

Chapitre 2 : Les composants (suite)

par Pierre Cornélis, ON7PC rue J. Ballings, 88 1140 Bruxelles

Dans un document précédent nous avons vu

- 2.1. Les résistances*
- 2.2. Les condensateurs*
- 2.3. Les bobines*
- 2.4. Les transformateurs*

nous continuons maintenant avec les composants actifs, c'est à dire ceux qui nécessitent une tension d'alimentation en commençant par les diodes. Nous verrons ici aussi les transistors, les amplificateurs opérationnels, les circuits logiques, ...

2.5. Les diodes

2.5.1. Généralités

Un peu d'histoire : on a d'abord découvert l'onde radio, d'abord Maxwell d'une façon mathématique avec ses fameuses équations, puis Hertz de façon plus pratique avec des étincelles, et enfin Marconi de façon plus commerciale. Mais on pourrait dire que l'histoire de la radio commence avec la découverte de la diode... en effet, les premiers postes de radio n'utilisaient qu'un simple circuit accordé (bobine et condensateur) et une galène (c'est-à-dire du sulfure de plomb naturel, PbS). Avec une pointe métallique on recherchait alors avec la pointe l'endroit le plus favorable pour entendre la station désirée.

En 1883 Edison, invente la diode à vide (ou "valve"), il découvre qu'une cathode chauffée dans un tube où on a fait le vide s'entoure d'un nuage d'électrons. Si on place dans ce tube une "plaque", les électrons sont attirés vers celle-ci si elle est portée à un potentiel positif par rapport à la cathode, il circule alors un courant dans le tube.

En 1907, Lee de Forest a l'idée de placer entre la cathode et la "plaque", une plaque trouée ou "grille" pour contrôler le flux d'électrons et ainsi naît la triode....

Actuellement, il n'est plus question ni de galène, ni de diode à vide, mais bien de diodes semi-conductrices, elles se présentent sous formes de minuscule boîtier, muni de deux connexions métalliques (ou des fils) que l'on raccorde au circuit.

Dans ce paragraphe nous ne considérons que les diodes à semi-conducteur, mais il faut simplement savoir qu'à côté de ces diodes à semi-conducteurs il y a aussi les diodes à vides, les diodes à gaz, les diodes à vapeurs métalliques (diodes à vapeur de mercure) etc. ...

*Tous comme pour les galènes, les premières formes de diodes semi-conductrices étaient des **diodes à pointe**, un fil métallique était en contact avec une pastille de germanium.*

*Mais on peut aussi réaliser une **diode à jonction** en joignant une pastille de semi-conducteur du type n avec une pastille de semi-conducteur du type p.*

Les diodes qui servent à redresser le courant alternatif sont généralement plus grandes, certains modèles sont mêmes équipés d'un boulon afin d'être fixées sur un refroidisseur.

2.5.2. Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs présentent des propriétés physiques situées entre celles des conducteurs et celles des isolants.

En général les semi-conducteurs sont composés de **germanium** (dont le symbole chimique est **Ge**) ou de **silicium** (**Si**). Les semi-conducteurs sont caractérisés par le fait qu'ils ont 4 électrons de valence. Afin de contrôler les propriétés conductrices, on part d'un cristal de semi-conducteur très pur et on y ajoute des impuretés. Ce processus s'appelle de **dopage**.

Si un semi-conducteur est dopé avec un élément qui a plus que 4 électrons de valence, il y aura un électron libre et le semi-conducteur est dit du **type N**. Si le semi-conducteur est dopé avec un élément qui a moins de 4 électrons de valence, il y aura un électron libre manquant ou un trou excédentaire et le semi-conducteur est dit du **type P**. On n'utilise jamais un semi-conducteur à l'état pur, mais bien des "morceaux" de semi-conducteur du type N ou des "morceaux" de semi-conducteurs du type P.

Imaginons donc un semi-conducteur de type N, avec

- ses électrons libres majoritaires, et,
- ses trous liés¹

et un semi conducteur de type P avec

- ses trous libres majoritaires, et,
- ses électrons liés

Avant la formation de la jonction nous avons la situation de la figure a. A l'instant précis où on accole les deux morceaux de semi-conducteurs, les électrons libres du cristal N vont migrer et annuler les trous libres du cristal P (figure b).

De sorte qu'il se forme une zone sans porteur appelée **jonction** (figure c). La largeur de cette zone est de l'ordre de $1\mu^2$ soit 0,001 mm

Comme les charges liées n'interviennent pas dans les mécanismes, nous pouvons simplifier le dessin (figure d).

Le côté P de la diode est appelé **anode**, alors que le côté N est appelé **cathode**. Dans un usage normal, et dans un circuit, l'anode est connectée au côté positif de la source d'alimentation, la cathode est connectée au côté négatif.

Le courant passe de la cathode vers l'anode, c.-à-d. que l'excès d'électrons de la couche N circule vers la couche P qui possède des trous.

Les trous sont en fait des "vides d'électrons", c'est un emplacement qui manque pour y mettre un électron. Par conséquent un trou possède une charge positive égale, mais de signe contraire, à celle de l'électron.

Les électrons et les trous sont appelés les porteurs de charges parce qu'ils constituent le courant d'un côté à l'autre de la jonction.

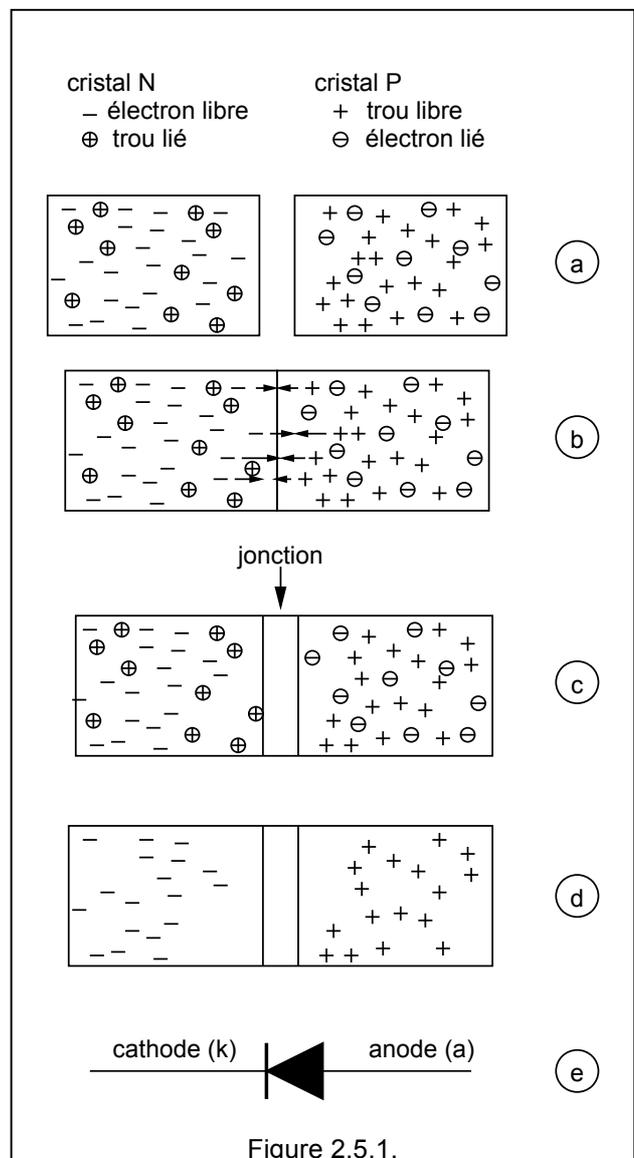


Figure 2.5.1.

¹ Les éléments liés sont indiqués par des cercles.

² Lire "un micron".

Lorsqu'on n'applique aucune tension à la jonction, la jonction entre les matériaux de type N et de type P agit comme une barrière qui empêche les porteurs de charges de voyager d'une couche à l'autre.

Par contre lorsqu'on applique une tension à une jonction, les porteurs de charges vont pouvoir traverser la barrière et la diode va conduire c.-à-d. que le courant va pouvoir passer au travers de la diode. Lorsque l'anode de la diode est portée à un potentiel positif par rapport à la cathode, les électrons sont attirés au travers de la barrière de potentiel de la couche N vers la couche P et vers la borne positive de la batterie. Comme les électrons voyagent au travers de la couche P, ils vont remplir certains trous et en laisser d'autres après leur passage, de telle sorte que les trous vont sembler se diriger dans l'autre sens vers la borne négative de la batterie. Lorsqu'une diode est connectée de cette manière, on dit qu'elle est polarisée dans le **sens passant**³.

Si les polarités de la batterie sont inversées, l'excès d'électrons dans la couche N est éloigné de la jonction par la borne positive de la batterie. De la même manière les trous de la couche P sont éloignés de la jonction par la borne négative de la batterie. Par conséquent les électrons ne pourront franchir la jonction et il n'y aura pas de courant dans la diode. Lorsque l'anode est connectée à la borne négative et que la cathode est raccordée à la borne positive, la diode ne conduit pas, on dit qu'elle est polarisée dans le **sens bloquant**.

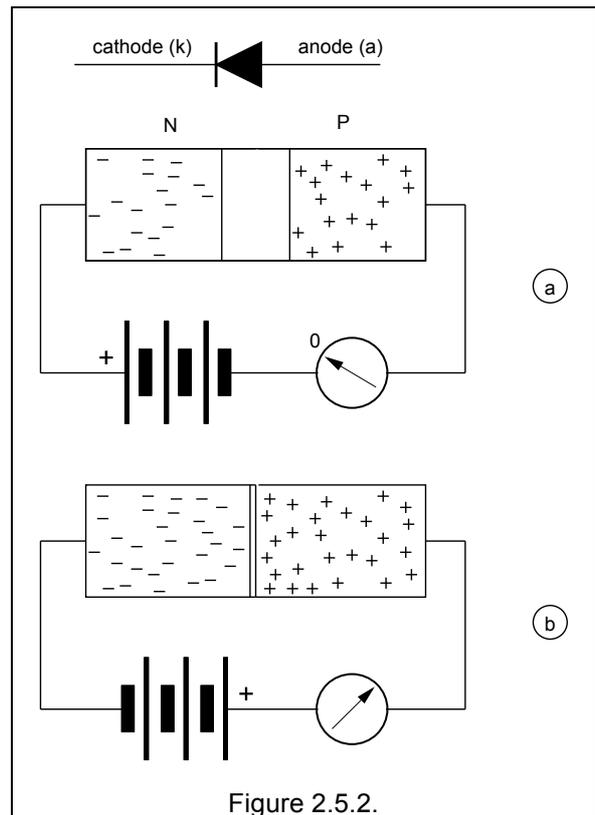


Figure 2.5.2.

On comprend maintenant que les diodes sont utilisées dans des circuits de redressement : ils ne permettent le passage que dans une seule direction. Lorsqu'un signal sinusoïdal est appliqué à la diode, la diode sera polarisée dans le sens passant pendant une alternance et dans le sens bloquant durant l'autre. Par conséquent le courant passera pendant une alternance et sera bloqué pendant l'autre. Le courant de sortie est un courant continu pulsé, mais le courant circule toujours dans la même direction.

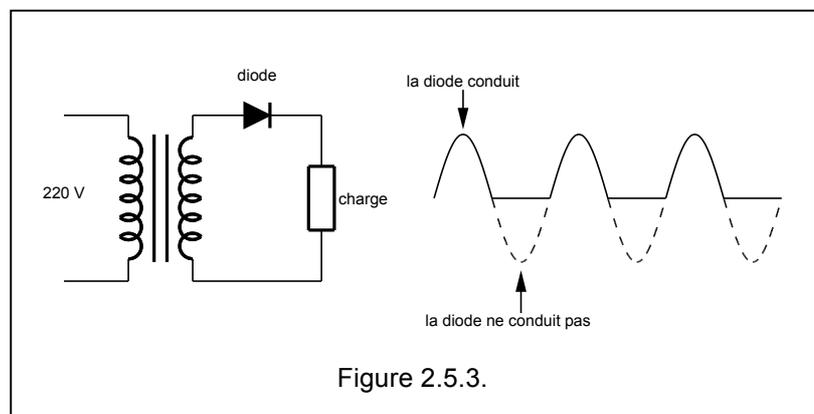
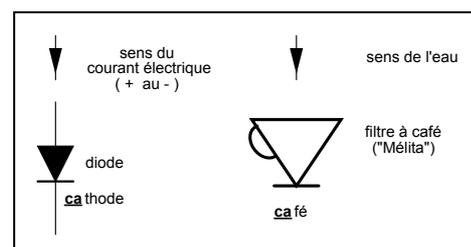


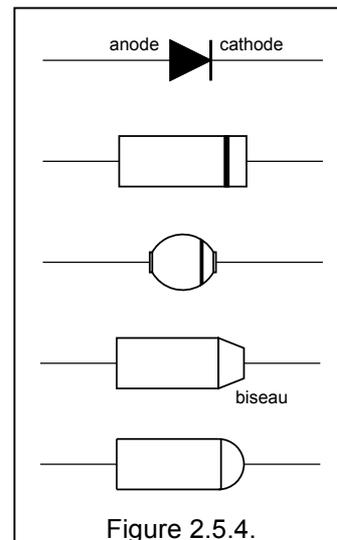
Figure 2.5.3.

³ Voici un moyen mnémotechnique pour retenir où est la cathode et dans quel sens la diode passe le courant ... c'est peut être idiot, mais ça peut servir !



Une diode est représentée par le symbole ci-contre. Sur le boîtier de la diode on trouve généralement un trait qui représente la cathode, mais il s'agit aussi parfois d'un biseau ou d'un côté arrondi.

On trouvera plus de détails sur la théorie des semi-conducteurs dans une annexe intitulée "Physique électronique et atomique"



2.5.3. Caractéristiques des diodes

Les diodes à jonction ont des tensions maximum et des courant maximum qu'il faut respecter si on ne veut pas les endommager (c.-à-d. les détruire).

La tension maximum est appelée **tension inverse** ou **peak inverse voltage (PIV)** : c'est la tension maximum que la diode supporte lorsqu'elle est dans le sens bloquant. Bien qu'une diode soit faite principalement pour laisser passer du courant, il y a des moments où elle sera polarisée dans le sens bloquant. La tension inverse que les diodes peuvent supporter va d'une centaine de volts à 1000 V et parfois beaucoup plus.

Dans le sens bloquant on remarque aussi que quelques électrons et trous sont formés par l'effet de la température. Ces électrons et ces trous produisent un très faible courant appelé **courant de fuite**. La valeur du courant de fuite dépend forcément de la température, puisque c'est elle qui en est l'origine. Si la tension inverse est trop grande, le courant de fuite augmente très vite et de façon pratiquement incontrôlable, ce courant peut alors produire la destruction de la diode. Le point où ce phénomène apparaît est appelé **point d'avalanche** et au delà de ce point on parle de la **zone d'avalanche**. Cette zone d'avalanche est mise à profit dans les diodes zéners (voir plus loin).

Le **courant maximum** que la diode peut supporter lorsqu'elle est polarisée dans le sens passant est également une caractéristique très importante de la diode. ce courant est de l'ordre de 100 mA pour les petites diodes utilisées pour détecter des signaux HF (voir plus loin) à des valeurs de 100 A et plus pour les circuits redresseurs industriels.

Le paramètre important est la **chute de tension dans le sens direct**, cette chute de tension dépend exclusivement du type de matériau, elle est de 0,6 à 0,7 V pour une diode au silicium et de l'ordre de 0,3 à 0,3V pour une diode au germanium.

Le dernier paramètre intéressant est la **puissance dissipable** c'est-à-dire la puissance que la diode peut dissiper, ainsi une diode appelée "signal diode" et destinée à détecter un signal modulé en amplitude ne sera traversée que par un très faible courant, disons 1 mA. La puissance dissipée est alors de 1 mA x 0,3 V soit 0,3 mW. Mais il faut encore pondérer ce facteur par le fait que le courant ne passe que pendant une alternance sur deux et que la modulation n'est pas toujours à son maximum. Par contre, dans un redresseur industriel, le courant peut atteindre 100 A il en résulte donc une puissance de 100 A x 0,6 V soit 60 W. Ici aussi le courant ne passe que pendant une fraction du temps (50% du temps).

2.5.4. Les fonctions des diodes

Dans les paragraphes précédent nous avons déjà évoqué quelques applications des diodes, nous allons y revenir plus en détails ici.

Les diodes peuvent être utilisées pour traiter des signaux faibles, pour supprimer une alternance d'un signal, pour charger un condensateur avec un signal alternatif, etc. ... ces diodes sont appelées des **diodes de signal**. Elles se présentent sous forme d'une minuscule ampoule de verre de 1 mm de diamètre et d'une longueur de 3 mm environ. Elles peuvent aussi se présenter dans un boîtier en plastic ou comme diode CMS (composant à montage de surface).

Les diodes sont aussi utilisées pour transformer un signal HF modulé en amplitude en signal audio de cette façon, nous pouvons écouter la radio par exemple (broadcast, onde moyenne), la diode réalise ainsi la fonction de **détection**.

Comme les diodes possèdent une courbe caractéristique courant-tension qui n'est pas linéaire, on peut les utiliser comme **diodes mélangeuses** dans les circuits à changement de fréquence.

Les diodes sont utilisées pour transformer le courant alternatif en courant continu (ou mieux dit, en courant unidirectionnel). On dit aussi qu'une diode *redresse* le courant alternatif. Les **diodes redresseuses** sont utilisées dans les alimentations, ces alimentations sont capables de débiter des courants de 100 mA à

plusieurs dizaines d'ampères voire plusieurs centaines d'ampères dans le cas des redresseurs industriels. Pour des valeurs de courant entre 1 et 10 A, ces diodes se présentent dans un boîtier en plastique de 2 à 5 mm de diamètre et d'une longueur de 5 à 15 mm. Pour des redresseurs à partir de 6 A, les diodes peuvent se présenter elle se présente dans un boîtier avec un boulon, ce qui permet de les monter sur un refroidisseur pour mieux évacuer la chaleur.

Il faut encore mentionner des **diodes de redressement haute tension** utilisées dans les téléviseurs et les oscilloscopes par exemples, et qui vont supporter jusque 30 kV par exemple. Afin de supporter de telles tensions les diodes sont constituées de plusieurs diodes mises en série. Un des problème consiste à éviter les claquages au travers de la poussière qui pourrait se déposer sur le corps de la diode.

2.5.5. Courbe caractéristique de la diode

1. Sans tension extérieure il existe, d'une part, un **courant de diffusion** I_d dû aux électrons et aux trous d'énergie suffisante pour remonter la barrière de potentiel. Mais d'autre part, il existe un **courant dû aux trous et aux électrons** I_s et engendré par l'agitation thermique et qui descend la barrière de potentiel. Donc sans tension, $I_d = I_s$

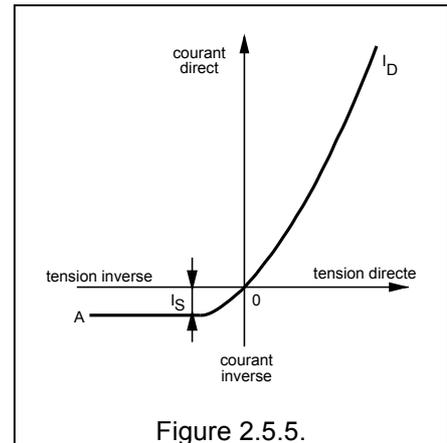


Figure 2.5.5.

2. Si nous appliquons une tension inverse, elle élèvera la barrière de potentiel, et diminuera I_d , et dès que I_d deviendra négligeable (sous quelques dixièmes de volts), le courant se réduit au courant d'agitation thermique I_s , et ce courant est indépendant de la tension... c'est ce qui explique la partie OA de la courbe caractéristique de la diode.

3. Si nous appliquons une tension directe, elle diminuera la barrière de potentiel et le courant de diffusion sera de $I_d = I_s \exp (e V / k T)$
avec $e =$ charge élémentaire de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C
 $k =$ constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/°K,
 $T =$ température absolue

Le courant total est égal à $I_d - I_s = \exp (e V / k T - 1) \approx \exp (e V / k T)$

Exemple pratique: Calculez le rapport I_d/I_s pour 17°C et pour une tension de 0,3 V ?

$$I_d/I_s = \exp (e V / k T) = \exp (1,6 \cdot 10^{-19} \times 0,3 / 1,38 \cdot 10^{-23} \times 290) = \exp (11,994) = 161781$$

Un bref retour en arrière pour comparer les courbes de diodes au germanium et au silicium :

	seuil	courant de fuite
Ge	≈ 0,3 V	plus grand
Si	≈ 0,7 V	plus petit

On peut aussi en déduire que si la température augmente, le seuil va diminuer et la courbe va "glisser" comme indiqué ci-contre.

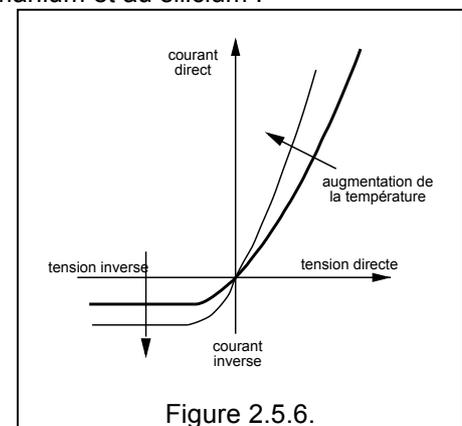


Figure 2.5.6.

2.5.6. Les types de diodes à semi-conducteurs

2.5.6.1. Les diodes à pointe⁴

Un cristal semi-conducteur est scié en disque de 1 mm d'épaisseur et il est soudé à l'étain sur un support métallique. Un fil de platine iridié, de tungstène-molybdène de 0,1 mm de diamètre forme la pointe, est appliqué sur le cristal et soudé, et une brève surintensité crée une jonction, en effet le fil diffuse alors des impuretés dans le cristal.

La capacité de la diode est très faible (de l'ordre du pF), et ces diodes sont principalement utilisées comme diodes détectrices en HF, VHF, UHF ou micro-ondes.

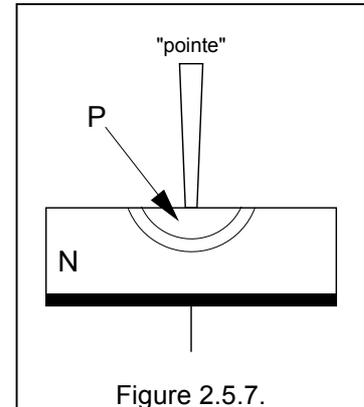


Figure 2.5.7.

Dans les montages radioamateur et d'électronique générale, les diodes à pointe les plus populaires sont

type	caractéristiques
AA119	30 V , 30 mA
OA95	90 V , 50 mA

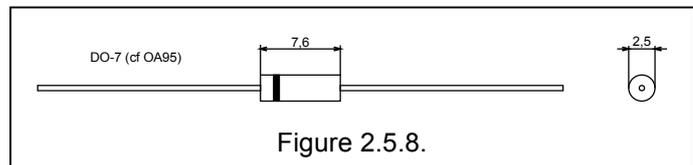


Figure 2.5.8.

La figure ci-contre donne les dimensions typiques de ces diodes. Voir note⁵.

La figure ci-contre représente une diode genre 1N23 utilisée dans les micro-ondes. C'est une diode à pointe dans un "support" un peu particulier.

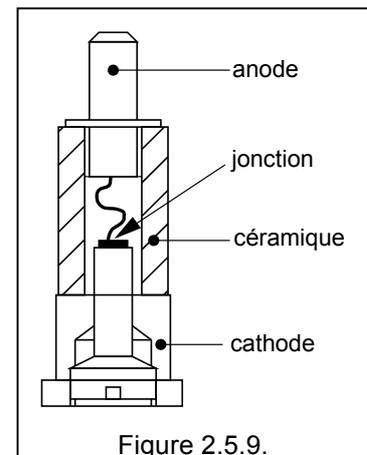


Figure 2.5.9.

⁴ C'est le type de diode qui ressemble le plus à la galène de nos grands-parents.

⁵ Il existe plus d'une centaine de fabricants de composants actifs et en particuliers de semi conducteurs. On a donc vu ces fabricants se réunir pour définir des normes, ce qui a donné lieu, e 1958, à la création du JEDEC (Join Electron Devices Engineering Council). Les boîtiers des diodes et des transistors ont ainsi été standardisés et sont désignés par des codes DO pour Diode Outline ou TO pou Transistor Outline. Nous donnerons dans la suite de ce cours quelques uns de ces boîtiers à titre d'information. Ceci n'entre pas dans le programme du cours HAREC.

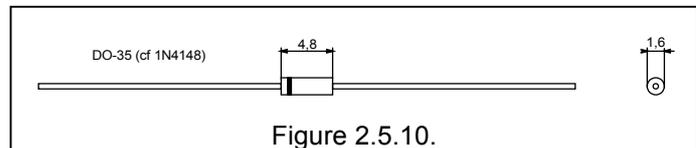
2.5.6.2. Les diodes à jonction pour faible signal

C'est la diode telle que nous l'avons déjà décrite au § 2.5.2. Mais il existe deux façons de réaliser des diodes à jonctions pour faibles signaux :

- Fabrication d'une diode à jonction par **alliage** : Prenons l'exemple d'une diode au germanium : on commence d'abord à préparer du germanium très pur, puis on le contamine à l'antimoine. On débite le monocristal en tablettes de 2 mm d'épaisseur. On place au-dessus de la tablette de semi-conducteur une bille d'indium, puis on chauffe le tout à 550 à 700 °C. L'indium diffuse dans le haut du cristal, qui passe du type n au type p, d'où formation d'une jonction.
- Fabrication d'une diode par **diffusion** : Les impuretés sont amenées en contacts de plaquettes de silicium de quelques dixièmes de millimètre, le tout est porté à une température de l'ordre de 1200° C, les impuretés diffusent vers l'intérieur du cristal, le procédé exige plusieurs heures pour une pénétration de quelques microns.

