une lumière ambiante extérieure se situe à environ 2000 lx, ce qui donne un courant entre 20 et 60  $\mu$ A selon les modèles de diodes.

Ces courants restent faibles et doivent être amplifiés par transistor ou mieux par un montage avec JFET ou amplificateur opérationnel.

## 5.2 Caractéristiques

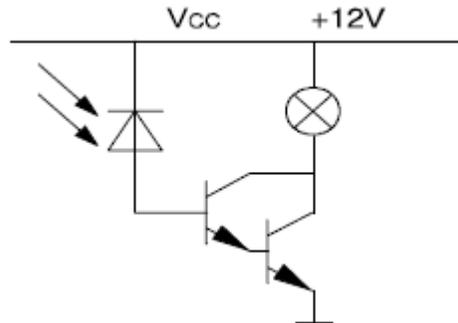
La tension inverse max. applicable varie entre 5 V et 50 V selon les modèles.

La sensibilité max. se situe entre 800 et 950 nm (domaine rouge et infrarouge proche).

Fréquence de fonctionnement pouvant atteindre 500 MHz.

### 5.3 Application

Lorsque la diode est soumise à la lumière, elle fournit un courant au transistor Darlington qui, en conduisant, peut allumer la lampe de signalisation.



On trouve des photodiodes dans les applications suivantes:

- Barrières lumineuses (Sécurité dans les banques)
- Comptage (Capteurs incrémentaux)
- Récepteurs à fibre optique
- Télécommande: radio-TV, verrouillage central des portes (récepteur)
- Transmission du son (récepteur)
- etc...

### 6. Le phototransistor

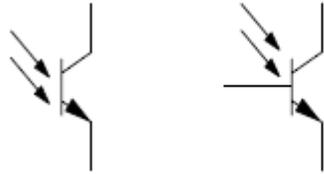
Comme pour la photodiode, son boîtier est transparent. La surface de la base est augmentée par rapport au transistor normal. La base est rendue aussi accessible que possible à la lumière incidente.

Les photons atteignent la jonction base-collecteur. Une tension positive apparaît à la base et le courant base-émetteur peut s'établir.

Le transistor devient conducteur sous l'influence de la lumière (infrarouge). Il peut donc être perturbé par la lumière du soleil selon la longueur d'onde à laquelle il travaille.

On peut trouver sur certains modèles une patte de base. On peut la raccorder électriquement pour ajuster la sensibilité du transistor.

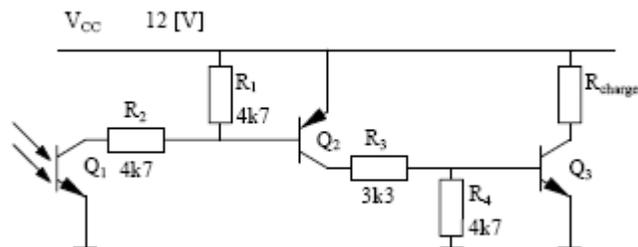
## 6.1 Symbole



## 6.2 Caractéristiques

- Courant  $I_C$  en obscurité: 100 nA
- Temps de commutation: 1 à 5 ms

## 6.3 Applications



Circuit équivalent à un relais à un contact de travail.

## 7 Les photocoupleurs ou optocoupleurs

### 7.1 Principe

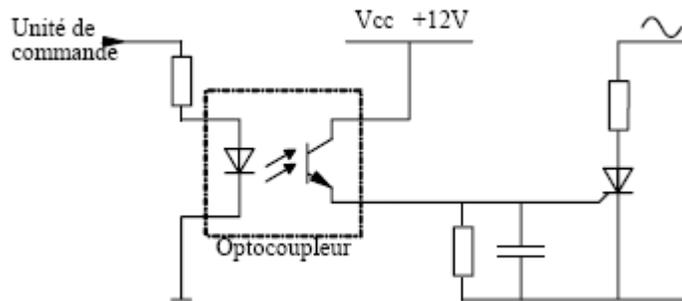
C'est la combinaison d'une LED et d'un photodétecteur dans le même boîtier.

Alors que dans le transformateur, on transmet l'énergie par couplage magnétique sans couplage galvanique (pas de contact électrique entre primaire et secondaire), l'optocoupleur va transmettre l'information (LED allumée ou éteinte) sur le récepteur sans aucun contact électrique.

C'est pourquoi on les appelle aussi isolants optoélectroniques. La tension d'isolation est généralement de 5000 V.

## 7.2 Exemple d'application

Commande d'un thyristor

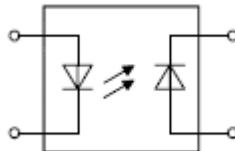


L'unité de commande peut être un système informatique. En cas de défaut du thyristor, la tension alternative peut détruire les composants reliés à la gâchette, mais elle ne peut pas remonter jusqu'à l'unité de commande.

## 7.3 Différents types

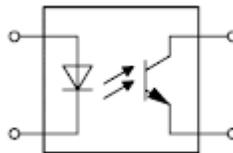
LED + Photodiode

Transmissions rapides jusqu'à 10 Mhz



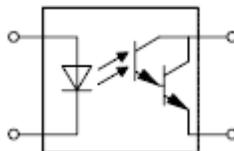
LED + Phototransistor

Transmissions jusqu'à 500 kHz



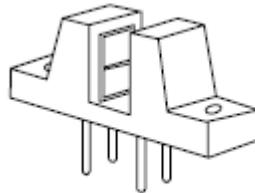
LED + Photodarlington

Transmissions lentes jusqu'à 30 kHz



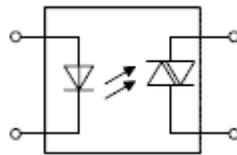
### Photocoupleur à fente

Le passage d'un disque à fente dans la zone du faisceau permet de connaître et de régler la vitesse de rotation ou de définir la position angulaire.



### LED + Phototriac

Associé à un triac de puissance, permet de commander des tensions alternatives 230 V par exemple.



## 7.4 Exemple d'application