Dans les montages radioamateur et d'électronique générale, les diodes à jonction les plus populaires sont

type	caractéristiques
1N4148	75 V , 75 mA
1N4448	75 V , 200 mA



2.5.6.3. Les diodes de redressement

Nous en avons aussi déjà parlé ci-dessus. Les diodes de redressement se caractérisent par le fait que les courants supportés sont plus importants et la surface de la jonction PN est donc plus importante, en conséquence une diode de redressement est "plus grosse" qu'une diode pour les faibles signaux.

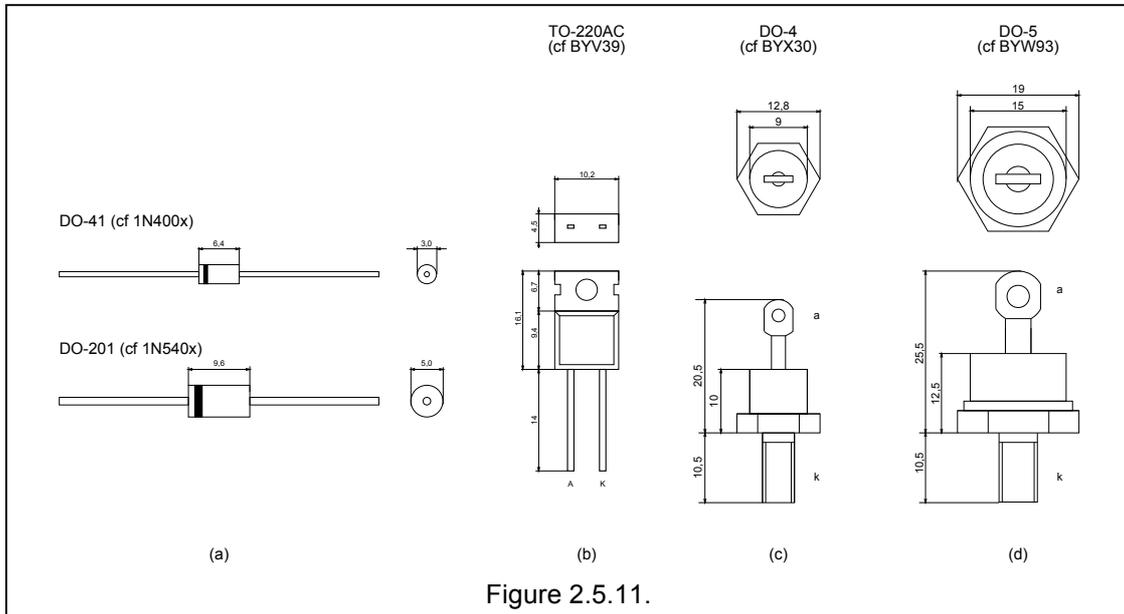


Figure 2.5.11.

On distingue plusieurs formes de boîtiers, d'abord

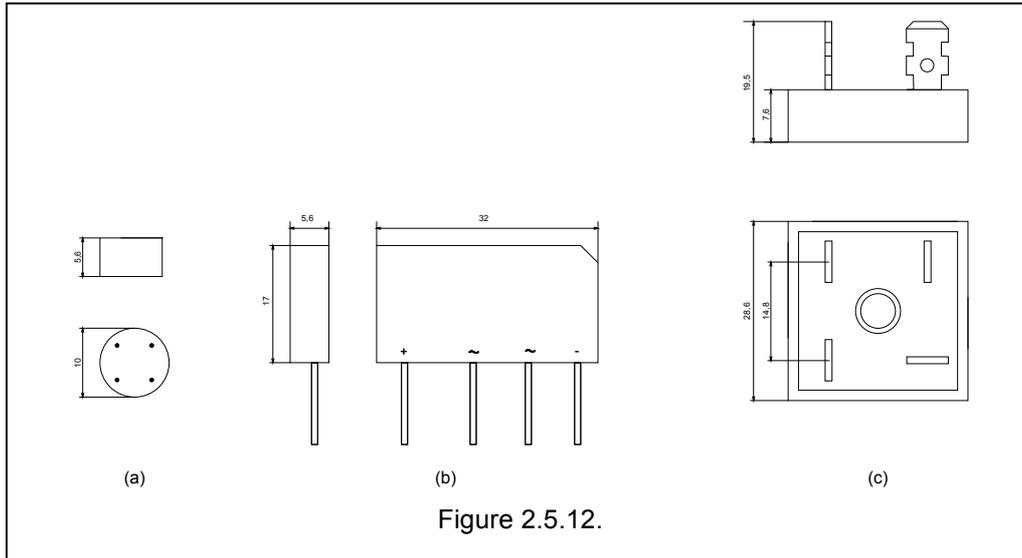
- une catégorie de 0,5 à 6 A, où les boîtiers sont en plastic,
- puis une catégorie de 2 à 10 A, où on trouve des boîtiers similaires aux TO-220 (cf les transistors),
- puis une catégorie 6 à 400 A, où les boîtiers sont métalliques et de la forme d'un boulon.

Sélection de quelques diodes de redressement très utilisées :

type	caractéristiques
1N4001	50 V, 1 A
1N4007	1000 V, 1 A
BYW96E	1000V, 3A
1N5401	100 V, 3 A
1N5408	1000V, 3 A
MR752	200 V, 6 A

2.5.6.4. Les diodes doubles et les ponts redresseurs

Comme nous le verrons plus loin (chapitre 3), dans certains montages redresseurs on utilise deux diodes (redresseur double alternance) ou quatre diodes (redresseur en pont) et par conséquent on trouve aussi deux diodes ou quatre diodes montées dans le même boîtier. Suivant la puissance (le courant) on trouve plusieurs modèles de boîtiers (cf figure ci-contre). Ces éléments simplifient le câblage et le montage.



Sélection des diodes doubles et des ponts redresseurs les plus employés

B250C1500R	250 Veff, 1,5A
B250C3700/2200	250 Veff, 3 A
B250C5000/3300	250 Veff, 5 A
B40C1500R	40 Veff, 1,5A
B40C3700/2200	40 Veff, 3 A
B40C5000/3300	40 Veff, 5 A
BY164	60 Veff, 0,5 A
BY179	280 Veff, 0,5 A
BYV34-500	double diode 500 V, 10 A
BYV42-200	double diode 200 V, 15 A

2.5.6.5. Les diodes zéners

Les diodes zéners forment une catégorie spéciale de diodes à jonction, qui sont utilisées dans le morceau de la caractéristique dite **zone d'avalanche**. Le matériau semi-conducteur est fortement dopé ce qui donne une jonction très fine. Une diode zéner est donc toujours utilisée dans le sens bloquant. La tension d'avalanche encore appelée **tension zéner**, peut être contrôlée lors de la fabrication et il existe des diodes zéners allant de 3 à 200 V environ. Les diodes zéners sont utilisées comme source de référence de tension ou comme stabilisateur de tension.

La figure ci-contre montre la courbe caractéristique d'une diode zéner. La tension zéner est ici de 8,2 V. Notez que les échelles de tensions en sens direct et inverse sont différentes.

Il existe plusieurs symboles pour représenter une zéner, le premier symbole (fig. a) est le plus courant.

Les diodes zéners existent pour des puissances de 250 mW à 50 W, elles sont montées dans le même genre de boîtier que les diodes de signal ou de redressement, et pour des dissipations de plus de 5 W, elles sont souvent montées sur un boîtier métallique et muni d'un boulon, qui sera fixé sur un refroidisseur.

Les diodes zéners ont un coefficient de température qui dépend de la tension:

- pour des tensions inférieures à 5V, le coefficient de température est négatif,
- pour des tensions de 5 à 6 V, le coefficient de température est nul,
- tandis que pour des tensions supérieures à 6 V, le coefficient de température est positif.

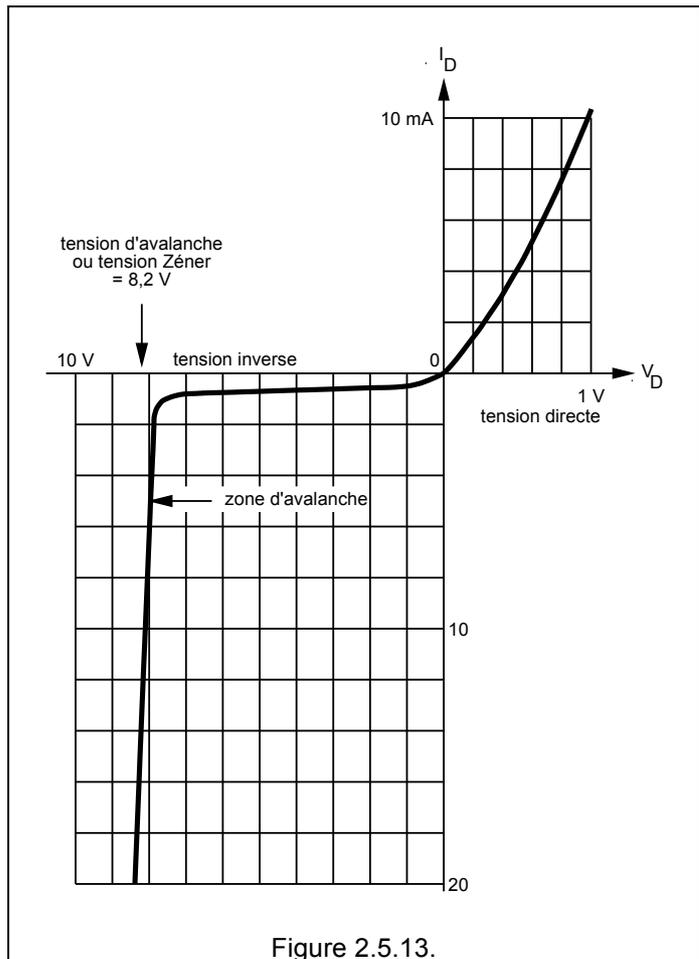


Figure 2.5.13.

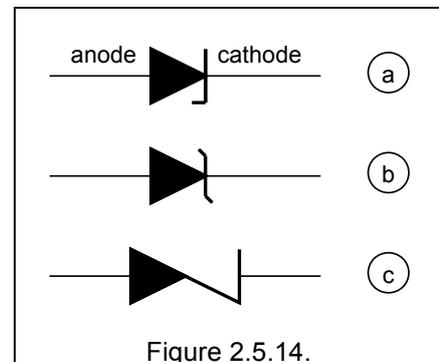


Figure 2.5.14.

Lorsqu'il faut construire une alimentation stabilisée dont la tension ne dépend pas de la température, il est conseillé d'utiliser des zéners de 6,2 V qui ont un coefficient de température presque nul.

Sélection de quelques types de diodes zéners les plus utilisées :

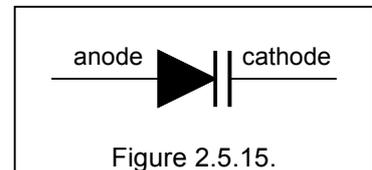
type	caractéristiques
BZD23-xx	2,5 W
BZT03-xx	3,25 W
BZV12, BZV13, BZV 14, 1N821	référence 6,5 V
BZV85-xx	1,3 W
BZW03-xx	6 W
BZX75-xx	400 mW
BZX79-xx	400 mW

Certains types de diodes zéners sont présentés en plusieurs valeurs de tension, c'est le "xx" à la fin de la désignation.

Des applications pratiques des diodes zéners seront vues au paragraphe des alimentations.

2.5.6.6. Les varicaps

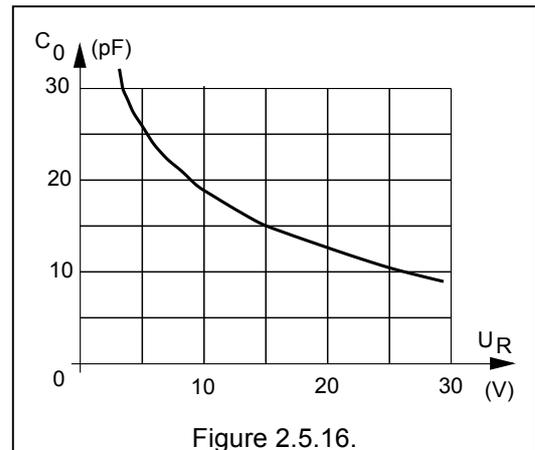
Rappelons qu'il se forme entre les couches N et P d'une diode, une zone neutre. Cette zone se comporte comme le diélectrique d'un condensateur et puisque la largeur de cette zone peut être modifiée par l'application d'une tension inverse, on pourra faire varier la capacité.



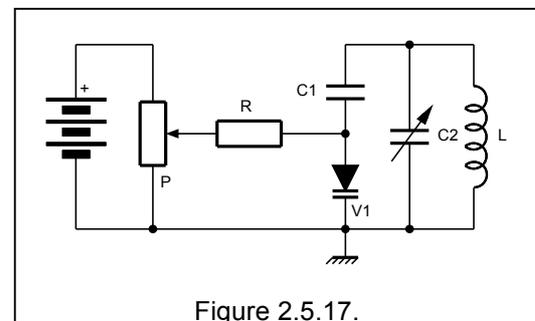
Une diode varicap s'utilise donc toujours dans le sens bloquant.

La varicap permet donc de remplacer un condensateur variable en éliminant du même coup tous les problèmes mécaniques qui y sont associés.

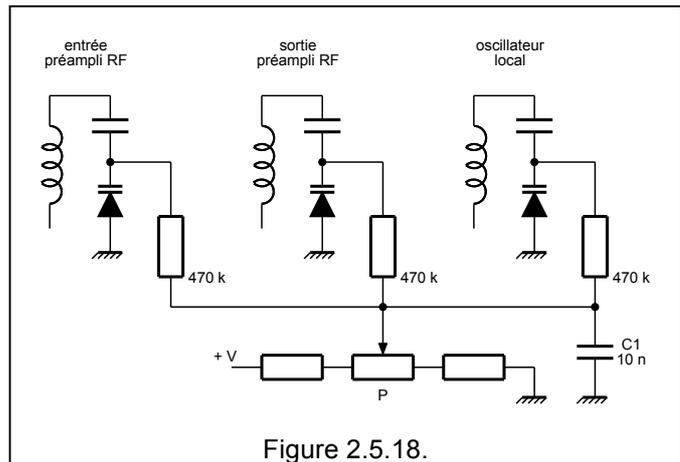
La figure ci-contre donne l'aspect de la variation de capacité en fonction de la tension. La capacité maximum d'une varicap varie de quelques pF à 150 pF maximum. Le rapport capacité maximum/capacité minimum est de l'ordre de 3/1. Le symbole de la diode varicap est donné ci-contre. L'aspect des diodes varicaps est semblable à celui des diodes pour faibles signaux.



La figure ci-contre représente le schéma d'une application pratique, grâce à un potentiomètre P, on peut créer une tension variable, le circuit HF se compose donc de L et de C2 et de la varicap, le condensateur C1 bloque le courant continu et évite que celui-ci ne soit court-circuité par la résistance de la self L. C1 aura donc une valeur bien supérieure à la valeur de la capacité de la varicap La résistance R évite que le circuit LC soit chargé par le potentiomètre, elle a une valeur de l'ordre de 10 à 100 k Ω

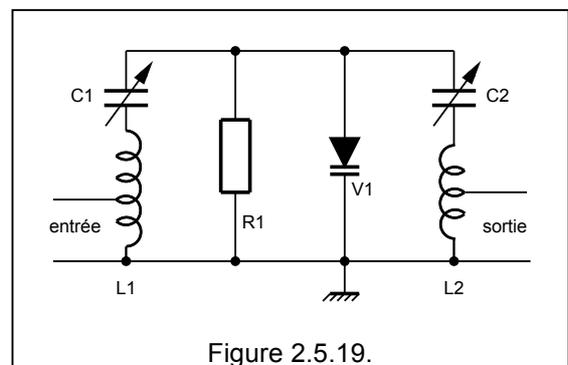


Un des avantages de la varicap est que l'on peut accorder plusieurs étages tels que le circuit d'entrée, l'amplificateur RF et l'oscillateur local simultanément grâce à une seule tension. Le schéma ci-contre montre un tel montage, mais nous n'avons représenté que le circuit accordé et non l'ensemble de l'amplificateur ou de l'oscillateur.

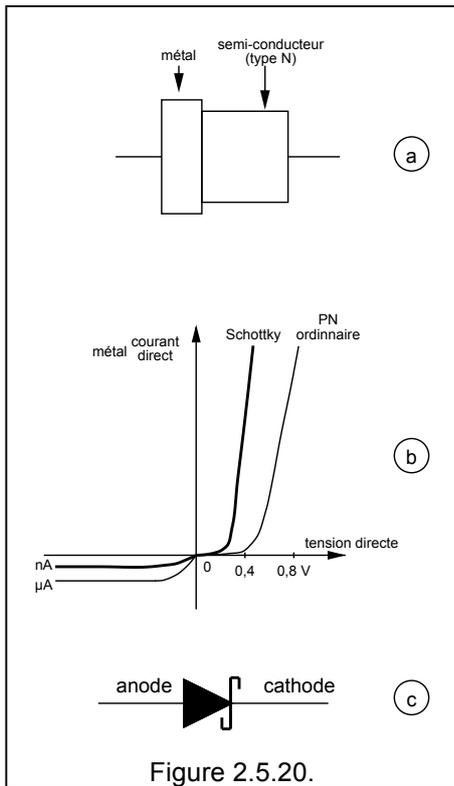


2.5.6.7. Les varactors

La diode varactor est fort semblable à une diode varicap. Un circuit typique d'utilisation est montré à la figure ci-contre. Le circuit d'entrée est composé de L_1 , C_1 , V_1 et le circuit de sortie est composé de L_2 , C_2 , V_1 et d'une résistance de polarisation R_1 . La polarisation apparaît lorsque la tension d'entrée rend la diode conductrice. Etant donné la caractéristique non linéaire de la diode, on retrouve des harmoniques dans le circuit secondaire.



2.5.6.8. Les diodes Schottky ou "hot carrier-diode"



Une diode Schottky est particulière en ce sens que nous n'avons pas une jonction entre deux semi-conducteurs, mais entre un métal (par exemple de l'Al) et un semi-conducteur (souvent du type N).

La tension de seuil est à peu près deux fois plus faible que pour une diode PN ordinaire et le courant de fuite est beaucoup plus faible (de l'ordre du nA, comparé au μA pour une diode PN ordinaire).

Son symbole est représenté à la fig. c.

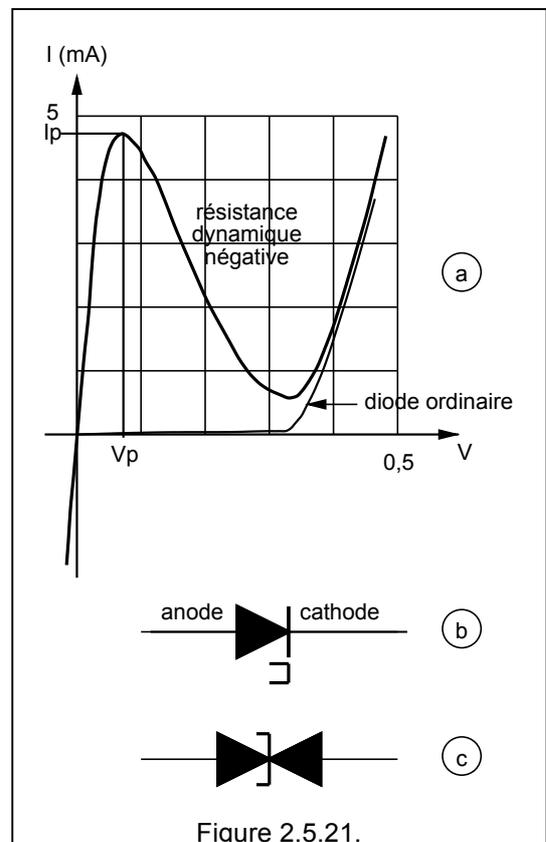
Elle offre d'excellente performance aux hautes fréquences, elle est utilisable jusque 50 GHz.

2.5.6.9. La diode tunnel ou la diode Gunn

La diode tunnel a été inventée par Esaki en 1963. Une diode tunnel possède une concentration en impuretés 10^5 à 10^6 fois plus grande qu'une diode ordinaire. Elle possède une résistance dynamique négative et fonctionne à des fréquences très élevées. La caractéristique d'une telle diode est montrée à la figure ci-contre.

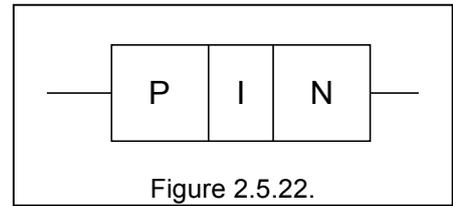
Les diodes tunnel encore appelées "diode Gunn" sont essentiellement utilisées comme oscillateur dans les circuits à micro-ondes, on l'utilise par exemple comme source pour les détecteurs de mouvements (ouvre portes).

La figure ci-contre donne les deux symboles pour une diode tunnel. Pour des applications générales ou $f < 1$ GHz, il existe toute la série 1N3712 à 1N3721.



2.5.6.10. Les diodes PIN

Une diode PIN est composée de 3 couches, une couche de semi-conducteur p, une couche de semi-conducteur n et entre les deux une couche de semi-conducteur pur ou 'i'. Le i signifie qu'il s'agit d'un semi-conducteur à conductibilité intrinsèque. Les caractéristiques de la diode PIN sont principalement fonction de l'épaisseur de cette couche i.

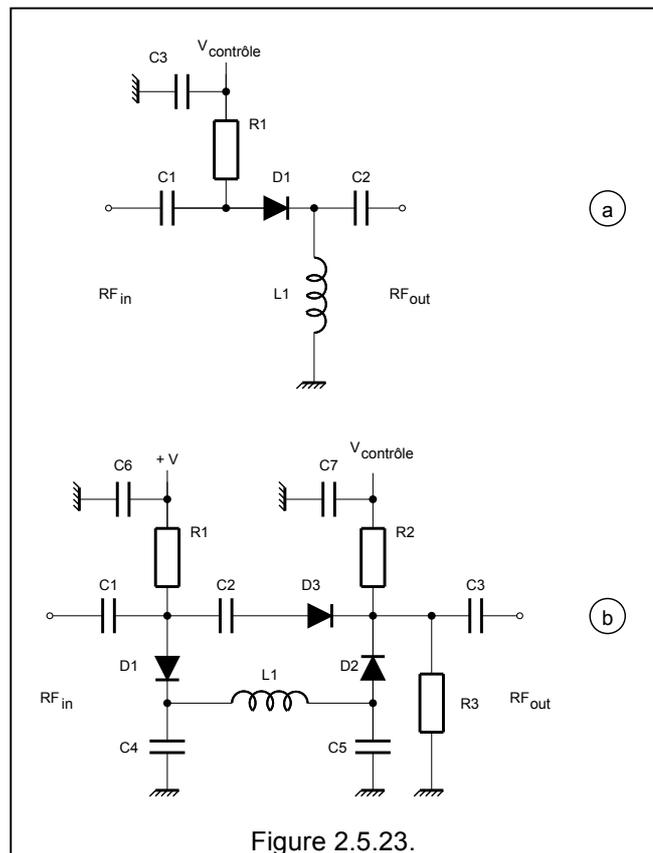


Les diodes PIN ont une résistance dans le sens direct qui varie inversement proportionnellement à la tension appliquée.

Lorsque la diode PIN est polarisée dans le sens bloquant, il n'y a pas de charge dans la zone i, et celle-ci peut être considérée comme un diélectrique à faibles pertes.

Les diodes PIN sont habituellement utilisées pour la commutation de signaux RF (figure a). Les diodes PIN sont plus rapides, plus petites et plus fiables que les commutateurs mécaniques.

Les diodes PIN peuvent aussi être utilisées comme atténuateur contrôlable par une tension. Un tel atténuateur a une plage de l'ordre de 20 dB.



2.5.6.11. Les diodes LED

Dans une diode, lorsqu'un électron se recombine avec un trou il y a production d'énergie. Dans certains matériaux cette énergie peut donner lieu à un photon dont la longueur d'onde dépendra précisément du matériau. Une jonction d'arséniure de gallium ou de phosphate de gallium, est ainsi d'émettre une lumière visible (rouge, vert, jaune, bleu) ou infrarouge.

La jonction est placée dans une coupelle qui sert de réflecteur (fig. ci-contre).

Puisqu'elles émettent de la lumière, le boîtier des LED est constitué d'une matière plastique transparente ou translucide. Ces diodes sont donc utilisées le sens direct, la chute de tension est variable selon le type de matériau, c.-à-d. selon la couleur.

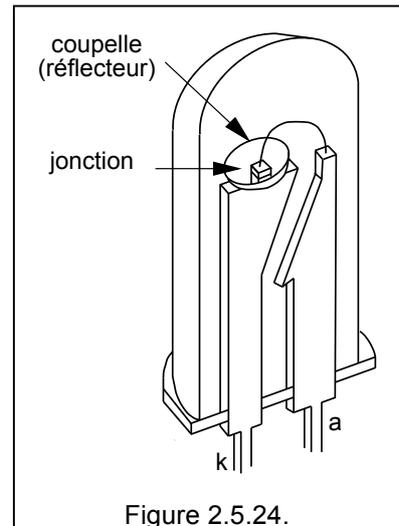


Figure 2.5.24.

		couleur	λ (nm)	tension
aluminum gallium arsenide	AlGaAs	rouge	650	1,75V
aluminum gallium phosphide	AlGaP	vert		
aluminum gallium indium phosphide	AlGaInP	haute luminosité rouge-orange, orange, jaune et vert		
gallium arsenide phosphide	GaAsP	jaune (orange)	590	2,1 V
gallium phosphide	GaP	vert	565	2,1 V
gallium nitride	GaN	vert très pur , bleu et blanc		
indium gallium nitride	InGaN	bleu, bleu-vert et (presque) ultraviolet		

Pour rappel : le spectre de la lumière :

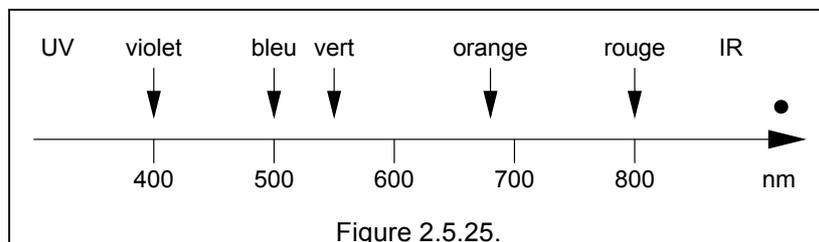


Figure 2.5.25.

Une LED produit une lumière monochromatique non cohérente⁶, c.-à-d que le son spectre de fréquences est centré autour d'une valeur mais que ce spectre a une certaine largeur.

Le mot LED signifie **Light Emitting Diode**, dans la littérature en français on trouve parfois le terme DEL pour Diode ElectroLuminescente. Les diodes LED sont utilisées dans le sens passant.

Les LED sont fort employées comme indicateur, comme témoin de présence de tension, etc. Les modèles les plus courants ont un diamètre de 3 mm et de 5 mm. Outre ces deux dimensions standards, il existe aussi des "jumbo leds" d'un diamètre de 20 mm.

Généralement les longueurs des fils de connexions sont inégales : le fil le plus long est long est l'anode et va au pôle positif.

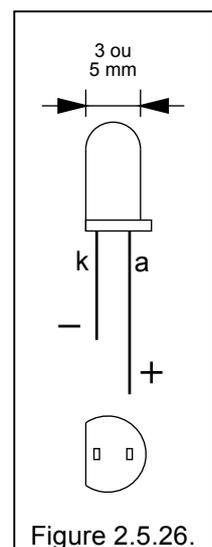


Figure 2.5.26.

⁶ Au contraire d'un laser qui émet une lumière monochromatique cohérente

Une LED normale doit être parcourue par un courant de 5 à 20 mA pour produire une lumière nominale. Il existe toutefois des LED à haut rendement qui donnent leur pleine lumière sous un courant de 1 mA.

La figure a ci-contre montre l'utilisation en courant continu. Notez l'anode qui va au pôle positif. La résistance en série se calcule simplement par la loi d'Ohm : $R = (E - U_{LED}) / I_{LED}$

Si on a besoin de plus de puissance lumineuse on peut mettre plusieurs LED en série (figure b).

La figure c montre l'utilisation en courant alternatif. Sans la diode D2 (diode ordinaire genre 1N4007), la diode LED sera polarisée par une tension très importante en sens inverse et sera immédiatement détruite.

Mais on peut aussi mettre deux LEDs en tête bêche comme indiqué à la figure d. La réactance du condensateur C va limiter le courant, la résistance R va limiter le courant de pointe à la mise en marche et sert également, le cas échéant, de fusible. Typiquement pour 240 V et pour un courant de 20 mA, $R = 1 \text{ k}\Omega / 1 \text{ W}$ et $C = 0,22 \mu\text{F}$ et doit supporter 450V.

On peut aussi placer plusieurs groupes de deux LED sans changer la valeur de R et de C (figure e). On peut ainsi faire des chaînes jusqu'à 28 groupes de deux LED.

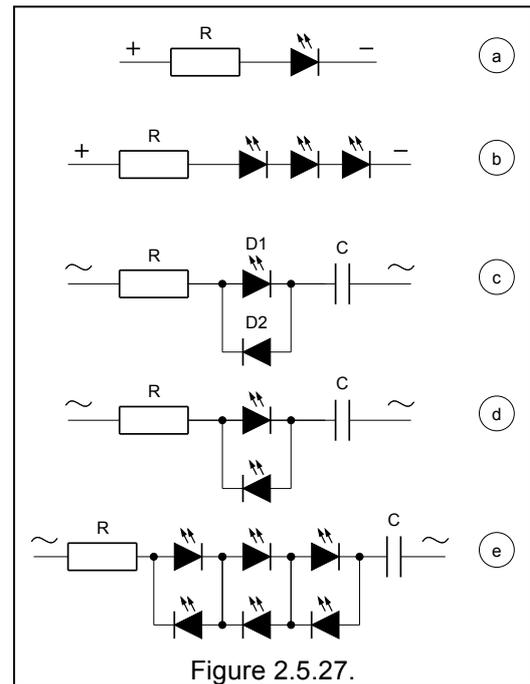


Figure 2.5.27.

Il existe des **LED bicolores**:

- soit à 3 broches : une électrode (cathode ou anode) commune, un fil de connexion pour le rouge et un fil de connexion pour le vert,
- soit deux diodes montées tête bêche, les polarités appliquées détermineront alors la couleur.

Les LED peuvent aussi être montées de façon à réaliser des **afficheurs 7 segments**. Ces segments sont dénommés a, b, c, d, e, f et g. De plus il y a un point décimal dp. On trouve des afficheurs 7 segments

- de taille différentes, typiquement 7, 10, 13,5, 20, or 25 millimètres
- en vert ou en rouge ou en orange
- avec cathode commune ou avec anode commune

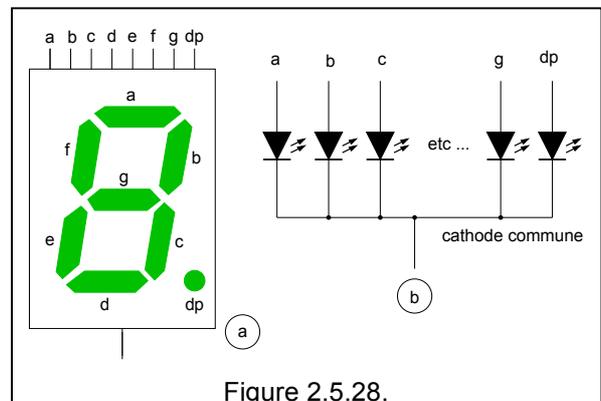


Figure 2.5.28.

L'usage typique est celui du voltmètre et celui du fréquencemètre dans lesquels on utilise plusieurs afficheurs 7 segments avec système de multiplexage où toutes les anodes de même type (tous les "a", tous les "b", ...) sont connectés ensemble et où on adresse séparément les cathodes (ou les anodes) communes.

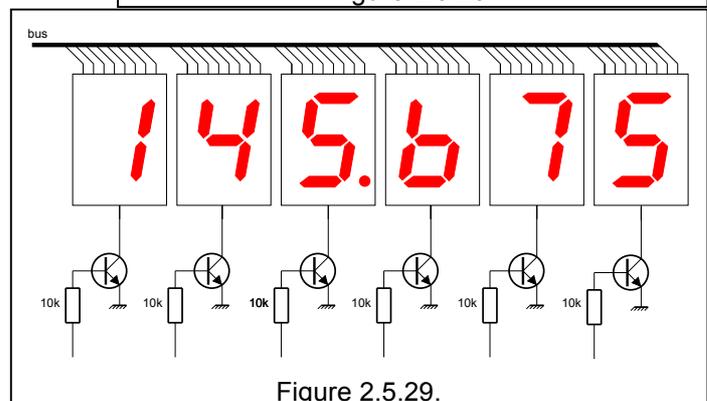


Figure 2.5.29.

Circuits connexes :

Des circuits intégrés tels que le 4511 (CMOS) permettent de recevoir un nombre binaire (BCD) et de le décoder en 7 segments, c-à-d que la sortie du 4511 peut attaquer un afficheur 7 segments.

Notons qu'il existe aussi des afficheurs LCD (Liquid Crystal Display) qui consomment moins de puissance mais ne sont pas visible dans l'obscurité, à moins d'un rétro éclairage.

Les **LED UV** (ultra violet, c-à-d avec $350 < \lambda < 370$ nm) sont utilisées dans la lutte contre la contrefaçon. En plus du filigranes, de fils protecteurs, ... les billets de banque, les passeports et les cartes de banques sont dotées de zones qui deviennent fluorescente lorsqu'elles sont éclairées par de la lumière ultra violette.

Des LED UV dont $250 < \lambda < 270$ nm sont utilisées pour la désinfection et la stérilisation.

ATTENTION : la lumière ultraviolette peut endommager la vue, il est donc impératif de ne pas regarder directement ces sources de lumières.

Les **LED IR** (infra rouge, c-à-d avec $\lambda > 760$ nm) sont utilisées pour la transmission de données (par exemple la télécommande des appareils radio/tv/HiFi, ...)

Les LED IR sont également utilisées pour les systèmes de protection en particulier pour les détecteurs de passage. Ne voyant par la lumière le quidam va couper un faisceau lumineux qu'il ne peut pas voir et déclenchera un système d'alarme.

Les LED IR sont aussi utilisées pour la vision nocturne à l'aide de caméra. Les cellules de caméra sont en effet sensibles à la lumière infra rouge alors que notre oeil ne l'est plus. Dans les caméras de surveillance, par exemple, quelques LED IR placées autour de l'objectif permettent d'éclairer un sujet à une distance d'une dizaine de mètres. La caméra ne pouvant restituer les couleurs, l'image prise en IR sera donc restituée en noir et blanc.

Les **LED blanches** sont en fait des LED bleues (InGaN - GaN) recouvertes d'un phosphore qui émet de la lumière jaune. Cette lumière nous apparaît comme de la lumière blanche. Cette technologie est fort prometteuse et pourrait remplacer les lampes à incandescence ...

2.5.6.12. Les diodes génératrices de bruit

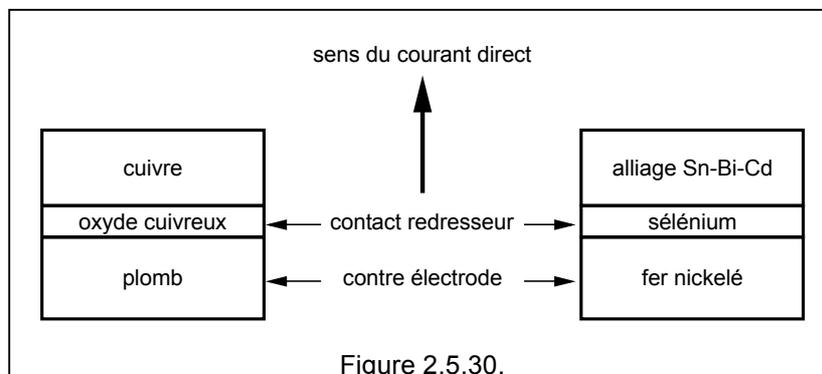
Certaines diodes sont construites de façon à contrôler le phénomène d'avalanche et peuvent être utilisées comme générateur de bruit.

Pour des fréquences jusqu'à 30 à 100 MHz on peut utiliser une diode zéner ordinaire polarisée dans sa zone d'avalanche. Une application typique est le pont de mesure de bruit (voir chapitre des mesures).

Pour des fréquences plus élevées (VHF, UHF et micro-ondes) il faut utiliser des diodes à avalanche spécialement adaptées pour ces fréquences.

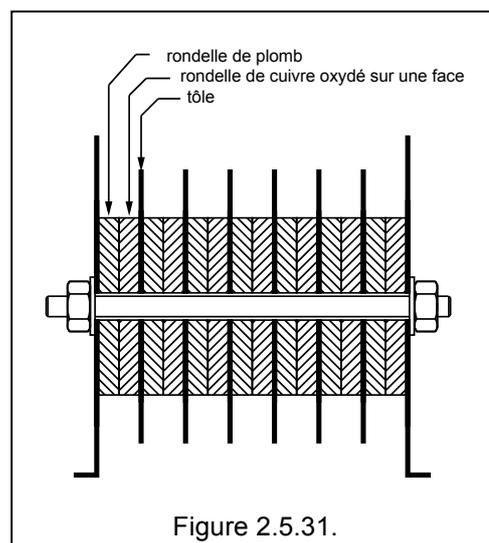
2.5.7. Les redresseurs à l'oxyde cuivreux et les redresseurs au sélénium⁷

La figure ci-dessous représente les deux types de redresseurs, le contact redresseur est généralement très mince.



Les "redresseurs secs", c-à-d les "redresseurs à l'oxyde cuivreux" et les "redresseurs au sélénium", ont été utilisés dans les années 1940 à 1960 principalement pour la charge des batteries et le redressement HT. Ce sont aussi des redresseurs semi-conducteurs. Ils ont un faible seuil de redressement (0,3 à 0,4 V pour le sélénium). Une cellule ne peut toutefois pas supporter plus de 6 V (20 V pour le sélénium) et la densité de courant est de 0,1 A/cm² (0,3 A/cm² pour le sélénium).

La figure ci-contre représente un redresseur avec 7 cellules. La tôle entre deux cellules joue également le rôle de refroidisseur. On peut aussi réaliser des montages plus complexes avec deux groupes de cellules pour réaliser un redresseur double alternance ou avec 4 groupes pour réaliser un montage en pont.



⁷ Karl Braun avait déjà découvert en 1874, qu'une plaque de fer recouverte d'une mince couche de sélénium ne laissait passer le courant que dans un seul sens.

2.6. Les transistors

2.6.1. Généralités

Il existe plusieurs types de transistors, chaque type

- les transistors à jonction bipolaire à jonction
- les transistors à effet de champs (et à jonction) JFET
- les transistors Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor ou MOSFET

2.6.2. Les transistors bipolaires à jonction

Le transistor à jonction fut découvert par J. Bardeen, W.H. Brattain et W.B. Shockley en 1948, mais la théorie du transistor à jonction ne fut élaborée qu'en 1949 par W.B. Shockley. Cette découverte fut une révolution qui succéda celle de la triode à vide en 1907.

Avant de lire ce qui suit il serait utile de relire le § 2.5.2. pour se souvenir de la diode !

Dans un transistor nous allons accoler 3 morceaux de semi-conducteur dopé. Les premiers transistors étaient au germanium, et partant d'une mince couche de semi-conducteur du type N⁸ (d'une épaisseur de 0,1 mm environ) y mettait deux "billes" d'indium de 1 mm de diamètre environ et on portait le tout à une température de l'ordre de 500 à 600 °C.

On a ainsi réalisé un transistor PNP, à jonction et par alliage, mais plus tard on a aussi réalisé des transistors NPN et plus tard encore d'autres techniques de fabrication ont été mises au point.

Un transistor pourrait donc être considéré comme deux jonctions PN dos à dos, mais cela n'est pas correct car deux diodes mises dos à dos ne forment pas un transistor, il y a, comme nous le verrons plus loin, des mécanismes électroniques qui nécessitent que ces jonctions soient extrêmement proches.

La figure ci-contre représente les symboles des transistors NPN et PNP⁹. Les trois couches sont appelées **émetteur**, **base** et **collecteur**, ces trois couches sont repérées par les lettres **E**, **B** et **C**.

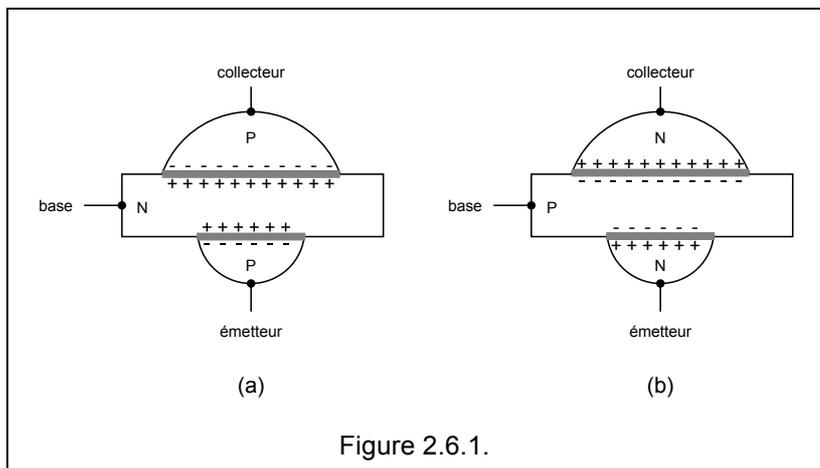


Figure 2.6.1.

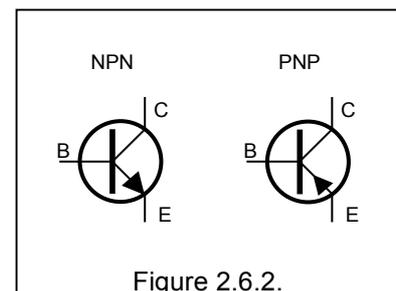


Figure 2.6.2.

⁸ C'est à dire avec des électrons libres et des trous liés ...

⁹ Moyen mnémotechnique dans un transistor PNP, le **N** est **eNtre** les deux P, par conséquent la flèche **eNtre** dans le transistor !

Reprenons notre premier schéma du transistor. Nous savons maintenant qu'il s'agit d'un transistor NPN, nous avons noté le nom des électrodes.

Dans un transistor bipolaire, la couche centrale est plus mince que les deux autres. Comme indiqué dans la figure, la polarisation directe de la jonction émetteur base produit le passage d'un courant d'électrons de la base vers l'émetteur, mais également d'un courant de trous de l'émetteur vers la base.

Figure 2.6.3.

Comme indiqué dans cette figure, le collecteur est raccordé à la borne négative par rapport à la base. En principe il ne circulera aucun courant dans la jonction base collecteur, puisqu'elle est polarisée en sens bloquant. Le collecteur possède maintenant un excès de trous à cause de ceux de l'émetteur qui ont traversé la base. Comme la source de tension connectée au collecteur produit une charge négative, les trous de l'émetteur vont être attirés par le collecteur.

La quantité de courant émetteur-collecteur est pratiquement proportionnelle au courant base-émetteur. A cause de la construction du transistor le courant de collecteur est sensiblement plus grand que le courant dans la base.

Lorsque la jonction base-émetteur d'un transistor est polarisée dans le sens passant, le courant du collecteur est proportionnel à la polarisation appliquée entre base et émetteur. Lorsque le courant de collecteur est à sa valeur maximum, on dit que le transistor est **saturé**. Une augmentation supplémentaire de la polarisation base-émetteur ne produira plus d'augmentation du courant collecteur. D'autre part si la jonction base-émetteur est polarisée dans le sens bloquant, il n'y a aucun courant dans le collecteur on dit que le transistor est **bloqué**.

Une **droite de charge** est une représentation graphique de la résistance du transistor pour un courant de collecteur qui varie entre la saturation et le blocage. En un point de cette droite le transistor présente une résistance infinie (le transistor est bloqué), à l'autre point le transistor a une résistance minimum (le transistor est saturé). Le transistor fonctionne en général sur un point situé entre ces deux extrêmes.

2.6.3. Caractéristiques des transistors bipolaires

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le courant au travers du collecteur est pratiquement égal au courant dans l'émetteur. Ceci est caractérisé par le **facteur alpha** du transistor :

$$\alpha = I_C / I_E$$

Ce facteur alpha vaut environ 0,92 à 0,98 pour la plupart des transistors.

Le rapport entre le courant de collecteur et le courant de base est appelé **gain en courant** ou **facteur beta** :

$$\beta = I_C / I_B$$

Si on mesure un courant de base de 1 mA et un courant de collecteur de 100 mA, on dira que le gain en courant ou facteur beta est de 100 ! Les transistors de puissance ont des gains en courant relativement faibles, tandis que certains transistors peuvent avoir des gains de plusieurs centaines.

Les transistors ont également une caractéristique qui indique comment ils se comporte en fonction de la fréquence, il s'agit de la **fréquence de coupure beta** et de la **fréquence de coupure alpha**, qui sont les fréquences auxquelles, ces facteurs n'ont plus que 0,707 x la valeur qu'ils avaient à 1 kHz.

Les transistors peuvent avoir différentes formes ou présentations, selon qu'il s'agit de transistors pour petits signaux, transistors de haute puissance, suivant qu'il s'agit de transistors pour basse fréquence ou pour haute fréquence. Les boîtiers dans lesquels ils sont montés présentent également toute une série d'aspects différents.

2.6.4. Fabrication des diodes et des transistors

2.6.4.1. Par alliage: On part par exemple d'un lingot de Ge N que l'on débite en petite lames de 0,1 mm et on pose deux billes d' In de 1 mm de diamètre environ, puis on porte le tout à une température de 500 à 600°C . L' In fond et de Ge tandis que le Ge N se transforme en Ge P autour des billes. C'est un procédé très ancien (1960).

2.6.4.2. Par diffusion: On part également de plaquette de l'ordre de 0,1 mm. Les impuretés sont mises en contact (soit via un liquide, soit sous forme gazeuse) à une température de 1200 °C. La diffusion exige plusieurs dizaines d'heures

2.6.4.3. Mesa:

2.6.4.4. Transistor planar:

2.6.4.5. Transistor épitaxial: L'épitaixie¹⁰ est une étape technologique consistant à faire croître du cristal sur du cristal. La technique consiste à utiliser un substrat comme germe cristallin de croissance et à faire croître la couche par un apport d'éléments constituant la nouvelle couche

¹⁰ Etymologiquement, "épi" signifie "sur" et "taxis", "arrangement"

2.6.5. Les caractéristiques du transistor

La première caractéristique à relever est celle de la jonction base-émetteur, on va donc faire varier la tension entre base et émetteur (V_{BE}) et mesurer le courant de base (I_B) qui y correspond. Nous retrouvons une courbe semblable à celle d'une diode.

Toutefois, nous n'explorons pas toute la courbe, nous n'allons pas jusqu'à des valeurs de 0,6 à 0,7 V, valeurs pour lesquelles une diode est normalement utilisée dans sa fonction de "redresseur". Ici nous nous limitons à 0,3 V environ. (zone hachurée de la fig. c).

La deuxième caractéristique est la relation entre le courant de collecteur (I_C) et la tension collecteur-émetteur (V_{CE}) qui y correspond. Ici les choses sont un peu plus compliquées puisque nous allons pouvoir relever cette courbe en fonction de différentes valeurs du courant de base (I_B).

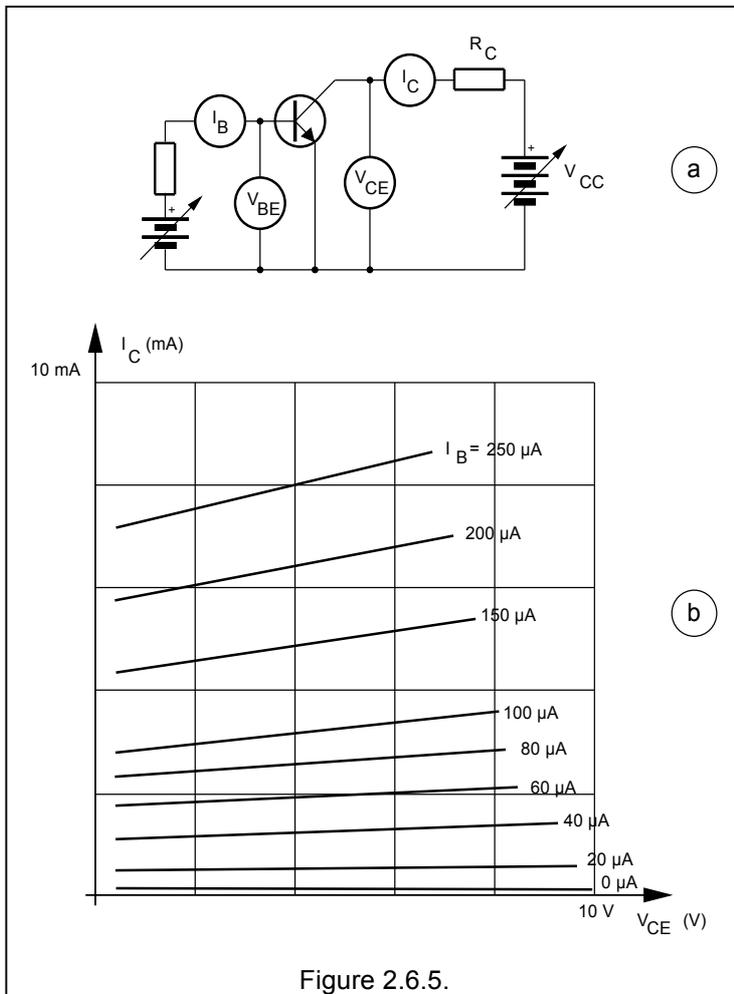
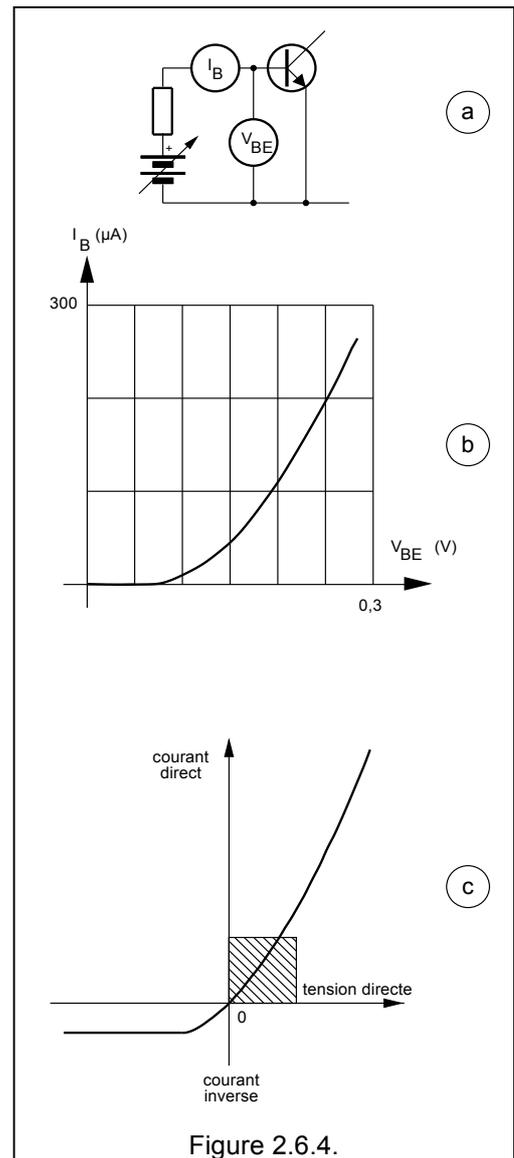
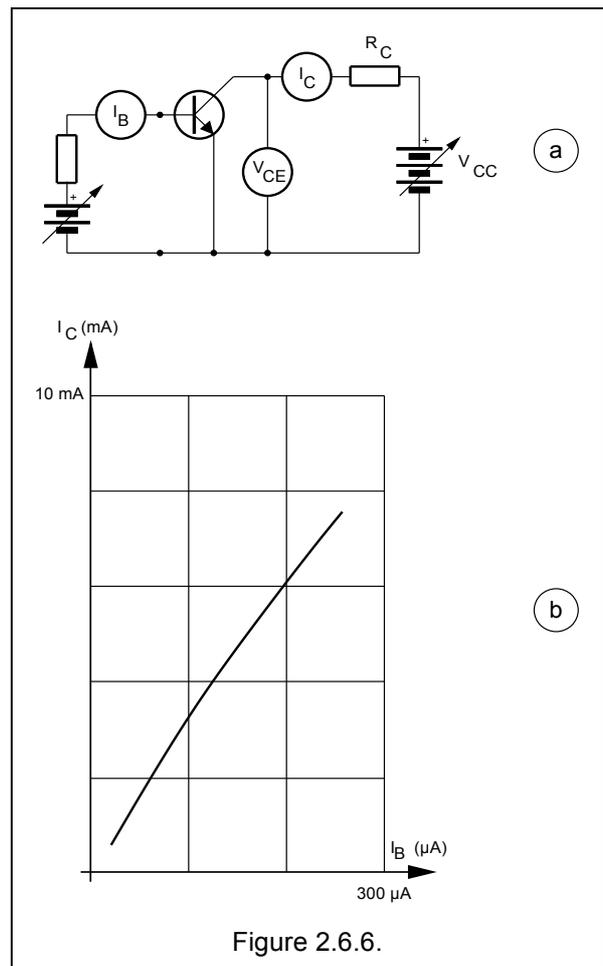


Figure 2.6.5.

La troisième caractéristique est la relation entre le courant de collecteur (I_C) et le courant de base (I_B). Cette caractéristique conduit à définir le gain en courant, nous avons dit que $\beta = I_C / I_B$ et cette courbe représente donc le β^{11} du transistor. Par exemple pour $I_B = 200 \mu A$ on a $I_C = 6 \text{ mA}$, le β vaut donc $6000 / 200 = 30$.



Mais en général ces caractéristiques ne sont pas données séparément, elles sont regroupées comme indiqué à la figure ci-dessous¹². Ces courbes sont données par les fabricants sous forme de "data-sheet"¹³.

Et nous utiliserons ces courbes au chapitre 3 pour montrer comment un transistor peut amplifier un signal.

¹¹ Ce paramètre est également appelé h_{FE} .

¹² Il y a eu quelques rotations !

¹³ Heureusement donc, il ne faudra pas les retracer pour chacune des applications ! Mais il est bon de savoir comment ces courbes ont été obtenues.

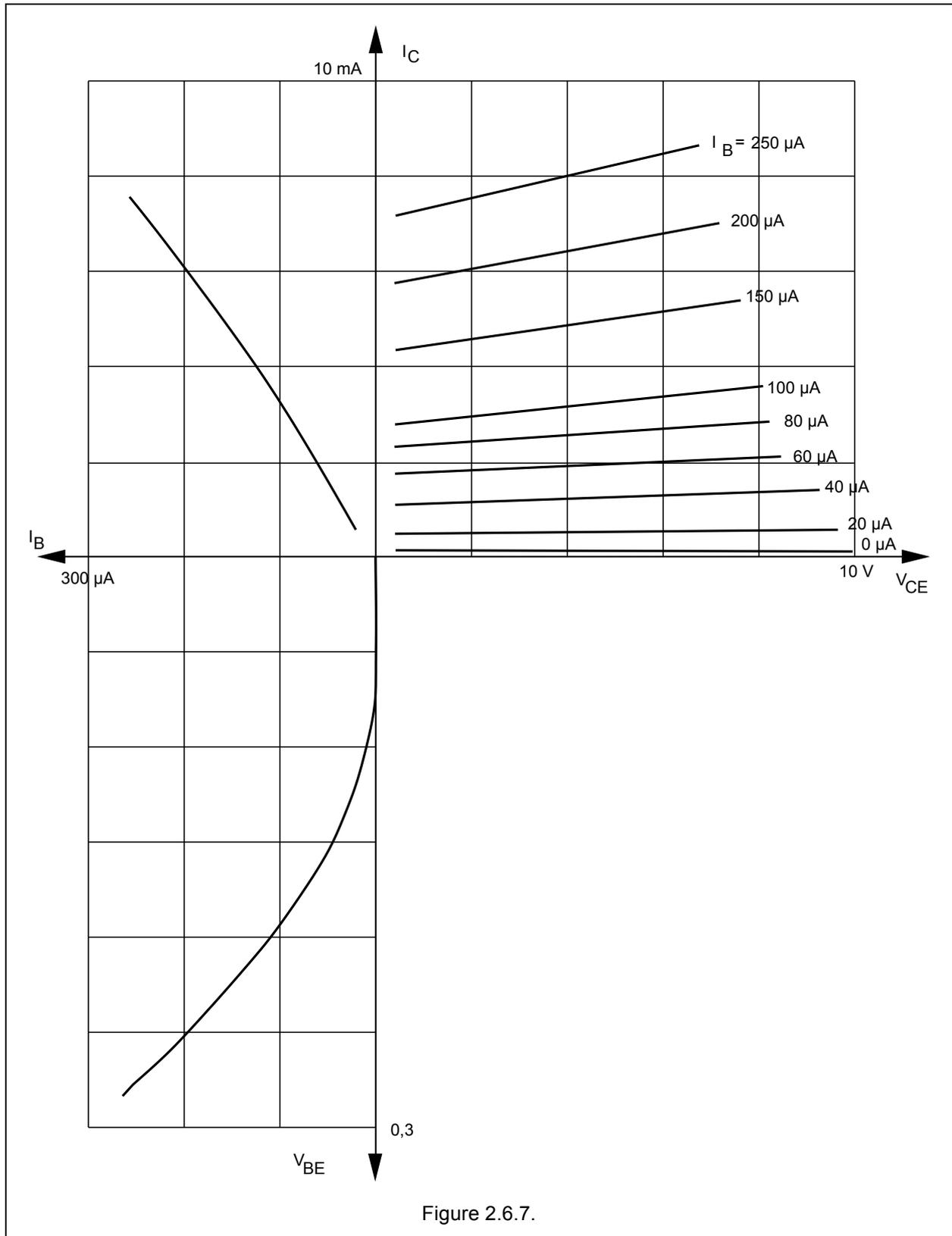


Figure 2.6.7.

Ces caractéristiques décrivent donc le transistor pour le régime statique, c'est à dire en courant continu.

Pour décrire le fonctionnement en courant alternatif, il faudrait y ajouter les valeurs des capacités inter-électrodes et¹⁴ la fréquence de coupure.

2.6.5. Les 3 montages amplificateurs

Un transistor possède 3 connexions, et dans un amplificateur nous aurons une entrée et une sortie, par conséquent une des électrodes (soit l'émetteur, soit la base soit le collecteur) sera une électrode commune. Dans un montage émetteur commun, on va appliquer le signal d'entrée entre la base et l'émetteur et on va recueillir le signal amplifié entre le collecteur et l'émetteur.

Le tableau ci-après montre les 3 montages possibles

Emetteur commun	Base commune	Collecteur commun
Fig. 2.6.8	Fig. 2.6.9.	Fig. 2.6.10.
On entre sur la base et on sort sur le collecteur	On entre sur l'émetteur et on sort sur le collecteur	On entre sur la base et on sort sur l'émetteur
Pour le courant alternatif, l'émetteur est à la masse par le condensateur de découplage d'émetteur (C2)		

Les caractéristiques de ces 3 montages sont résumées dans le tableau suivant :

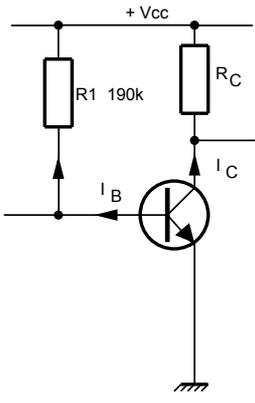
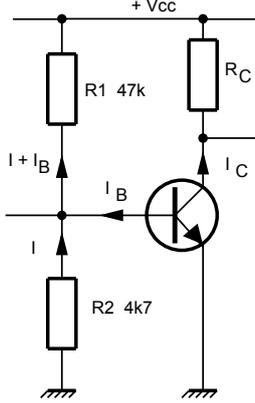
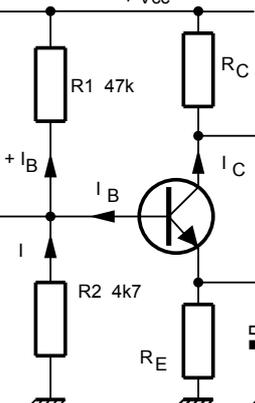
	EC	BC	CC
résistance d'entrée	moyenne (≈ 1kΩ)	faible (≈ 100Ω)	élevée (≈ 200 kΩ)
résistance de sortie	moyenne (≈ 30 kΩ)	élevée (≈ 1MΩ)	faible (≈ 200Ω)
gain en courant	élevé (10 à 100)	≈ 1	élevé
gain en tension	élevé	élevé	≈ 1
gain en puissance	élevé (20 à 35 dB)	moyen (≈ 20 dB)	faible (≈ 10 dB)
fréquence de coupure	faible	élevé	faible
Phase	inversion	pas d'inversion	pas d'inversion

Nous aurons l'occasion de revenir en détails sur ces 3 montages au § 3.5.5.

¹⁴ Surtout pour le comportement aux fréquences élevées, comme celles qui intéressent les radioamateurs ...

2.6.6. Les méthodes de polarisation

Dans la plupart des cas on souhaite qu'il y ait un courant de collecteur, même en absence de signal d'entrée. Pour ce faire il faut polariser le transistor. Il existe plusieurs méthodes de polarisation, parmi lesquelles :

Par simple résistance	Par pont de base	Par pont de base et résistance d'émetteur
		
Fig. 2.6.11.	Fig. 2.6.12.	Fig. 2.6.13.
<p>Si $I_C = 1,8 \text{ mA}$ et $\beta = 30$, alors on aura besoin d'un $I_B = 60 \mu\text{A}$ et par conséquent si $V_{CC} = 12 \text{ V}$, alors $R_B = 12 - 0,6 / 60 \mu\text{A} \approx 190 \text{ k}\Omega$</p>		

Mais nous verrons tout cela plus en détails au § 3.5.7. après avoir vu les classes d'amplifications et les problèmes de stabilité thermique.

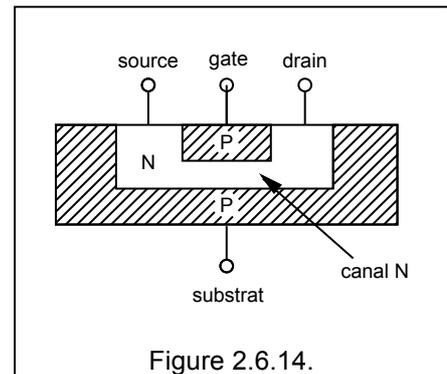
2.6.7. Les transistors à effet de champ à jonction (JFET)

L'effet de champ a été découvert en 1928 par Lilienfeld sur du sulfure de cuivre, mais les transistors à effet de champ n'ont pu être mis en oeuvre que vers 1960 .

Les transistors à effet de champ diffèrent des transistors bipolaires à jonction par le fait que le mécanisme de la conduction est géré par un champ électrique, alors que dans un transistor bipolaire le mécanisme de conduction est géré par le courant appliqué à la base.

La construction de base d'un transistor à jonction à effet de champ (**JFET ou Junction Field Effect Transistor**) est donnée à la figure ci-contre.

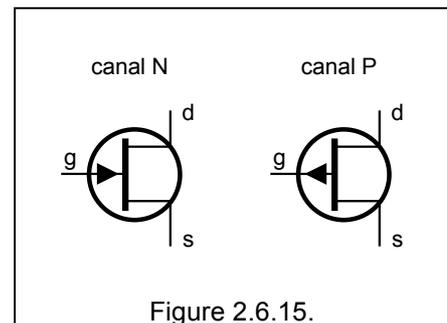
Le JFET peut être considéré comme un barreau de silicium qui agirait comme une résistance. La borne par laquelle les porteurs de charge entrent est appelée la **source**, la borne opposée est appelée **drain**. A l'aide d'un matériau semi-conducteur de l'autre type, on crée une jonction. Cette jonction constitue la **grille** ou **gâchette** (gate). On forme ainsi un **canal**.



En fait il existe deux types de JFET, le JFET à canal N et le JFET à canal P, selon le type de matériau utilisé pour le matériau qui forme le drain-source.

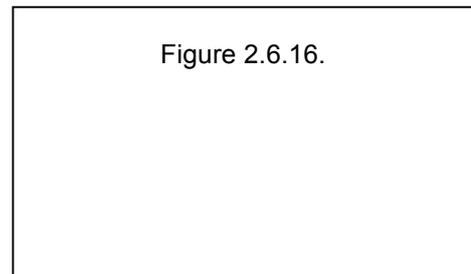
Les symboles des deux types de JFET sont donnés par la figure ci-contre.

Lorsqu'on applique une tension inverse sur la grille, le champ électrique créé dans le canal influence le passage des électrons et diminue celui-ci.



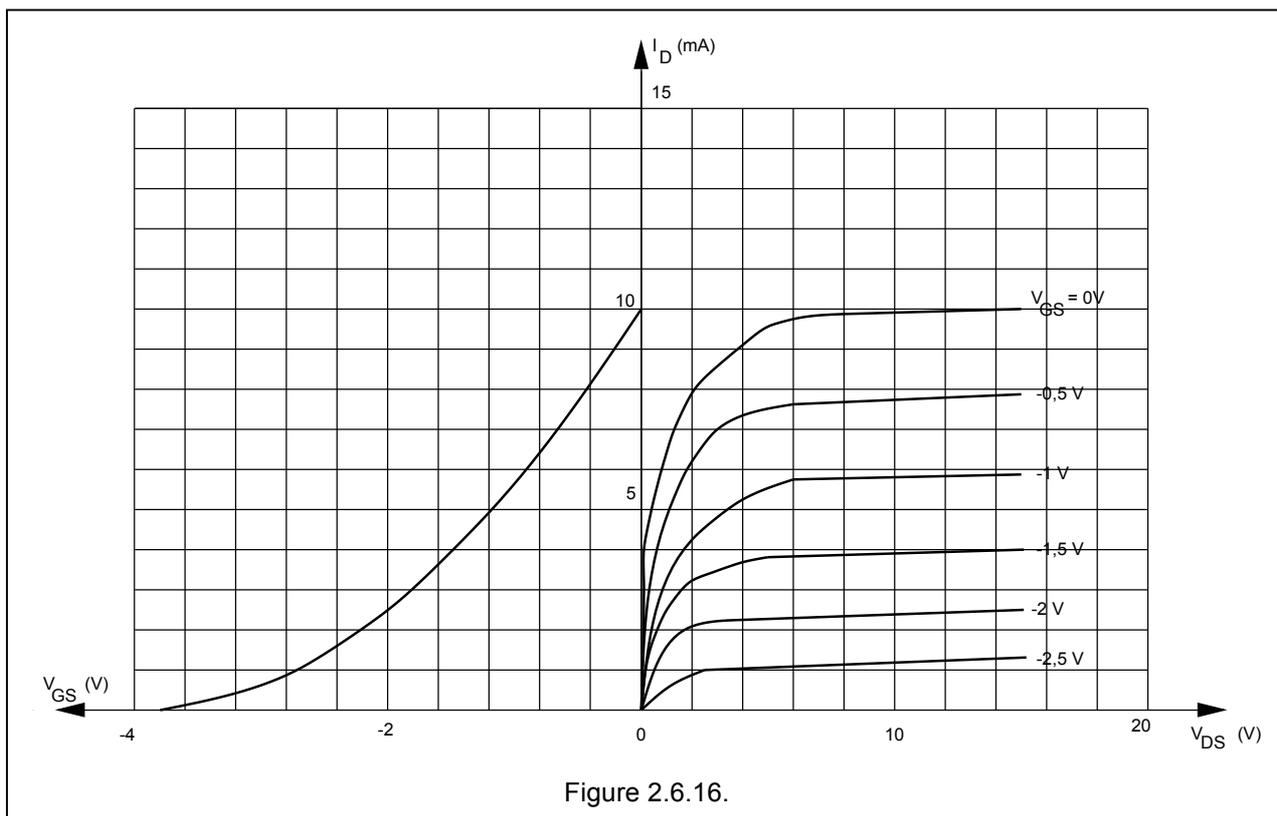
Considérons par exemple un semi-conducteur de type N, on y trouve trois régions

- la surface qui est chargée négativement ;
- une région de charge spatiale positive qui doit sa charge aux donneurs abandonnés par les électrons fixés par la surface ;
- une région neutre qui est le semi-conducteur N habituel, avec des donneurs ionisés, autant d'électrons libres et beaucoup moins de trous (porteurs minoritaires)



Le champ électrique interne E_i est perpendiculaire à la surface du semi-conducteur. Si on lui superpose un champ d'origine extérieure E , l'épaisseur de la couche de barrage augmente si E est dans le même sens que E_i et diminue dans le cas contraire. La section de la région conductrice varie donc avec le champ appliqué d'où la variation de la résistance du semi-conducteur.

Ici aussi, les courbes caractéristiques vont permettre de déterminer le fonctionnement du transistor. Par rapport au transistor bipolaire, la caractéristique d'entrée n'a plus de sens, puisqu'un transistor FET est commandé en tension et que le courant d'entrée est très faible.



2.6.8. Les transistors MOSFET

La construction de base d'un transistor **MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)** est donnée à la figure ci-contre. Dans un MOSFET, la grille est isolée du canal source-drain par une très fine couche¹⁵ diélectrique d'un oxyde de métal (d'où le nom). De ce fait l'impédance d'entrée est beaucoup plus élevée que dans les JFET ou que dans les transistors bipolaires. Ici aussi il existe des MOSFET à canal N et des MOSFET à canal P.

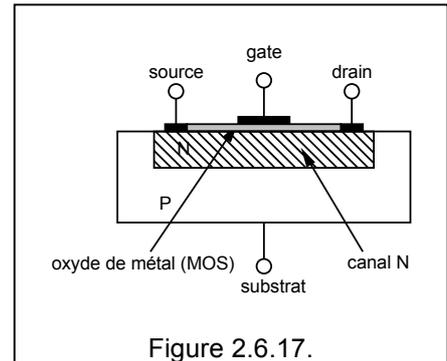


Figure 2.6.17.

Un transistor MOSFET peut être non conducteur avec une tension de grille nulle et être rendu conducteur à l'aide d'une tension positive. On dit alors que ce MOSFET est du type à enrichissement ("enhancement").

Mais on peut aussi doper le canal N de sorte qu'il soit conducteur même en absence de tension sur sa grille. On dit alors que ce MOSFET est du type à appauvrissement ("depletion" en anglais).

Le mode de fonctionnement (enrichissement ou appauvrissement) dépend donc du dopage ou non du canal. Généralement les MOSFET sont à enrichissement. Toutefois les GaAS FET et les doubles grilles (voir plus loin) sont à appauvrissement.

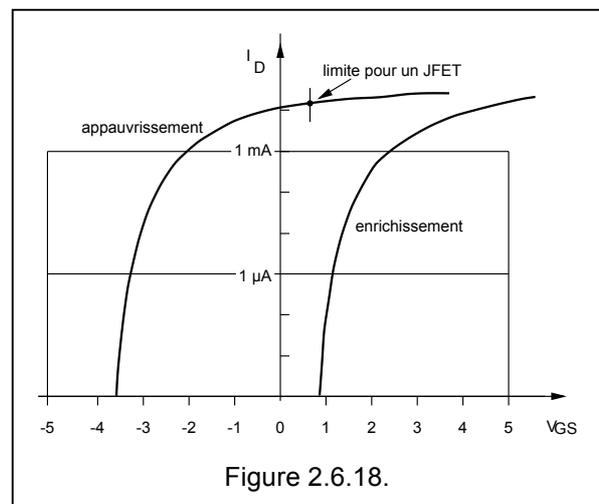


Figure 2.6.18.

On a ainsi 4 symboles pour représenter les MOSFET qui sont représentés par les figures c, d, e, et f , auxquelles nous devons ajouter les 2 symboles pour les JFET vus précédemment et le symbole pour le MOSFET double grille que nous verrons bientôt:

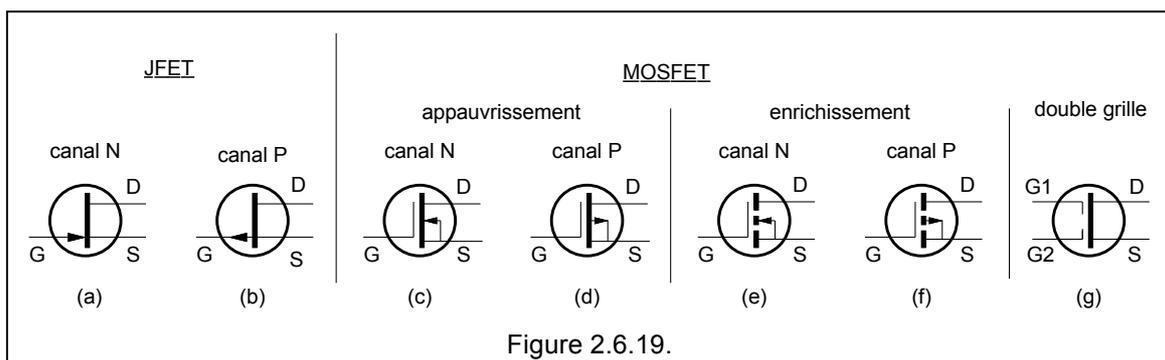
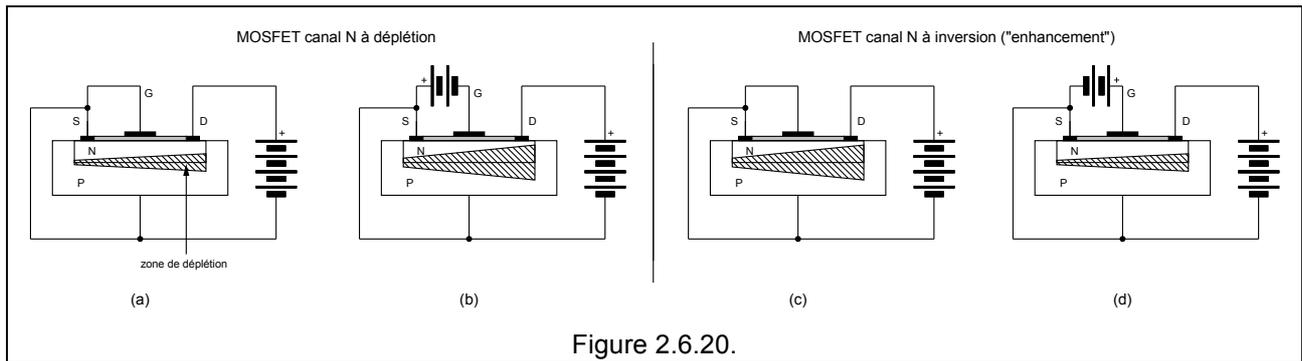


Figure 2.6.19.

Ici aussi il existe un moyen mnémotechnique pour se souvenir du sens de la flèche sur la grille : pour un canal **N** , la flèche **eNtre** dans le transistor MOSFET.

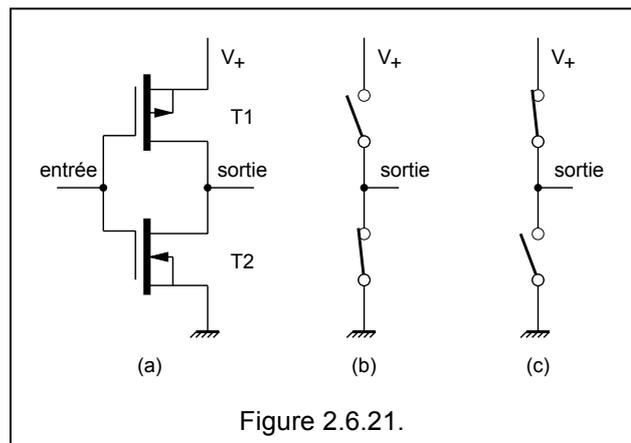
¹⁵ De l'ordre du nanomètre !



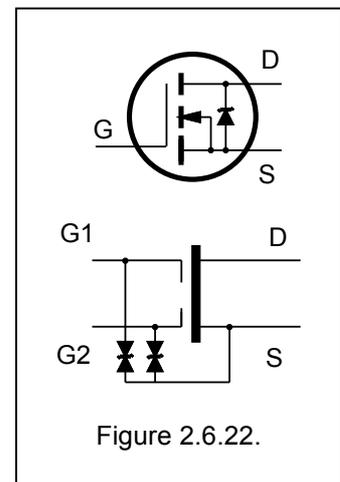
Dans certains circuits logiques un transistor MOSFET à canal P est associé à un transistor MOSFET à canal N, on dit alors qu'il s'agit d'un **transistor CMOS** (Complementary Metal-Oxide Semiconductor). L'avantage de ce système est une impédance de sortie faible que l'on soit dans l'état 1 ou dans l'état 0.

En effet, en fonction de la tension appliquée à l'entrée, soit T1 est bloqué et T2 est conducteur, (d'où le schéma équivalent simplifié de la figure b), soit l'inverse (figure c).

Cette structure est également la base d'une famille logique (famille 4000 et 74HCT ... : voir plus loin).

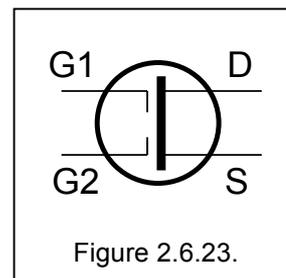


Pratiquement tous les MOSFET et les CMOS possèdent une protection interne contre les charges électrostatiques. En effet le diélectrique de la grille est tellement mince qu'une faible charge électrostatique conduirait à la destruction du MOS. C'est la raison pour laquelle les MOSFET et les CMOS sont équipés de diodes zéners de protection incorporées. Dans la pratique cela complique les schémas, et donc on ne représente pas nécessairement ces éléments de protection, sauf dans les data sheets.



2.6.9. Les transistors MOSFET à double grille

Les dual gate MOSFET ou MOSFET à double grille, sont donc des transistors MOSFET (donc sans jonction), où les grilles sont isolées du canal drain-source par une couche d'oxyde métallique ("MOS" Metal Oxyde Semiconductor). Mais ce qui les rend particuliers est leurs deux grilles, ce qui va permettre de contrôler le canal drain-source avec deux tensions différentes. Ceci est particulièrement intéressant par les circuits de contrôle automatique du gain (AGC ou CAG) et dans les circuits mélangeurs.



De manière simplifiée, le courant dans le drain est une fonction de la tension sur G1 multiplié par la tension sur G2.

La plupart des MOSFET à double grille travaille en mode appauvrissement ("depletion").

Il n'y a pas de règle absolue, mais généralement la grille qui est la plus proche du drain reçoit la polarisation fixe, et par conséquent la grille qui est la plus proche de la source drain reçoit le signal.

Dans les circuits de CAG, et avec les transistors classiques (bipolaires) la tension de contrôle a une influence dans l'impédance d'entrée du transistor, ce qui n'est pas le cas avec les MOSFET à double grille.

De plus comme la grille près du drain peut être mise à la masse (du point de vue alternatif), cette grille pourra jouer le rôle d'écran pour le drain, ce qui a pour résultat une très faible capacité de réaction (de l'ordre de 0,02 pf !).

Les gains en puissance sont de l'ordre de 15 à 20 dB, le facteur de bruit est de l'ordre de 3 à 5 dB et les fréquences d'utilisation vont jusqu'aux environ de 500 MHz.

En ce qui concerne les mélangeurs, un MOSFET à double grille se caractérise par un spectre particulièrement propre.

Le seul réel inconvénient est sa sensibilité aux charges statiques.

Ce qu'il faut surtout retenir c'est que

Un transistor bipolaire se commande en courant, son paramètre le plus important¹⁶ est le gain en courant β ou h_{FE}

Un transistor FET se commande en tension (comme un tube), son paramètre le plus important est sa pente

¹⁶ Bien entendu, la tension maximale entre émetteur et collecteur, le courant de collecteur maximum, la fréquence maximum de travail, etc ... sont également des paramètres importants, mais ce qui "caractérise" le plus un transistor à jonction c'est son facteur d'amplification en courant β ou son paramètre h_{FE} .

2.6.10. Codage des semi-conducteurs

Code des transistors européens

1ere lettre	2ème lettre	3ème lettre (facultatif)	numéro
A germanium B silicium	A diode basse puissance, varicap, etc ... B varicap C transistor audio faible puissance D transistor audio forte puissance E diode tunnel F transistor RF faible signal G divers H field probe K générateur à effet Hall L transistor RF de puissance M modulateurs à effet Hall P photo diode ou phototransistor R thyristor S transistor de commutation faible signal T thyristor haute puissance U transistor de commutation haute puissance X diode multiplicatrice Y diode de redressement haute puissance Z diode zéner		
exemple			
B	F	R	90

code des transistor japonais

chiffre	1ere lettre	2ème lettre	numéro	
nombre de connexions électriques moins un	semi-conducteur	A transistor PNP haute fréquence B transistor PNP basse fréquence C transistor NPN haute fréquence D transistor NPN basse fréquence E thyristor à grille type p G thyristor à grille type n H unijonction J FET à canal P K FET à canal N M triac	type	
exemple				
2	S	C	82D	A

Exercices:

- Que pouvez-vous dire d'un composant marqué AA119 ?
- Que pouvez-vous dire d'un composant marqué OA90 ?
- Que pouvez-vous dire d'un composant marqué BY100 ?
- Que pouvez-vous dire d'un composant marqué BC107 ?
- Que pouvez-vous dire d'un composant marqué 2N2222A ?
- Que pouvez-vous dire d'un composant marqué 2N3055 ?
- Que pouvez-vous dire d'un composant marqué 1N23 ?

2.7. Autres dispositifs semi-conducteurs

Bien que le programme HAREC ne prévoise pas de connaître les matières suivantes, nous pensons qu'il est très important d'étudier les circuits intégrés.

*Les **circuits intégrés** (IC ou Integrated Circuits) comprennent de nombreux transistors et diodes sur un seul morceau de silicium. Les circuits intégrés peuvent être analogique ou digitaux. La plupart des IC sont en capsules dans les boîtiers en plastic, d'autres dans des boîtiers métalliques.*

*Les **circuits intégrés linéaires** sont appelés ainsi parce que la tension de sortie est proportionnelle à la tension d'entrée (fonction linéaire).*

Ce qui est remarquable avec les IC c'est qu'on ne doit plus trop se préoccuper de ce qu'il y a à l'intérieur, il faut plutôt apprendre à les utiliser comme des "blocs", il faut apprendre à y mettre les quelques composants (généralement des R et des C) autour, il faut apprendre à lire les notes d'applications et on pourra ainsi réaliser les fonctions les plus complexes.

*Nous verrons aussi les **MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits)**, les **thyristors**, les **triacs**, les **optocoupleurs** et les **relais statiques***

*Dans ce chapitre devraient aussi venir les **circuits digitaux**, les circuits **TTL** et **CMOS**, mais comme ils font partie d'un point de l'examen HAREC, nous les traiterons à part au paragraphe 9.*

2.7.1. Les amplificateurs opérationnels

Un **amplificateur opérationnel**¹⁷ ou **AO** (**op amp** ou **operational amplifier**) est un amplificateur à courant continu avec une entrée différentielle, un haut gain et une bande passante assez élevée. Comprendre ce qu'il y a à l'intérieur d'un AO n'a que peu d'intérêt, il faut plutôt considérer les AO comme des blocs avec lesquels on peut construire des fonctions électronique (un amplificateur, un oscillateur, un comparateur, etc ...).

Un AO est un **amplificateur différentiel** ce qui veut dire qu'il possède deux entrées marquées "+" et "-". La figure ci-contre montre le symbole d'un A.O. Si on applique une tension positive à l'entrée "+", le signal de sortie va augmenter vers une valeur positive, si on applique une tension positive à l'entrée "-", le signal de sortie va augmenter vers une valeur négative. La tension de sortie est donc proportionnelle à la différence des tensions. Bien sûr si une des entrées est à la masse, la tension de sortie est proportionnelle à la tension d'entrée et la tension de sortie est en phase si le signal est appliqué à l'entrée "+" et en opposition de phase si le signal est appliqué à l'entrée "-".

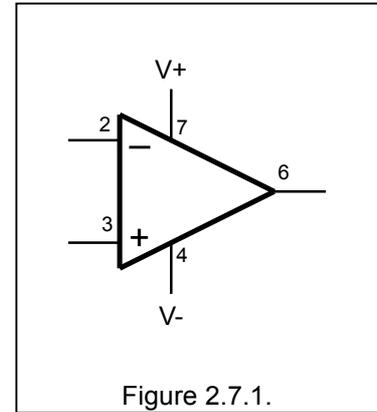


Figure 2.7.1.

En fait "l'intérieur" d'un AO est assez complexe, (la figure ci-contre est extraite d'un data sheet) ... mais heureusement, nous n'aurons pas à nous préoccuper puisque tout ceci est "intégré" sur une puce.

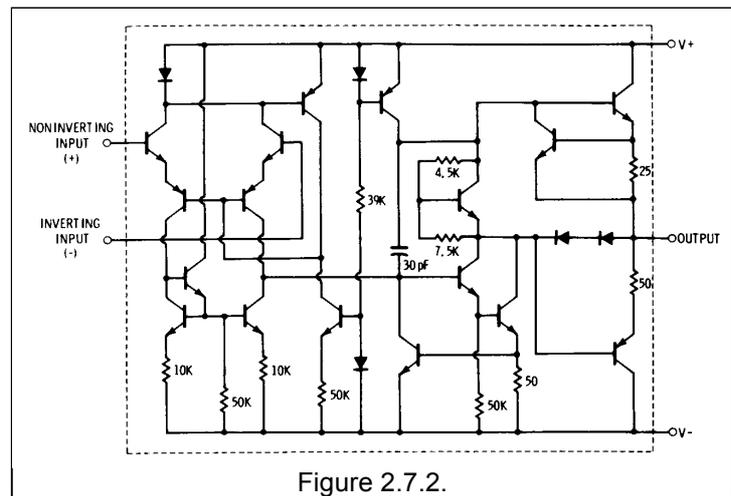


Figure 2.7.2.

Comme l'entrée est symétrique, l'AO est également alimenté par deux tensions symétriques V + et V - . Ces tensions vont de + et - 3 V à + et - 15 V habituellement.

Un AO est caractérisé par sa **haute impédance d'entrée** et sa **faible impédance de sortie**. Certains AO sont réalisés selon la technologie des JFET ou des MOSFET et alors l'impédance d'entrée est très élevée (quelques 10 MΩ).

La **bande passante** d'un AO idéal devrait être infinie. En pratique la bande passante va depuis le courant continu (puisque c'est un amplificateur à couplage direct) jusqu'à quelques MHz. Certains AO spécialement conçus pour la vidéo vont jusqu'à quelques dizaines de MHz, d'autres, conçus pour les RF vont jusqu'à quelques centaines de MHz.

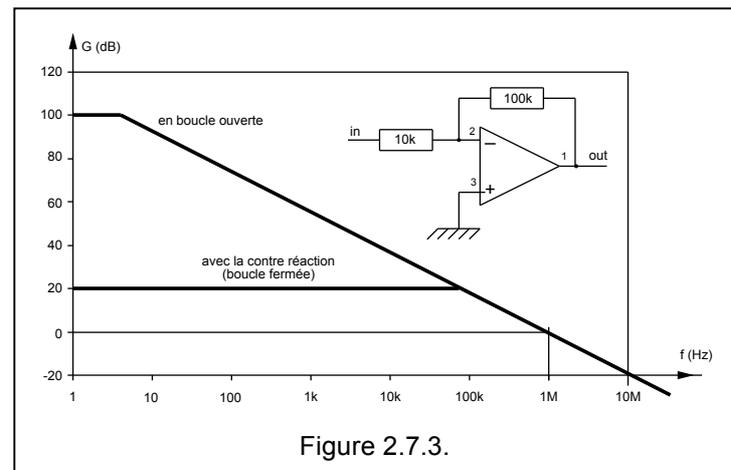


Figure 2.7.3.

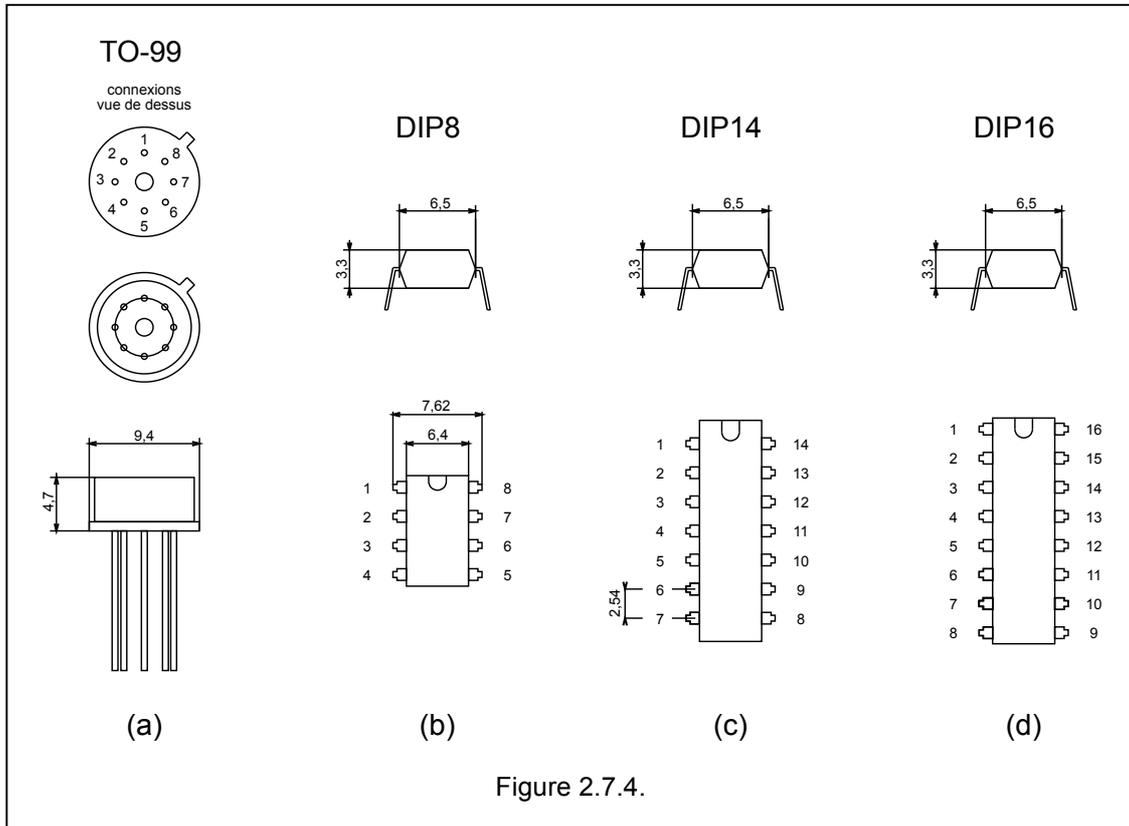
Le **gain** des AO est idéalement infini, en pratique on atteint des gains maxima de l'ordre de 100000 fois (c-à-d de l'ordre de 100 dB). Le gain sans aucun élément extérieur connecté, est appelé **gain en boucle ouverte (open loop gain)**. Utilisé avec un gain maximum, un AO a une trop faible bande passante (de l'ordre d'une dizaine de Hertz, cf figure ci-contre) et devient instable. C'est

¹⁷ C'est probablement la firme Fairchild qui développa le premier ampli-op en 1962, il s'agissant du μ A702 et il fallu attendre 6 ans pour voir apparaître le très classique μ A741.

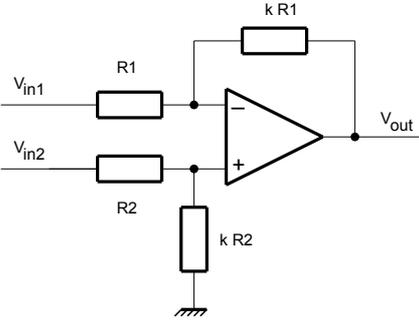
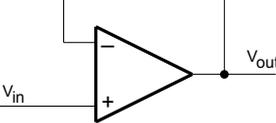
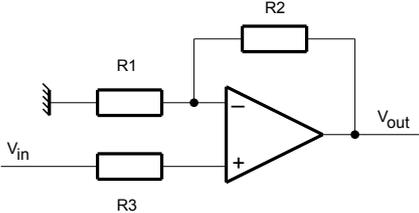
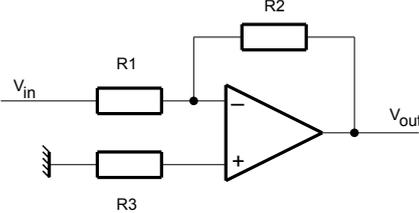
pourquoi on monte autour de l'AO quelques résistances qui réalise la contre réaction. C'est ce qu'on appelle le gain en boucle fermée (**closed loop gain**).

Les amplificateurs opérationnels se trouvent sous forme

- de boîtiers métalliques ronds à 8 broches TO-99 ou à 10 broches TO-100
- ou plus souvent en boîtiers plastiques appelés DIP pour Dual In Line Package suivit du nombre de broches (DIP8, DIP14, ...)



Quelques montages d'amplificateurs opérationnels :

 <p>Figure 2.7.8.</p>	<p>C'est le montage grâce auquel, on va pouvoir faire la différence de signaux. La tension de sortie vaut $V_{out} = k (V_2 - V_1)$</p>
 <p>Figure 2.7.9.</p>	<p>Ce montage est appelé follower, son gain est de 1, son impédance d'entrée est très élevée et son impédance de sortie est très faible.</p>
 <p>Figure 2.7.10.</p>	<p>C'est le montage non inverseur, caractérisé par le fait que le signal de sortie est en phase avec le signal d'entrée et caractérisé par un gain $A = 1 + (R_2 / R_1)$</p> <p>L'impédance d'entrée est très grande.</p>
 <p>Figure 2.7.11.</p>	<p>C'est le montage inverseur, caractérisé par le fait que le signal de sortie est en opposition de phase avec le signal d'entrée et caractérisé par un gain $A = - (R_2 / R_1)$</p> <p>L'impédance d'entrée est égale à R1.</p> <p>Pour que la dérive en température soit minimale, on choisit $R_3 = R_1 // R_2$.</p>

Nous reviendrons sur ces montages au chapitre 3.9.

Dans les montages radioamateur et d'électronique générale, les amplificateurs opérationnels les plus populaires sont

		n	f @ G=1	Gain en DC
741 ¹⁸	"l'ancêtre"	1	1MHz	
1458		2		
LM124		4	1 MHz	100 dB
LF355	J-FET			
LF-353				
TL-074	J-FET	4		
TL-084	J-FET version faible bruit du TL-074	4		
μA-733 , NE592	ampli différentiel large bande (vidéo)	1	> 40 MHz	

¹⁸ 741 est un nom générique, selon le fabricant on trouve des μA741, LM741 et souvent aussi différentes versions de boîtiers

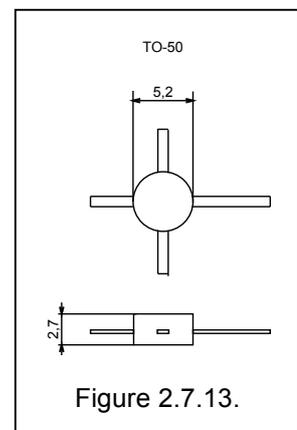
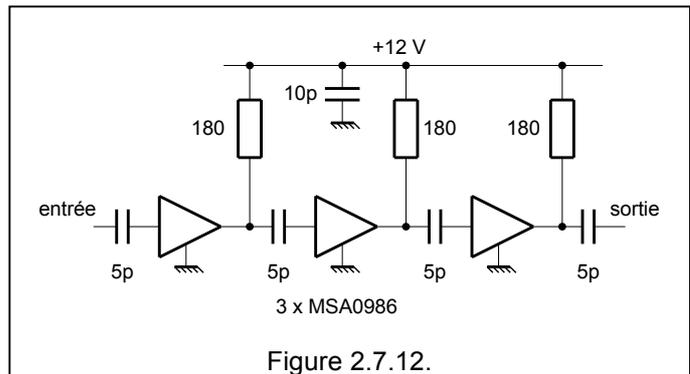
2.7.2. Les MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits)

Ces IC sont relativement petits, ils ont quatre fils de connexion disposés en croix, deux connexions servent à l'alimentation (la masse et le +V) et il y a bien sûr une connexion d'entrée et une connexion de sortie.

Les MMIC sont plus intéressants à utiliser que les transistors car ils requièrent moins de composants extérieurs et que leur stabilité est garantie jusqu'à quelques GHz. Les MMIC sont généralement utilisés avec des microstrip, c.-à-d. des circuits imprimés avec une face en cuivre plein et une autre face avec des lignes qui se comportent exactement comme des lignes coaxiales. L'alimentation se fait généralement au travers d'une résistance. Excepté cette résistance et deux condensateurs de liaison, il n'y a aucun autre élément extérieur.

Ces composants sont essentiellement utilisés dans des amplificateurs de 50 MHz à 2000 MHz, ils peuvent délivrer une puissance de sortie maximale de 50 mW avec un gain de 10 à 20 dB. Ils se présentent sous forme de boîtier plastique similaire au TO-50.

Les 2 fabricants les plus connus sont Mini-Circuits (voir http://www.minicircuits.com/products/amplifiers_monolithic.html) et AVANTEK.



2.7.4. Les modules de puissance RF

A l'autre extrême, on peut intégrer plusieurs transistors de puissance en un module capable de fournir jusqu'à 50 Watts avec un gain de 20 à 30 dB sur les bandes VHF et UHF. Il suffit alors de quelques condensateurs de découplage et self de choc pour réaliser très simplement un étage de sortie.

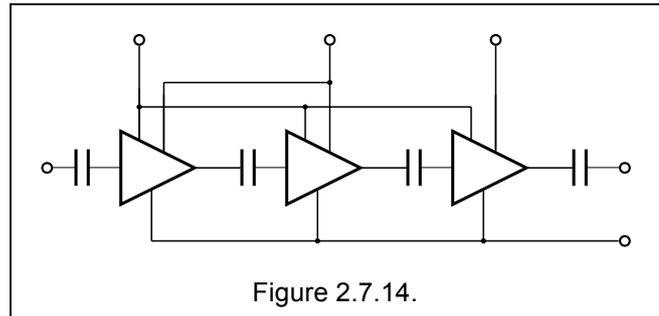


Figure 2.7.14.

Ils sont construits sur une semelle en cuivre. Les éléments sont protégés par un capot en matière plastique. La semelle du composant devra être fixée sur un refroidisseur adéquat et devra au préalable être enduite d'une mince couche de pâte silicone afin d'améliorer le transfert de chaleur.

Le fabricant le plus connu est Mitsubishi (voir <http://www.mitsubishichips.com/Global/common/cfm/eLineUp.cfm?FOLDER=/product/hf/sirfpowermod>) et Motorola.

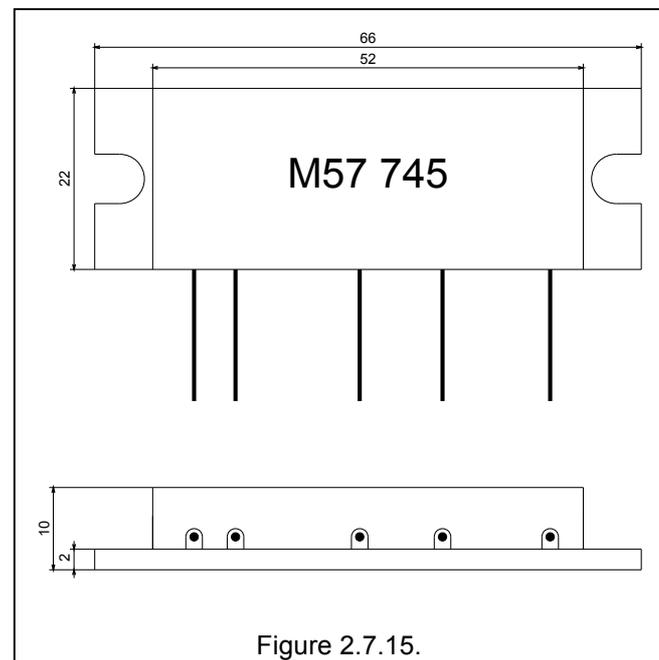


Figure 2.7.15.

2.7.4. Les thyristors

Un **thyristor** encore appelé **Silicon-Controlled Rectifier** ou **SCR** est un composant semi-conducteur qui possède trois connexions appelées anode, cathode et gâchette. C'est en fait une diode dont la conduction peut être commandée (on pourrait aussi dire peut être déclenchée) par la gâchette.

Le thyristor est essentiellement un composant pour les courants élevés (typiquement 3 A à 300 A) on le trouve donc sous forme de boîtier T0-220 (ou similaire) et sous forme de "boulon".

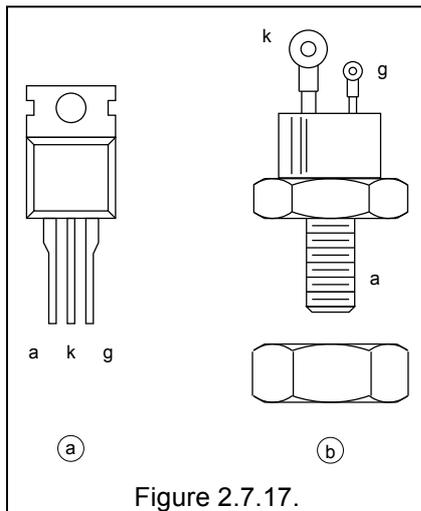


Figure 2.7.17.

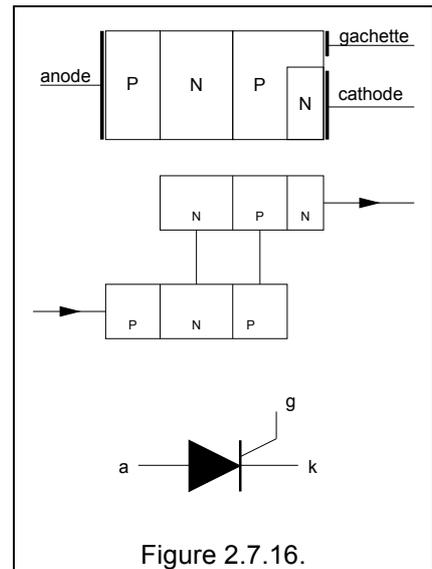


Figure 2.7.16.

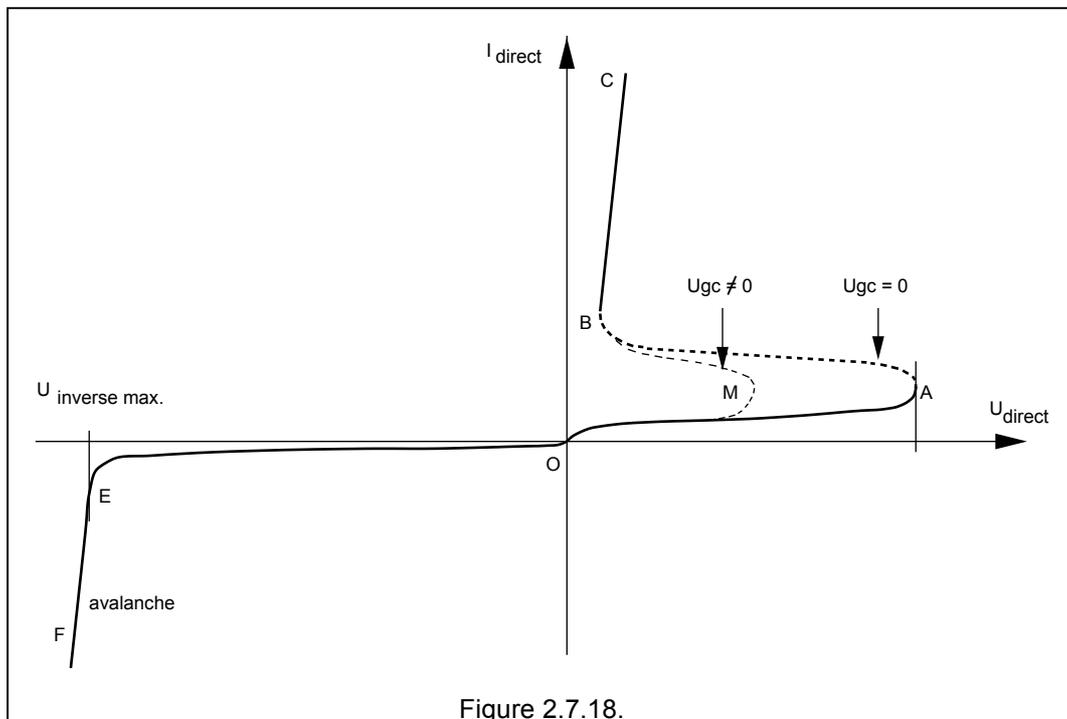


Figure 2.7.18.

La courbe caractéristique d'un thyristor est représentée ci-dessus.

- lorsqu'il n'y a pas de tension entre cathode et gâchette, le courant entre anode et cathode est relativement faible (du même ordre qu'un courant de fuite ...) et suit l'évolution entre O-A. Dans cette partie on dit que le thyristor est bloqué.
- puis subitement, si on augmente encore (légèrement) la tension, le thyristor devient conducteur (segment B-C). Etant donné la rapidité du mécanisme, il est difficile de relever la courbe entre A et B, c'est pourquoi elle est dessinée en trait pointillé
- toutefois si la tension cathode gâchette est légèrement positive, on peut déclencher le mécanisme de conduction beaucoup plus tôt, par exemple au point M .
- En polarisation inverse, le thyristor se comporte comme une diode ordinaire, on trouve donc une région de courant de fuite (O-E) suivie d'une zone d'avalanche (E-F)

Lorsqu'un thyristor conduit, il reste conducteur même si on supprime la tension entre la cathode et la gâchette. Le thyristor se comporte alors comme une diode. Pour supprimer alors la conduction du thyristor, il faut supprimer la tension entre l'anode et la cathode.

Le thyristor ne conduit le courant que dans un seul sens. A l'état normal, un thyristor ne conduit pas tant que l'on n'a pas appliqué une certaine tension entre la cathode et la gâchette.

Les thyristors sont essentiellement utilisés pour

- les circuits de mise à la masse dans les montages de protection contre les surtensions (voir plus loin au Chapitre 3 le paragraphe ? qui traite des alimentations),
- les allumages électroniques (allumage de moteur à essence),
- les redresseurs industriels afin de réguler la tension de sortie,
- les régulations de vitesse des moteurs électriques.

Comme pour les diodes de redressement un thyristor est caractérisé par

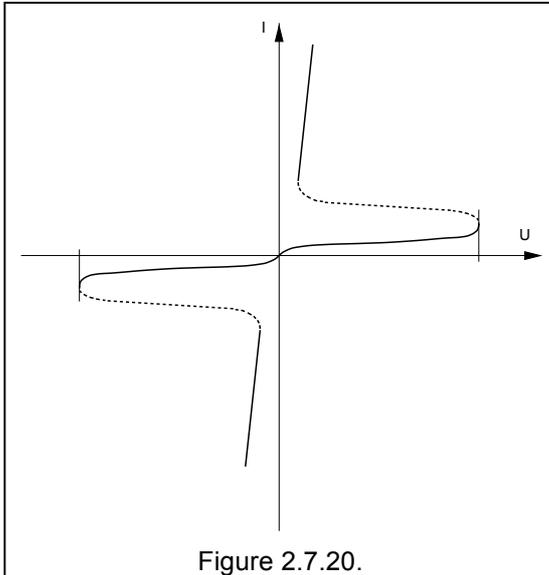
- le courant maximum qu'il peut supporter lorsqu'il est conducteur, et par
- la tension inverse (Peak Inverse Voltage).
- mais il faut aussi ajouter les caractéristiques de la gâchette : typiquement la tension d'amorçage se situe entre 0,5 et 3 V et le courant est de 0,3 à 500 mA.

Sélection des thyristors les plus courants :

BRX 49	400 V, 0,8 A
BT145	500 V, 25 A, TO-220
BT151	500V, 12 A, TO-220
BT152	500V, 20 A, TO-220
BT157	500V, 3,2 A, TO-220
TIC106	600 V, 5 A
TIC107	400 V, 4A
TIC116	400 V, 8 A

2.7.5. Les triacs

Le **triac** ressemble au thyristor, mais il s'agit d'un élément bidirectionnel. Le courant peut aussi bien passer dans un sens que dans l'autre. Il n'y a plus d'anode et de cathode, mais bien une anode 1 et une anode 2. La tension de commande doit être appliquée entre anode 2 et gâchette.



La courbe caractéristique ressemble à celle du thyristor, mais cette fois elle est symétrique.

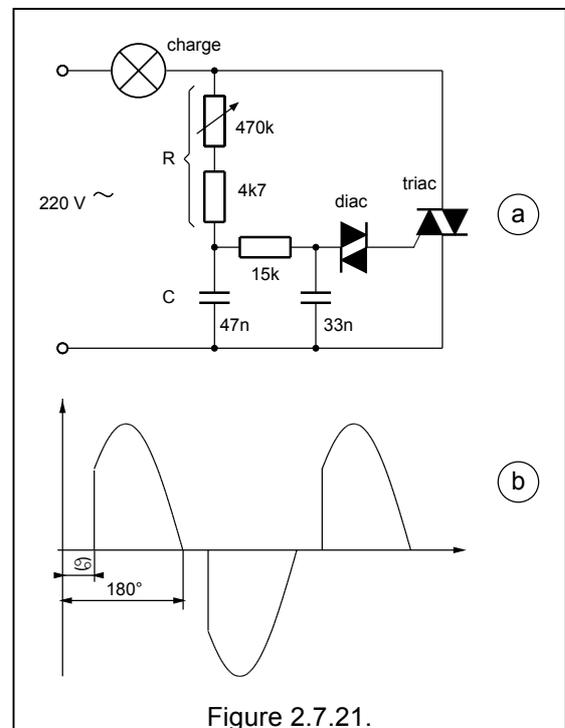
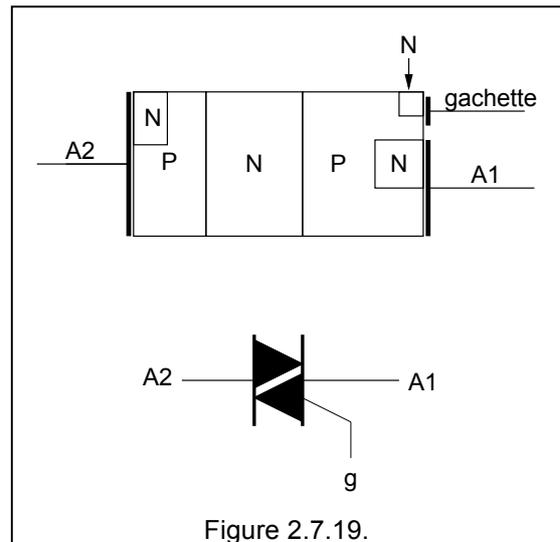
La même remarque est applicable en ce qui concerne le courant : les triacs sont essentiellement utilisés pour des courant de 3 à 30 A et les boîtiers sont soit du type TO-220 (ou similaire) ou des "boulons".

Les triacs sont essentiellement utilisés comme

- contrôleur d'éclairage ("light dimmer"), voir schéma ci-dessous. Le circuit RC sert à créer un déphasage variable. Le diac (sorte de diode zéner double) donne avec précision l'instant d'amorçage.
- régulateur de vitesse de moteur AC.

Sélection des triacs les plus utilisés :

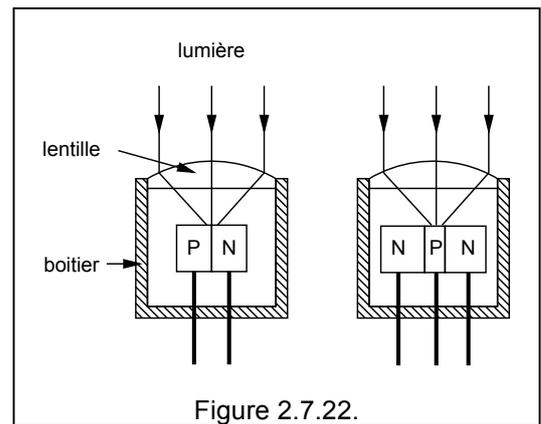
BS-04A	400 V , 6 A
BT136	500 V , 4 A , TO-220
BT137	400 V , 8 A , TO-220
BT138	500 V , 12 A , TO-220
BT139	500 V , 16 A , TO 220



2.7.6. Les photodiodes et phototransistors

Si on éclaire la jonction d'une diode, elle fournit un faible courant inverse. Au fait en l'éclairant on produit quelques paires électrons/trous. Les photodiodes sont montées dans des boîtiers avec une fenêtre transparente ou une lentille de concentration.. Les photodiodes sont utilisées pour la mesure d'éclairement ou pour des systèmes d'automatisation (détection d'objets par coupure d'un faisceau lumineux).

Mais les phototransistors sont généralement plus intéressants, car les variations de courant (et donc de tension) sont plus importantes à cause de l'effet transistor.



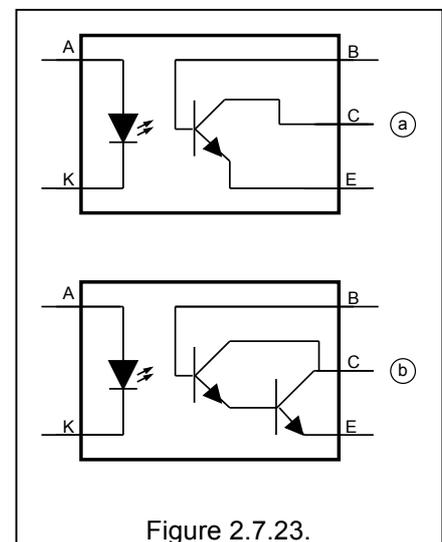
2.7.7. Les optocoupleurs

Un optocoupleur est une combinaison d'une LED et d'un phototransistor, dans un seul boîtier. Ces boîtiers DIL ont généralement 6 broches. Lorsqu'on envoie du courant dans la LED, celle-ci s'illumine et crée des paires électrons-trous dans la base du transistor, ce qui le fait conduire. Par le fait même que l'on utilise de la lumière et non du courant, l'optocoupleur permet de résoudre la plupart des problèmes d'isolation galvanique.

Au lieu d'un transistor (figure a), on peut aussi avoir un transistor Darlington (figure b), il faudra alors moins de courant dans la LED pour faire conduire le transistor.

Les caractéristiques essentielles des optocoupleurs sont :

- courant maximum dans la LED, qui varie de 25 à 100 mA selon le type
- courant collecteur maximum, qui varie de 8 à 100 mA
- tension émetteur-collecteur maximum qui varie de 15 à 70 V
- rapport de transfert de courant qui varie
 - de 0,1 à 1 pour les optocoupleurs normaux, à
 - env. 10 pour les montages darlington
- tension d'isolation qui varie de 500 V à 10 000 V selon le type



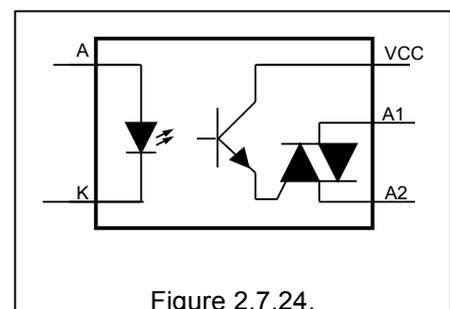
2.7.8. Les relais statiques

En combinant un optocoupleur et un triac, on obtient un relais statique. Un relais statique peut remplacer un relais conventionnel il offre comme avantage une commutation plus rapide, pas de bruit, pas d'arc, pas de rebondissement de contacts.

Dans la plupart des cas l'optocoupleur comporte également la résistance de limitation de la LED ou un circuit de régulation du courant de la LED (avantage : plus grande plage de tension).

Un relais statique est caractérisé par

- le courant maximum du triac,
- la tension maximum du triac,
- la tension ou la plage de tension de la LED
- la tension d'isolation



2.7.9. Les régulateurs de tension

Les régulateurs de tension sont également des circuits qui permettent de stabiliser une tension d'alimentation. Ce circuit comporte essentiellement une référence de tension, c-à-d une diode zéner, un amplificateur opérationnel pour "fabriquer" une tension de commande et un transistor (de moyenne puissance) qui va agir comme une résistance variable. Tous ces composants peuvent être intégrés dans un même circuit intégré : le régulateur de tension. Le régulateur de tension le plus simple n'a que 3 connexions ("3 pattes"), mais parfois on a accès à d'autres points du circuit. Nous verrons ces composants en détails avec l'étude des alimentations au chapitre 3.

2.7.10. Les circuits intégrés digitaux

Comme nous l'avons déjà dit dans l'introduction, les circuits intégrés digitaux font partie du programme HAREC et seront vu au paragraphe 2.9.

2.8. Les tubes électroniques

Le programme HAREC dit "connaissance sommaire des tubes à vides" ... mais que veut dire "sommaire" ?

Suffit-il de dire que lorsque la cathode est chauffée elle libère des électrons, que si l'anode est portée à un potentiel positif elle va capter ces électrons et que si une grille est placée sur le chemin des électrons celle-ci va permettre de réguler le flux des électrons ? Est-ce cela une connaissance sommaire ? Faut-il aussi savoir compter jusqu'à 5 en grec pour dire qu'une pentode comporte 5 électrodes ?

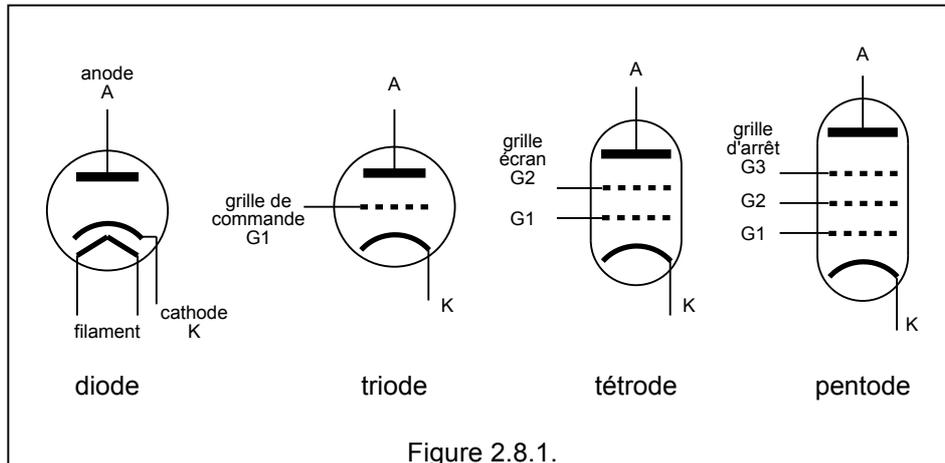


Figure 2.8.1.

Si c'est cela des "connaissances sommaires" alors le but est atteint, mais nous pensons que si vous utilisez des amplificateurs à tubes, il faut bien plus que cela ! Etant donné que le chapitre des composants est déjà bien volumineux, nous avons donc décidé de présenter les tubes dans une annexe et de dépasser le stade des connaissances sommaires.

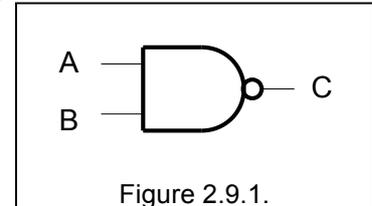
2.9. Les circuits logiques

2.9.1. Généralités

Les systèmes logiques ont habituellement deux états : La tension la plus élevée représente un 1 binaire, la tension la plus basse représente un 0 binaire. Un "1" est représenté par exemple par une tension voisine de +5V, un "0" par une tension presque nulle. Ceci est appelé la logique positive. Toutefois pour des raisons pratiques on pourrait aussi faire le contraire, on appelle cela de la logique négative

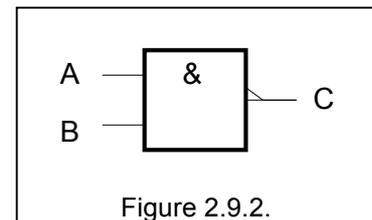
Il existe deux normes différentes pour représenter les portes

- la norme que l'on retrouve dans tous les data sheets, que tous les techniciens utilisent
- la norme ANSI/IEEE, souvent étudiée dans les écoles, cette norme est plus "académique" et les questions posées par l' IBPT utilisent cette représentation.



Nous verrons ces deux symboles dans la description des portes.

Au lieu de "C" on utilise aussi souvent la lettre "Q" pour la sortie.



2.9.2. Les portes

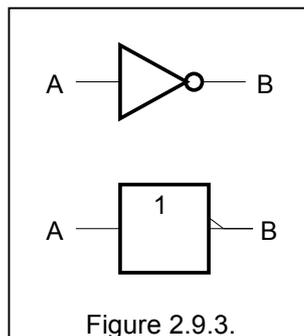
2.9.2.1. L'inverseur (NOT)

L'inverseur est la porte la plus simple avec une seule entrée et une seule sortie, comme son nom l'indique la sortie est l'inverse de l'entrée : si l'entrée est à 1 la sortie est à 0 et vice versa. En algèbre de Boole on place simplement un petit trait au-dessus du symbole qui représente l'entrée pour dire que la sortie est inversée donc $B = \bar{A}$.

Table de vérité :

A	B
0	1
1	0

Représentation symbolique :



Relation booléenne :

$$B = \bar{A}$$

"Bé est égal à NON A "

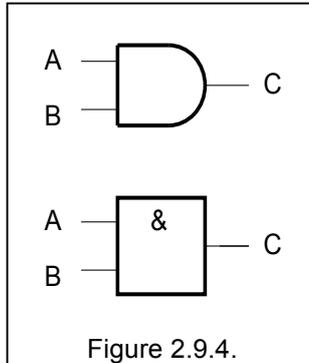
2.9.2.2. La porte ET (AND)

Une porte ET possède deux entrées et une sortie. La sortie est à 1 si la première entrée ET la deuxième entrée sont toutes les deux à 1. En algèbre de Boole on écrit $C = A B$ ou plus simplement $C = A \cdot B$. Ne lisez pas cela "Cé est égal à A fois Bé" mais bien "Cé est égal à A et Bé" !

Table de vérité

A	B	C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Représentation symbolique:

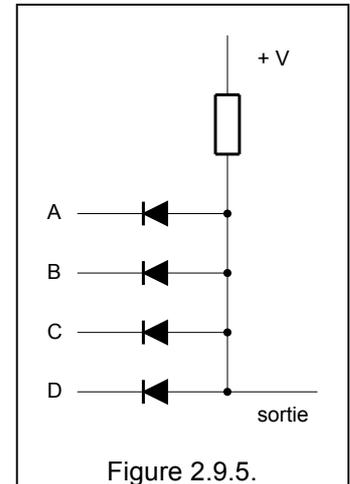


Relation booléenne :

$$C = A \cdot B$$

"Cé est égal à A et Bé"

Une porte ET peut être réalisée simplement avec le circuit ci-contre. Si toutes les entrées sont portées à un niveau "1" logique (+ V) par exemple, alors, la sortie passera au niveau "1" logique. Si une seule entrée est à la masse ("0"), alors la sortie sera également à "0"



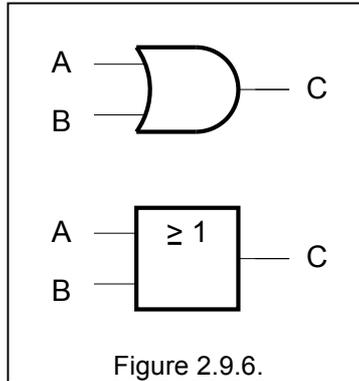
2.9.2.3. La porte OU (OR)

Une porte OU possède également deux entrées et une sortie. Mais ici, la sortie est à 1 si la première entrée OU la deuxième entrée est à 1. Bien sûr les deux entrées sont à 1, il y en a forcément une des deux à 1 et la sortie est 1. En algèbre de Boole on écrit. $C = A + B$. Ne lisez pas cela "Cé est égal à A plus Bé" mais bien "Cé est égal à A ou Bé" !

Table de vérité :

A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Représentation symbolique :

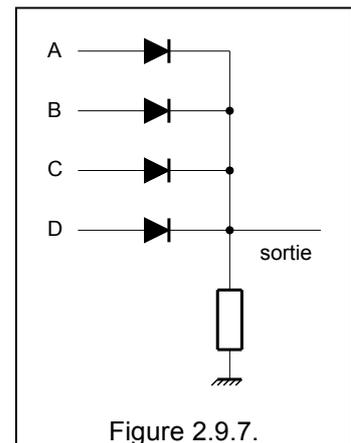


Relation booléenne :

$$C = A + B$$

"Cé est égal à A ou Bé"

Une porte OU peut être réalisée simplement avec le circuit ci-contre. Si l'une OU l'autre des entrées est portée à un niveau "1" logique (+ 5 V) par exemple, alors, la sortie passera au niveau "1" logique.



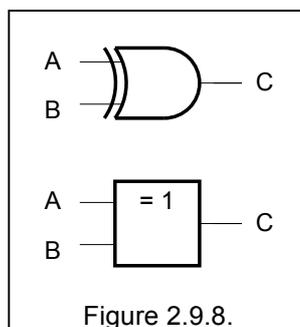
2.9.2.4. La porte OU exclusif (XOR)

Dans une porte OU exclusif, la sortie est à 1 si une des deux entrées est à 1 mais la sortie est à 0 si les deux entrées sont simultanément à 1. En algèbre de Boole on écrit $C = A \oplus B$

Table de vérité :

A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Représentation symbolique :



Relation booléenne :

$$C = A \oplus B$$

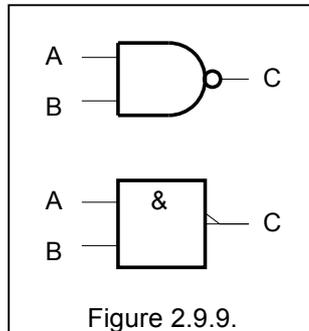
2.9.2.5. La porte NON ET (NAND)

Une porte NON ET est une porte ET suivie d'un inverseur. Donc $C = A \cdot \bar{B}$

Table de vérité :

A	B	C
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Représentation symbolique :



Relation booléenne :

$$\bar{C} = A \cdot B$$

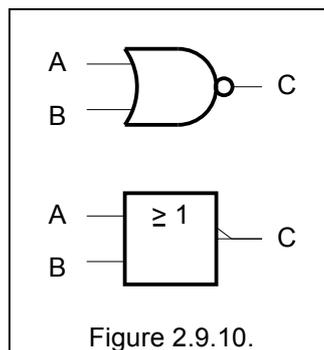
2.9.2.6. La porte NON OU (NOR)

Une porte NON OU est une porte OU suivie d'un inverseur. Donc $C = \bar{A} + B$

Table de vérité :

A	B	C
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Représentation symbolique :

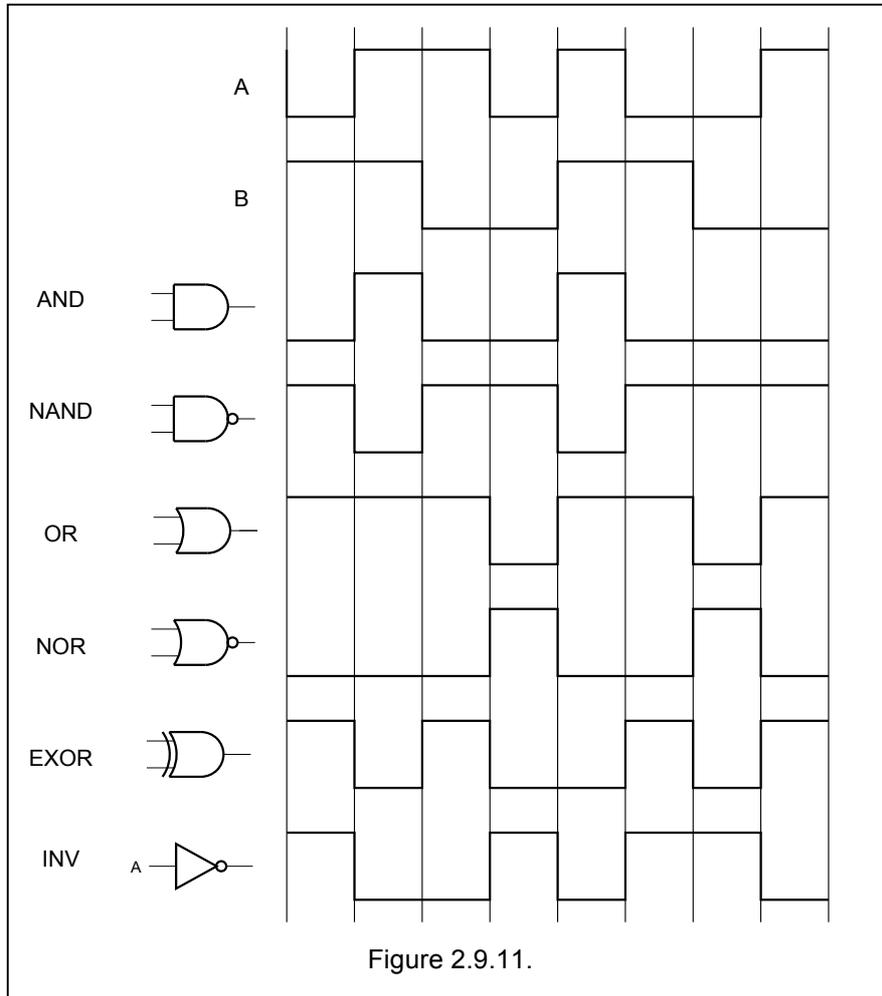


Relation booléenne :

$$\bar{C} = A + B$$

2.9.2.7. Application pratique

La figure ci-dessous représente l'état des sorties des différents types de porte en fonction des signaux A et B. Cette figure fait la synthèse des paragraphes précédents.



2.9.2.8. Nombre d'entrées d'une porte

Dans les exemples précédents nous avons toujours considéré des portes à 2 entrées. Dans la pratique on regroupe plusieurs portes dans un même circuit intégré et le nombre de d'entrée (par porte) peut être plus grand que 2. Les combinaisons les plus fréquentes et les types les plus couramment utilisés dans les familles TTL et CMOS¹⁹ sont :

	nombre d'entrées	TTL			CMOS		
		NAND	NOR	XOR	NAND	NOR	XOR
4 x	2	7400	7402	7486	4011 4093(*)	4001	4070
3 x	3	7410			4023	4025	
2 x	4	7420			4012	4002	
1x	8	7430			4068	4078	
1 x	12	74134					

(*) avec trigger de Schmitt

¹⁹ Les familles logiques seront vues plus loin

2.9.3. Les bascules ou flip-flop

Une bascule ou un **flip-flop**²⁰ ou un **latch**²¹ est un élément logique avec deux états stables. La sortie peut être un 1 ou un 0, mais ce 1 ou ce 0 est un état "mémorisé" de ce qui s'est passé à l'entrée. Nous allons d'abord voir comment on peut réaliser un flip-flop à l'aide de portes. Mais en réalité ces portes sont réalisées dans un même circuit intégré et peuvent être représentées par un rectangle avec plusieurs entrées et sorties, ceux-ci portent des noms ou plus exactement des lettres:

- Q et \bar{Q} sont les sorties, elles sont complémentaires, c-à-d que si Q est est 1 , \bar{Q} doit être à 0 et inversement bien entendu
- R et S sont deux entrées :
 - si on met R à 1 , la sortie Q va obligatoirement à 0 et Q à 1
 - si on met R à 0 , il n'y a aucune action
 - si on met S à 1 , la sortie Q va obligatoirement à 1 et Q à 0
 - si on met S à 0 , il n'y a aucune action
 - il n'est pas permis de mettre les deux entrées S et R à 1, si on le fait ce sera l'entrée qui sera restée le plus longtemps à 1 qui aura la prédominance!
- J et K sont deux entrées similaires respectivement à S et à R mais le basculement ne peut avoir lieu que par l'impulsion d'horloge

Il existe 2 types de synchronisation

- sur le niveau ("level")
- et sur le flanc ("edge")

2.9.3.1. Le flip-flop R S

C'est le flip flop **Set Reset** , c'est en fait le flip-flop le plus simple qui soit. On peut réaliser un tel flip-flop avec 2 portes NAND (figure a) on aura alors la table de vérité suivante

S	R	Q	Q	
0	0	?	?	non permis
0	1	1	0	
1	0	0	1	
1	1	Q	Q	reste dans l'état

ou avec deux portes NOR (figure b) et on aura

S	R	Q	Q	
0	0	Q	Q	reste dans l'état
0	1	0	1	
1	0	1	0	
1	1	?	?	non permis

Remarquons la similitude de fonctionnement, mais aussi les différences :

	l'état non permis est	donc normalement l'entrée est à	et un ... fait basculer le flip-flop
NAND	0 / 0	1	0
NOR	1 / 1	0	1

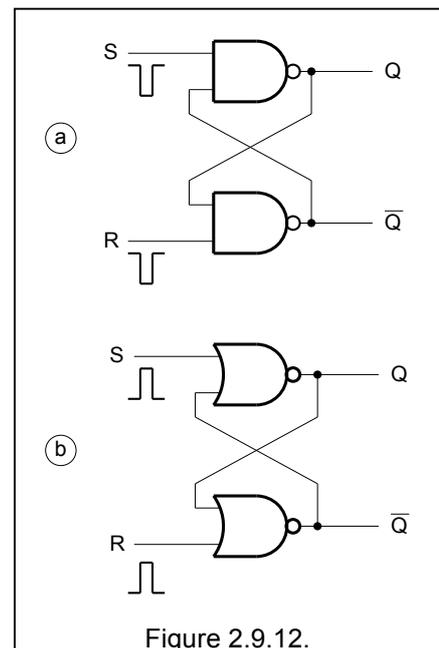
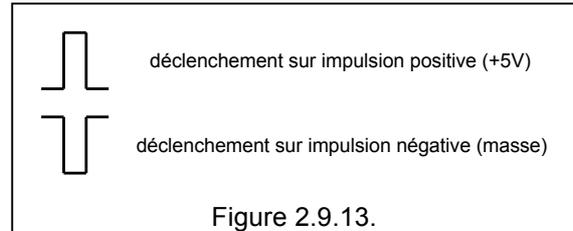


Figure 2.9.12.

²⁰ Onomatopée ...!

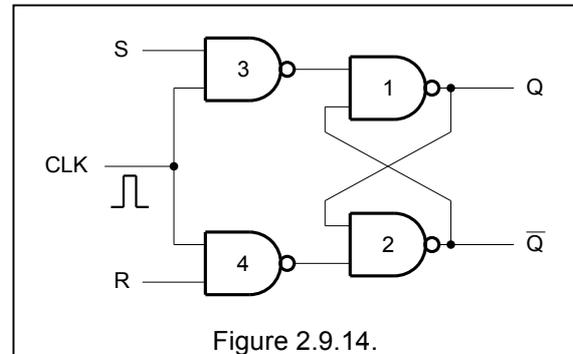
²¹ En anglais, a latch est un loquet, un verrou de porte.

Pour indiquer ceci sur les schémas on dessine une impulsion :



Une variante du montage ci-dessus est le flip flop **synchrone**. Au flip flop de base constitué des portes 1 et 2, on ajoute deux portes autres portes 3 et 4 commandées par un signal d'horloge. Le flip flop ne bascule que si CLK = 1, si CLK = 0, l'état des entrées est ignoré. On appelle ce signal CLK, le signal d'horloge ("clock").

Remarquez que l'on a dessiné une impulsion positive (+5V) pour indiquer le déclenchement de la bascule et que l'on a rien dessiné sur les lignes R et S.

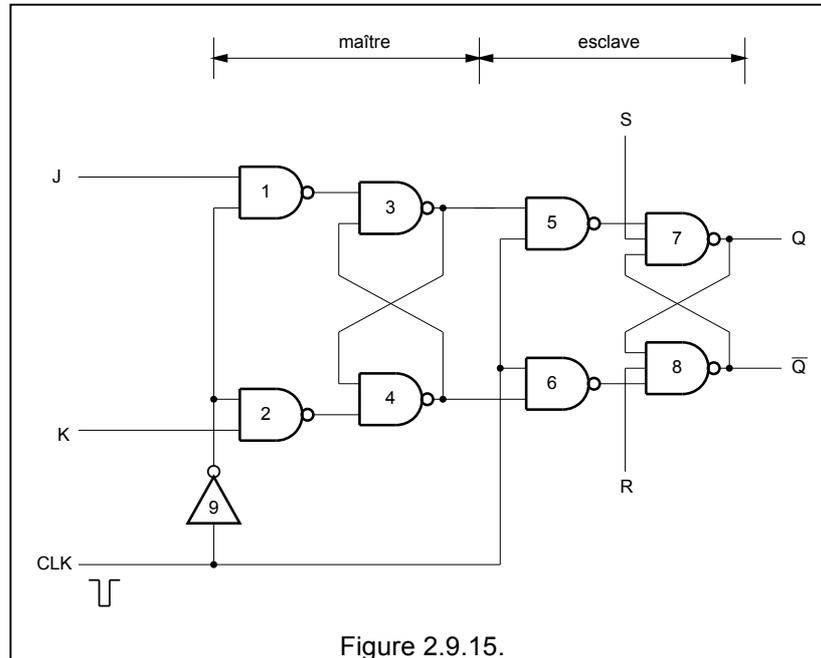


En mettant plusieurs cellules en cascades on obtient un registre à décalage (voir § 2.9.???)

Mais ceci ne résout toujours pas le problème de la situation non permise ! Toutefois, les bascules synchrones qui vont suivre (JK et D) vont apporter la solution.

2.9.3.2. Le flip flop type JK master slave

Si on met deux flip-flops synchrones en cascade, mais en utilisant des impulsions d'horloge complémentaires on obtient un flip-flop maître esclave.



Quand le signal d'horloge va à 0, les signaux d'entrées J et K font basculer le maître (portes 1, 2, 3 et 4), puis lorsque le signal d'horloge passe à 1, les informations du maître sont passées à l'esclave (portes 5, 6, 7 et 8).

La dernière amélioration consiste à prévoir 2 entrées S et R sur le flip-flop de sortie (portes 7 et 8), de manière à forcer l'état du système. Ces signaux S et R sont aussi appelés **set** et **clear** ou **preset** et **preclear**.

2.9.3.3. Le flip flop D

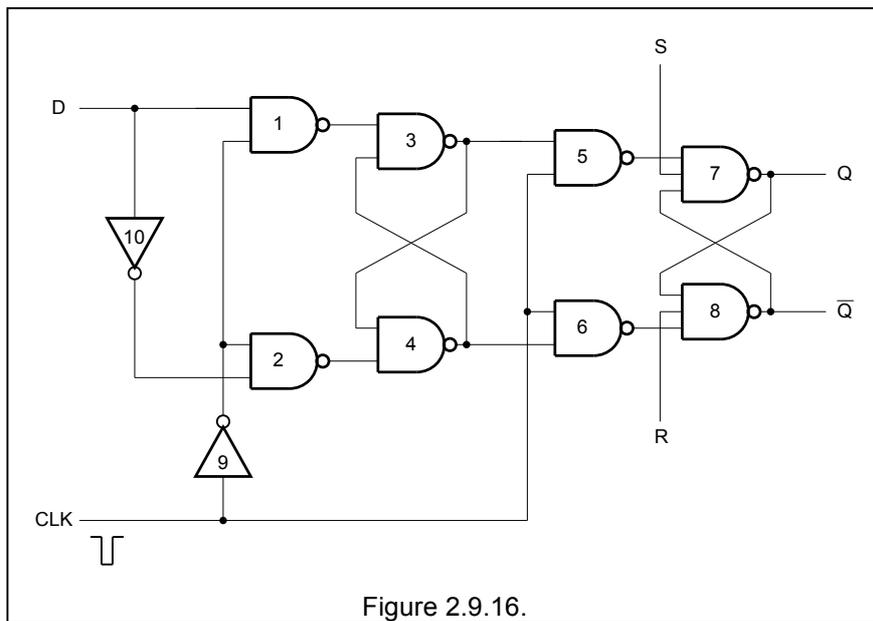


Figure 2.9.16.

Un flip-flop D est en fait constitué d'un flip-flop JK où le signal K est obtenu par inversion du signal J grâce à un inverseur supplémentaire (porte 10). Les signaux ne s'appellent plus J et K, mais D (pour data). Lorsque CLK est va à 0, l'état de D est reporté sur le maître, puis lorsque CLK retourne à 1, l'état du maître est reporté vers l'esclave. Le flip flop D est donc une cellule de mémoire.

2.9.3.4. Le flip-flop T ou bistable

En rétro-couplant les sorties sur les entrées, on obtient le flip-flop T. Il n'y a plus à proprement parlé d'entrées J ou K ou D. Ce circuit est donc un diviseur par 2 qui change d'état à chaque impulsion d'horloge.

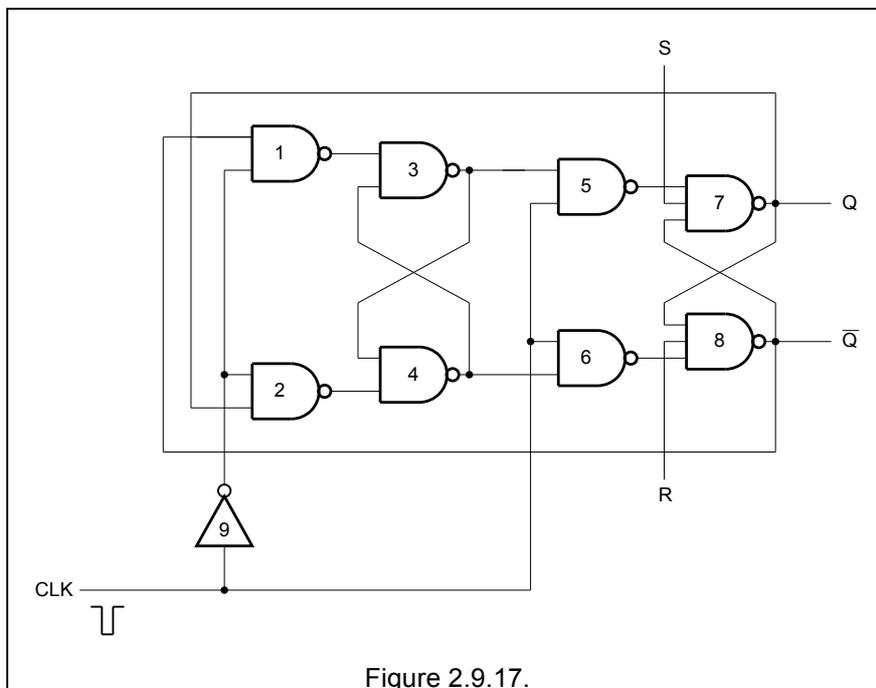


Figure 2.9.17.

2.9.3.5. Symbolisation

Tout ceci est bien intéressant pour comprendre les mécanismes, mais dans la pratique, on ne dessine pas toutes ces portes, mais plutôt un rectangle avec les lettres typiques à chacun des flip-flops.

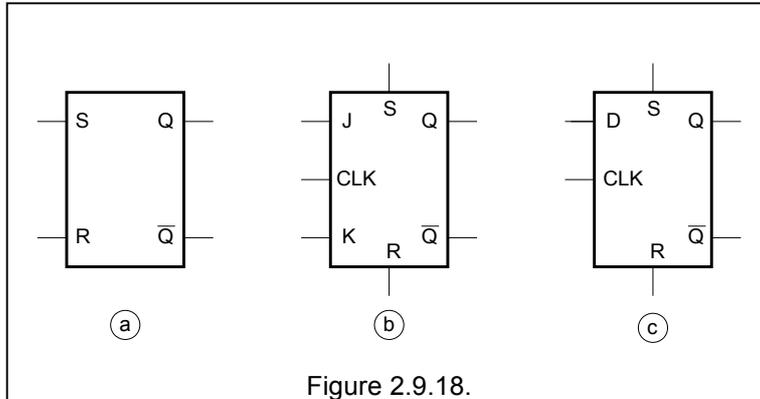


Figure 2.9.18.

table de vérité	type JK	type D																														
mode synchronisé	<table border="1"> <thead> <tr> <th>J</th> <th>K</th> <th>CLK</th> <th>Q</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>⌋</td> <td><i>reste dans le même état</i></td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>⌋</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>⌋</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>⌋</td> <td><i>change d'état</i></td> </tr> </tbody> </table>	J	K	CLK	Q	0	0	⌋	<i>reste dans le même état</i>	0	1	⌋	0	1	0	⌋	1	1	1	⌋	<i>change d'état</i>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>D</th> <th>CLK</th> <th>Q</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>⌋</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>⌋</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	D	CLK	Q	0	⌋	0	1	⌋	1	
J	K	CLK	Q																													
0	0	⌋	<i>reste dans le même état</i>																													
0	1	⌋	0																													
1	0	⌋	1																													
1	1	⌋	<i>change d'état</i>																													
D	CLK	Q																														
0	⌋	0																														
1	⌋	1																														
mode direct (ou forcé)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>S</th> <th>R</th> <th>Q</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td><i>non permis</i></td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td><i>fonctionnement normal</i></td> </tr> </tbody> </table>	S	R	Q	0	0	<i>non permis</i>	0	1	0	1	0	1	1	1	<i>fonctionnement normal</i>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>S</th> <th>R</th> <th>Q</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td><i>non permis</i></td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td><i>fonctionnement normal</i></td> </tr> </tbody> </table>	S	R	Q	0	0	<i>non permis</i>	0	1	0	1	0	1	1	1	<i>fonctionnement normal</i>
S	R	Q																														
0	0	<i>non permis</i>																														
0	1	0																														
1	0	1																														
1	1	<i>fonctionnement normal</i>																														
S	R	Q																														
0	0	<i>non permis</i>																														
0	1	0																														
1	0	1																														
1	1	<i>fonctionnement normal</i>																														

Figure 2.9.19.

Les combinaisons les plus fréquentes et les types les plus couramment utilisés dans les familles TTL et CMOS sont :

	TTL	CMOS
2 x JK	7473	
4 x JK	74376	
2 x D		4013
4 x D	7477	
8 x D	74373	

2.9.4. Les registres à décalage

En connectant plusieurs flip-flop D en série, il est possible de faire circuler une information dans un registre. En général tous ces flip-flop font partie d'un même circuit intégré qui est alors caractérisé par son nombre d'étages.

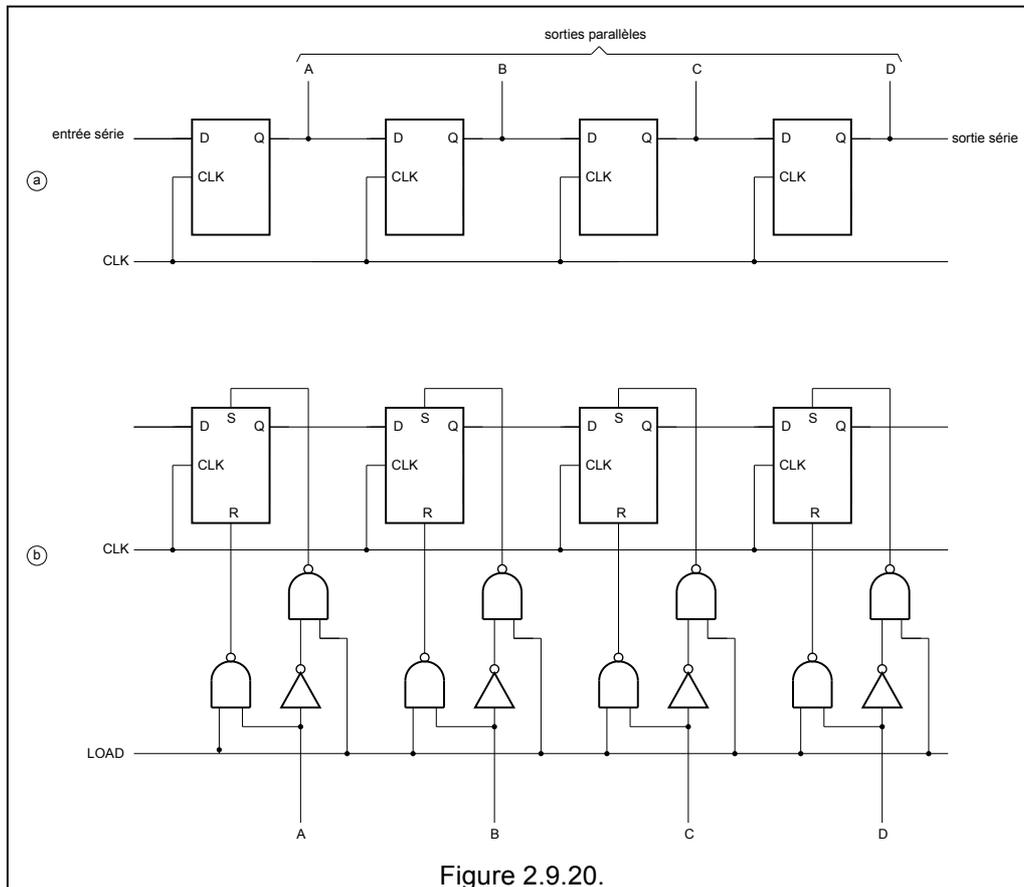


Figure 2.9.20.

On distingue

- l'entrée série comme sur la figure a ci-dessus,
- l'entrée parallèle où on attaque les entrées S-R de chaque flip-flop dans une opération que l'on appelle "chargement" (figure b)
- la sortie série
- et les sorties parallèles.

Dans certains montages on peut aussi changer le sens de circulation.

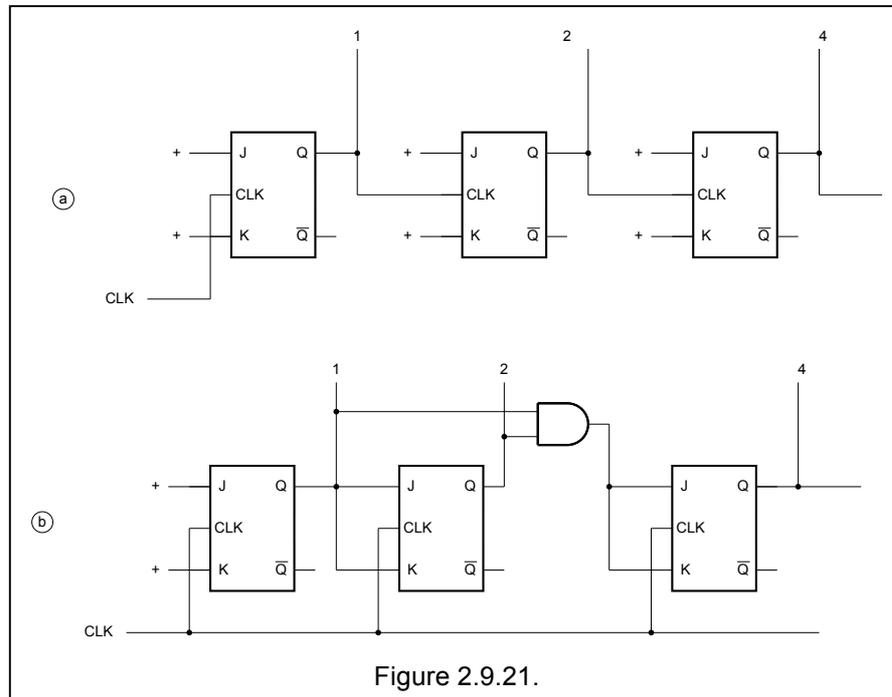
On rencontre les registres à décalage principalement comme

- convertisseur série/parallèle et vice-versa
- générateur pseudo aléatoire
- générateur de bruit blanc

Dans la pratique un registre à décalage va se représenter sous forme d'un rectangle avec sa (ses) entrées/sorties.

2.9.5. Les compteurs ou diviseurs

Ils sont constitués de flip flop. La figure ci-contre représente deux diviseurs par 8.



On distingue

- les compteurs **asynchrones** ou compteur à ondulation ("**ripple counter**") : on se rappellera qu'un flip flop dont les entrées sont à 1 inverse sa sortie à chaque impulsion d'horloge. La sortie d'un étage sert d'horloge au suivant. Voir figure a
- les compteurs **synchrones** où tous les flip-flop reçoivent l'impulsion d'horloge en même temps. Le premier étage est un diviseur par 2. Pour les étages suivants J et K sont reliés ensemble : Si J et K sont à 0, la sortie reste dans le même état après l'impulsion d'horloge. Si J et K sont à 1, la sortie change d'état après l'impulsion d'horloge. Les compteurs synchrones sont plus rapides que les compteurs asynchrones.

Mais certains compteurs peuvent

- être "chargés" par une valeur.
- compter dans en incrémentant leur résultat ("**up counter**") et d'autres possèdent les deux directions de comptage ("**up/down counter**")

2.9.6. Les décodeurs

Les décodeurs permettent de passer

- de BCD vers décimal
- de BCD vers binaire
- de BCD vers 7 segments
- binaire vers BCD
- binaire vers décimal

2.9.7. Les comparateurs

Ces circuits permettent de déterminer si deux nombres binaires sont égaux. Les nombres binaires sont décomposés en bits.

2.9.8. Les multiplexeurs et les démultiplexeurs

Ces circuits agissent comme des combinateurs multi positions. La position étant donnée sous forme d'un nombre binaire. En fait ils agissent comme des combinateurs.

On distingue les circuits **multiplexeurs** avec une sortie sélectionnée parmi plusieurs entrées, ou inversement des circuits **démultiplexeurs** avec une entrée dirigée vers une de "n" sorties.

La position du commutateur est déterminée par un décodeur qui reçoit sa valeur binaire sur "x" lignes. Pour un multiplexeur ou un démultiplexeur à 8 sortie, il faut 4 bits car $2^4 = 8$.

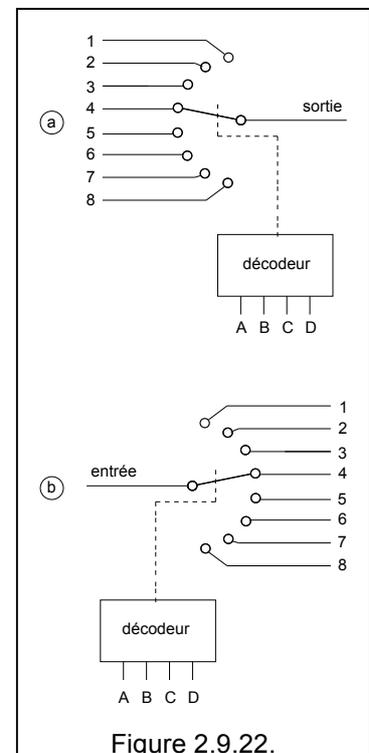


Figure 2.9.22.

2.9.9. Autres fonctions

Il existe quelques autres circuits logiques avec des fonctions particulières, mais nous n'entrerons pas dans les détails ici.

2.9.10. Les mathématiques des circuits logiques

Lorsque nous avons vu les portes nous avons vu que celles-ci pouvaient avoir plusieurs fonctions. Ces fonctions peuvent être représentées par des symboles mathématiques

l'inversion	$B = \overline{A}$
la fonction ET	$C = A \cdot B$
la fonction OU	$C = A + B$
la fonction OU EXCLUSIF	$C = A \oplus B$

ceci constitue la base de l'algèbre de Boole.

Les propriétés de base sont :

$A + 1 = 1$	$A \cdot 1 = A$
$A + 0 = A$	$A \cdot 0 = 0$
$A + A = A$	$A \cdot A = A$
$A + \overline{A} = 1$	$\overline{A \cdot A} = 0$

Les relations booléennes permettent d'établir l'équation d'un circuit. On peut imaginer un système avec de nombreux signaux d'entrées, l'équation booléenne donnera une expression relativement simple du circuit que l'on élabore. L'avantage de cette expression est qu'on peut l'analyser et qu'on peut parfois la simplifier.

Un théorème très important est le **théorème de De Morgan**²² qui dit

$$\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B} \quad \text{ou} \quad \overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$$

Démontrons cela à l'aide d'une table de vérité :

A	B	$\overline{A + B}$	$\overline{A} + \overline{B}$	\overline{A}	\overline{B}	$\overline{A \cdot B}$
0	0	0	1	1	1	1
0	1	1	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0

En fait le théorème de De Morgan signifie simplement que l'on peut remplacer des portes OU par des portes ET et inversement !

²² Notez que ce Monsieur s'appelait De Morgan, il s'agit donc du théorème **de De** Morgan !

2.9.11. Les différentes technologies de circuits logique

La "technologie" se manifeste ici en plusieurs familles (TTL, CMOS, ECL, ...) qui ont chacune des avantages et des inconvénients

2.9.11.1. La technologie TTL

Les circuits logique TTL (Transistor Transistor Logic) est une famille de porte utilisant des transistors bipolaires. Cette famille est identifié par un numéro **7400**, la version militaire étant 5400.

Le schéma équivalent d'une porte NAND à 3 entrées est donné ci-contre (extrait d'un data sheet).

Les circuits TTL nécessitent une tension d'alimentation comprise entre 4,75 à 5,25 V (idéalement 5 V !).

La famille 7400 date du début des années 1970, c'est probablement la famille offrant le plus vaste choix de portes, de flip-flop, de compteurs de codeurs et de décodeurs ! Mais elle existe également sous plusieurs variantes:

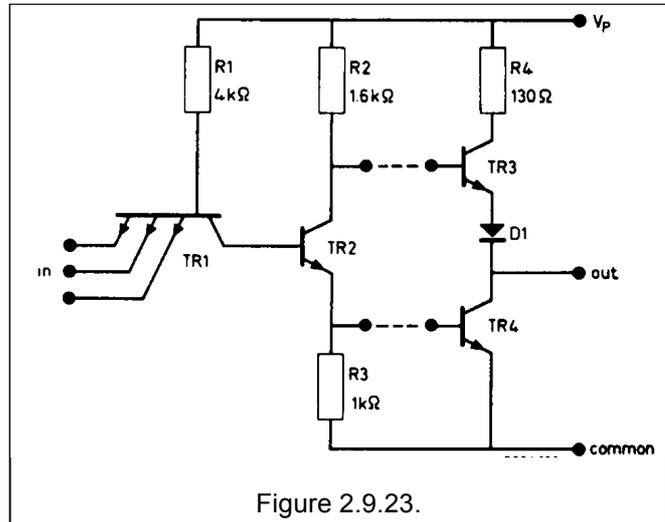


Figure 2.9.23.

famille	année		MHz
74	début '70		
74L		techniques "Low Power" , mais le courant de sortie est très petit, donc on ne peut pas attaquer beaucoup de portes à partir de la sortie d'une autre.	
74S		technique "Schottky" où les transistors ne sont plus saturés	
74H		technique "High speed" avec une vitesse plus élevée (3 x) mais une consommation importante, d'où la nécessité de réserver ces IC aux premiers étages avant la division	
74LS	1976	Low Power Schottky	
74F	1979	FAST pour Fairchild Advanced Schottky Ttl , 50% plus rapide que la série 74S et 1/3 de sa puissance	100
74AS	1980	Advanced Schottky pour supplanter la famille 74S	105
74ALS	1980	Advanced Low power Schottky pour supplanter la famille 74LS	34
74HC	1982	High speed CMOS	30
74HCT	1982		30
74C	1985	technologie CMOS mais avec les mêmes fonctionne et les mêmes brochages que les TTL	
74HCU			
74AC	1985		125

Conclusions :

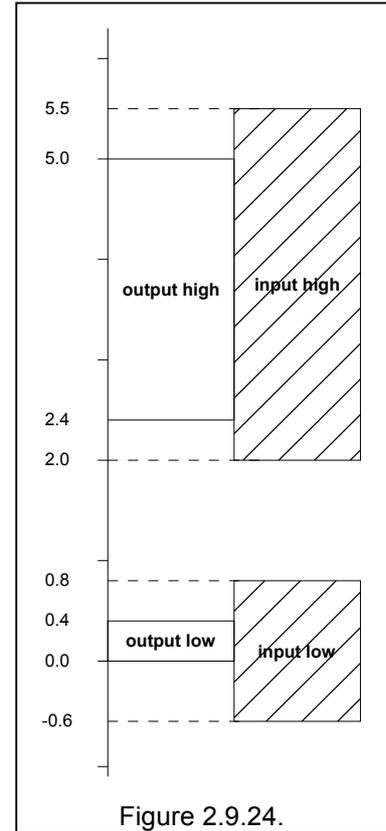
- si vous devez dépanner un montage, remplacer l'IC par un du même type ou alors par celui d'une famille compatible
- si vous avez des nouveaux projets utiliser préférentiellement des 74HCT sauf si vous avez besoin de vitesse élevées, choisissez alors la famille 74AC(T)

Ce qu'il faut aussi savoir des TTL c'est que l'on peut "tirer" beaucoup de courant si la sortie est à 0, donc si on utilise une porte pour activer une LED ou un relais, la LED ou le relais sera relié entre la sortie de la porte TTL est le + 5 V, avec bien entendu une résistance de limitation en série.

Parfois toutes les entrées ne sont pas utilisées, elles se comportent alors comme si elles étaient au potentiel haut (1). Mais il est préférable de mettre une résistance de 10 k en série vers le + 5 V , plutôt que de laisser la broche "en l'air". Une bonne pratique consiste aussi à découpler chaque carte par un condensateur électrolytique de 22 μ F et mettre un condensateur de découplage de 0,01 à 0,1 μ F tous les 4 à 8 circuits intégrés.

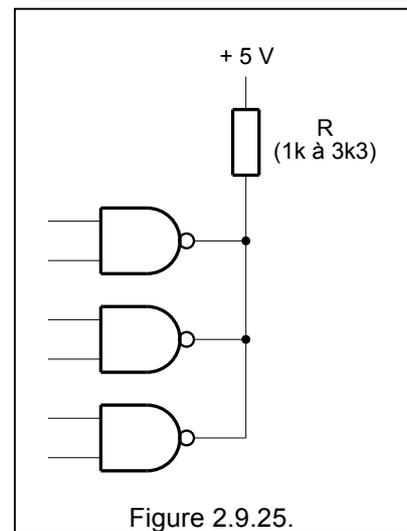
Caractéristiques des familles TTL

entrée 0 = inférieur à 0,8 V 1 = supérieur à 2 V
sortie 0 = inférieur à 0,4 V 1 = supérieur à 2,4 V
tension d'alimentation 4,75 à 5,25 V (maximum 7 V)
fréquence de travail maximum 5 à 15 MHz , mais exception pour certains compteurs et diviseurs qui vont jusqu'à 50 MHz



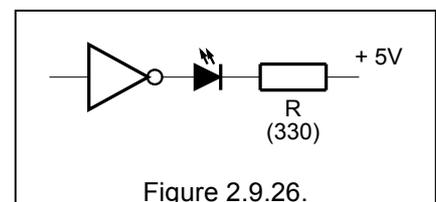
Les logiques à **collecteur ouvert** : La sortie de ces portes se fait par l'intermédiaire d'un transistor monté en émetteur commun, le collecteur étant connecté à la sortie de l' IC. Ces sorties doivent donc être connectées à une charge qui retourne vers le + 5 V. Les collecteurs ouverts sont essentiellement utilisés :

- pour faire un OU câblé, plusieurs sorties sont connectées ensemble et reliées au + 5 V via une résistance de pull-up



- pour l'attaque de charges extérieures (relais reed, LED, buzzer, ...). Toutefois pour des charges excédent 30 mA, il existe les circuits ULN2003 et 2004 qui permettent d'obtenir un courant de 500 mA maximum.

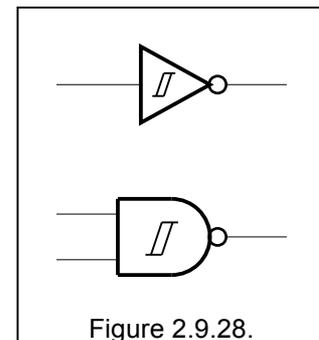
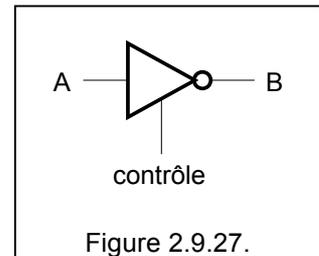
- pour l'attaque de bus externes



Logique à trois états ou **Tristate** : S'il est vrai qu'en logique digitale on ne connaît que 2 états un 1 ou un 0 , on a ajouté un troisième état, l'état haute impédance. Certains circuits logiques comporte une entrée de contrôle qui place la sortie dans un état "haute impédance", tout se passe alors comme si la sortie était déconnectée.

contrôle	A	B
0	1	0
0	0	1
1	x	haute impédance

Logique avec **trigger de Schmitt** : La figure ci-contre montre un inverseur et une porte NAND avec trigger de Schmitt.

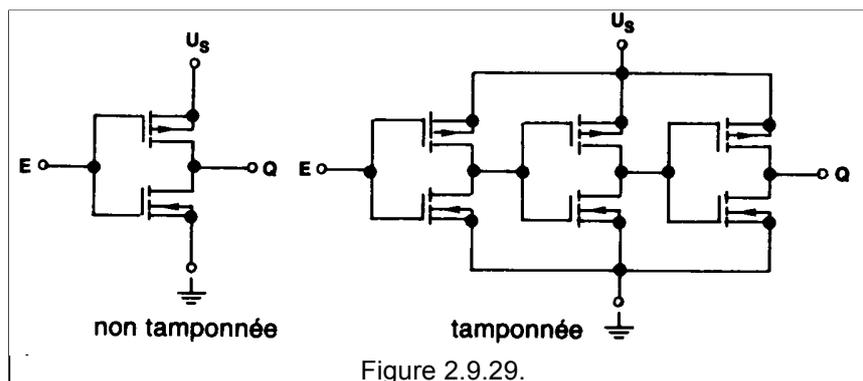


2.9.11.2. La technologie CMOS

Les circuits logiques CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) utilisent des transistors à effet de champ (FET) du type N ou du type P combiné sur le même substrat. L'avantage essentiel de cette famille est la **très faible consommation** et la grande immunité au bruit.

La plupart de ces IC sont caractérisés par le numéro de série de la forme **4000**.

Les fabricants ont aussi produits des portes pin-to-pin compatibles à celles de la série TTL, mais en CMOS. Ainsi une porte 74HC00 est une porte CMOS équivalente à la 7400 en version TTL.

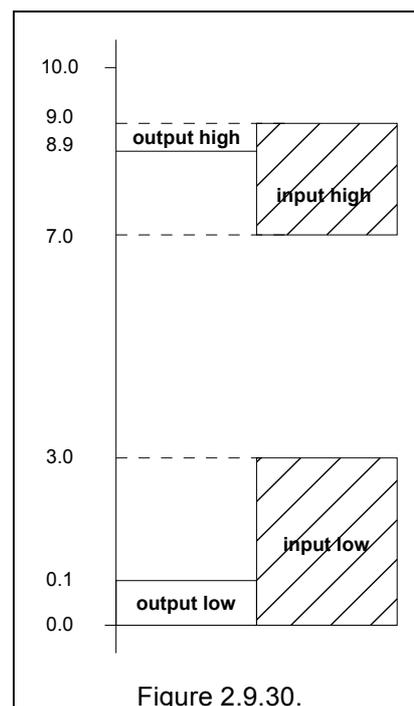


Il existe deux types de sorties :

- la sortie non tamponnée (= "non bufferisée"), c'est l'ancienne série, marqué par la lettre **A**, et,
- la sortie tamponnée, marquée par la lettre **B**, cette série donne des impulsions "plus carrées" que la série A.

Les CMOS peuvent aussi fonctionner sur une large plage de tension d'alimentation, en pratique celle-ci va de 3 à 18 V. Les tensions de sortie dépendent bien sûr de la tension d'alimentation.

La figure ci-contre montre les plages de tensions H et L lorsqu'une porte CMOS est alimentée en 9 V.



2.9.11.3. La technologie ECL

La famille des circuits ECL ou Emitter Coupled Logic est essentiellement constituée de diviseurs et de quelques portes logiques. Elle apporte réellement la vitesse. La famille ECL est donc essentiellement utilisée dans les étages à fréquence très élevée (500 MHz et plus), et principalement comme pré diviseurs. Dès que l'on atteint une fréquence acceptable pour une famille TTL ou CMOS, on repasse évidemment en TTL ou en CMOS.

2.10. Les quartz

Les quartz sont très utilisés dans le domaine radioamateurs, on peut les utiliser comme élément d'oscillateur très stables ou comme filtre à quartz. Un quartz est en fait un matériau piézoélectrique.

Un matériau piézoélectrique est un matériau aux bornes duquel apparaissent des charges électriques s'il est soumis à une contrainte mécanique. Inversement si on applique des contraintes mécaniques, il apparaît des charges (et donc des tensions). Le sel de la Rochelle, la tourmaline et la quartz sont les 3 principaux matériaux piézoélectrique.

Le quartz est un dioxyde de silicium (SiO_2 , tout comme le sable !). Les cristaux ont une forme hexagonale. Au début on n'utilisait que du quartz naturel provenant du Brésil ou de Madagascar. actuellement le quartz est produit de façon synthétique.

Les propriétés piézoélectriques font référence à 3 axes :

- l'axe Z ou l'axe optique
- l'axe Y ou l'axe mécanique
- l'axe X ou l'axe électrique

Un quartz tel que représenté à la figure ci-dessus peut mesuré 5 cm de diagonale et 10 cm de long. Dans un tel bloc on peut tailler quelques milliers de pastilles (disques) de quartz. Les coupes des quartz sont représentés par des lettres, on parle de la coupe AT, BT, CT, etc ... On métallise alors une connexion sur chaque face du quartz et on le monte sur un support. Le quartz est ensuite enfermé dans un boîtier.

Les principales deux formes de boîtiers les plus courantes sont représentées ci-contre. Notons que le boîtier HC-6/U ressemble au boîtier HC-33/U sauf qu'il est pourvu de deux picots pour être enfiché dans un support. Idem pour le boîtier HC25/U qui ressemble au boîtier HC-18/U, mais qui est pourvu de picots. Ce sont bien sûr les deux formes les plus courantes, à part cela on trouvera encore des dizaines d'autres formes !

	A	B	C
HC 33/U	19,8	19,2	8,9
HC 18/U	13,4	11,1	4,7

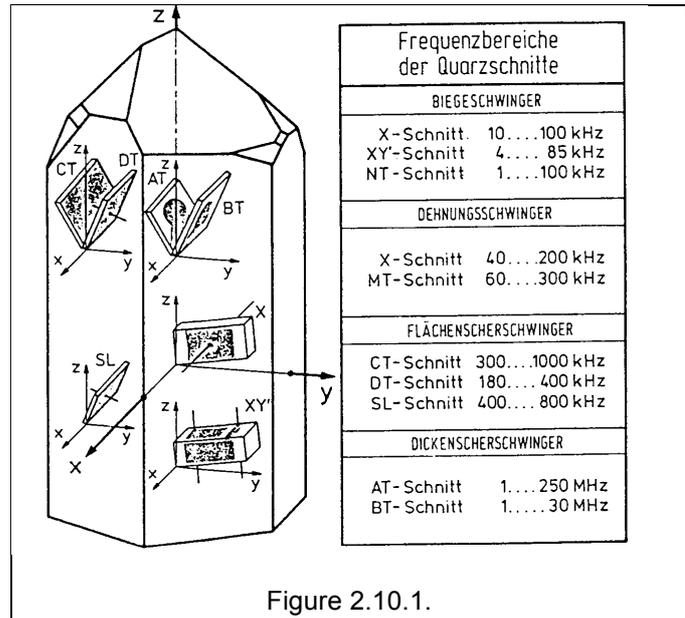


Figure 2.10.1.

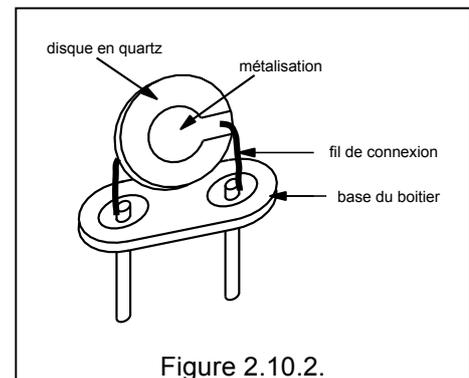


Figure 2.10.2.

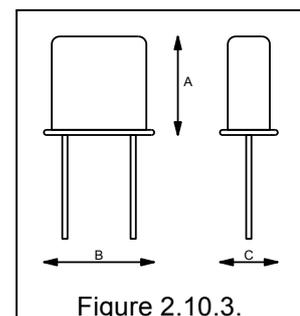
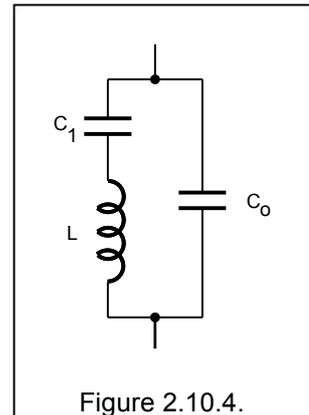


Figure 2.10.3.

Le schéma équivalent d'un quartz est donné ci contre.

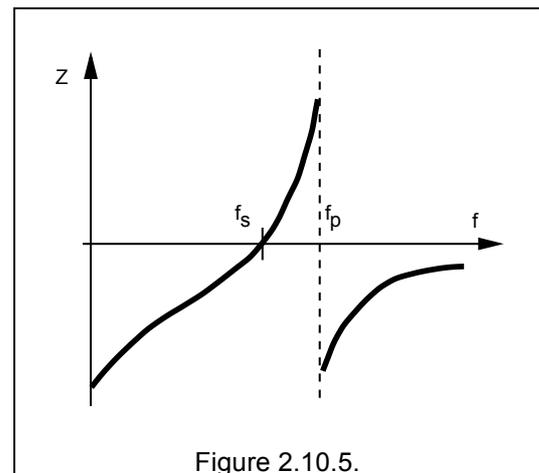


Un quartz possède deux fréquences de résonance

- une fréquence de résonance série (f_s) où l'impédance équivalente est très faible et
- une fréquence de résonance parallèle (f_p), où l'impédance équivalente est très grande.

Tel quel les quartz sont principalement utilisé dans des circuits oscillateur et dans les filtres.

Notons aussi que certaines céramiques ont des caractéristiques voisines.



2.11. Microphones et haut-parleurs

Microphones et haut-parleurs sont des composants un peu particuliers mais tellement indispensables pour assurer la transmission de la parole. Microphones et haut-parleurs ne font pas partie du cours HAREC, mais que serait un récepteur sans haut-parleur²³ ? que serait un émetteur sans-micro²⁴ ?

2.11.1. Microphones

La fonction d'un microphone est de capter les ondes sonores et de les transformer en signal électrique.

2.11.1.1. Caractéristiques des microphones

Les microphones se caractérisent par

- leur directivité, on distingue
 - les micros omnidirectionnels
 - les bidirectionnels (en huit)
 - les cardioïdes
 - les hypercardioïdes : encore plus pointu
- la sensibilité d'un micro est exprimée en V/Pa c'est-à-dire le rapport entre la tension fournie et la pression acoustique²⁵. Mais on fait plus souvent référence à un niveau de $0 \text{ dB}_{\text{SL}} = 20 \text{ mPa} = 1 \text{ pW/m}^2$. Ce qui amène à donner la sensibilité en $\text{dB}_{\text{V/mbar}}$ ou en $\text{dB}_{\text{V/mPa}}$. Les valeurs se situent entre -50 et -90 dB/Pa. Ainsi un micro de -53 dB ²⁶ fournit une tension de $2,24 \text{ mV/Pa}$ ²⁷
- la courbe de réponse en fréquence
- l'impédance

Les deux types de microphones les plus répandus sont les micros dynamiques et les micros électret.

2.11.1.2. Les microphones dynamiques

Dans un microphone dynamique, les variations de pression acoustique produisent le déplacement d'une membrane qui à son tour fait déplacer une bobine dans un champ magnétique. Le processus du micro dynamique est exactement l'inverse d'un haut-parleur.

Un microphone électrodynamique est formé d'une bobine de plusieurs spires qui se déplace dans l'entrefer d'un puissant aimant. Cette bobine est solidaire d'une membrane fine qui mesure parfois moins d'un cm^2 .

Cet ensemble que l'on appelle parfois "capsule" est montée dans un boîtier.

L'impédance d'un tel microphone se situe entre 100 et 600 Ω .

Le niveau de sortie est de 1,5 à 2,5 mV/Pa (soit -57 à -54 dBV).

Dans les applications professionnelles, tous les micros sont utilisés en mode symétrique, par conséquent toute induction (entre autre à 50 Hz) sur un des fils aura également lieu sur

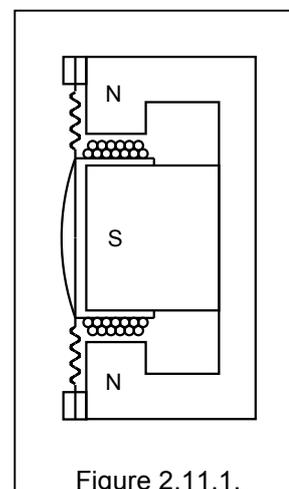


Figure 2.11.1.

²³ Haut-parleur ou casque à écouteurs, les principes restent les mêmes !

²⁴ Vous allez dire que j'oublie les télégraphistes, j'en suis sûr, mais il n'y a pas que la télégraphie !

²⁵ L'unité de pression est le Pascal (Pa). Un Pa correspond à la pression exercée par 1 N sur une surface de 1 m^2 . Mais on est plus souvent confronté avec la pression barométrique exprimée en mm Hg, 1mm Hg = 133,22 Pa. Dans un autre domaine d'application on fait référence à la pression de l'eau, exprimée en bar : une colonne d'eau de 10 m représente 1 bar ou 100000 Pa.

²⁶ Remarquez que dans la plupart des cas il s'agit de "dB" sans rien préciser d'autres ... et que la référence est le Volt. Ainsi

-100 dB	-90 dB	-80 dB	-70 dB	-60 dB	-50 dB	-40 dB	-20 dB	0 dB
0,01 mV	0,0316 mV	0,1 mV	0,316 mV	1 mV	3,16 mV	10 mV	100 mV	1 V

²⁷ $U = 1 \text{ V} \times 10^{(-53/20)} = 1 \text{ V} \times 2,24 \cdot 10^{-3} = 2,24 \text{ mV}$

l'autre fil et grâce au transformateur à l'entrée de l'équipement (l'amplificateur), ces signaux parasites seront rejetés. Malheureusement, (presque) tous les transceivers commerciaux ont des entrées asymétriques !

2.11.1.3. Les microphones électrets

Les microphones électret sont dérivés de microphones électrostatiques. Toutefois les micros électret n'ont pas besoin d'une haute tension pour fabriquer des charges. Dans la littérature anglaise, **electrets** désigne des corps qui après avoir été soumis à des champs électriques intenses conservent cette charge, même quand le champ d'origine a été supprimé. Des matériaux tels certains polycarbonates métallisés, le téflon ou le mylar sont de électrets. Cette propriété se perd avec la température et l'humidité. C'est pourquoi certains micros électrets s'arrêtent parfois soudain de fonctionner sans raison apparente ...

C'est actuellement le microphone le plus répandu.

Un micro électret nécessite une tension d'alimentation (1 à 12 V avec une consommation de 1 mA ou moins) qui sert à l'alimentation de l'amplificateur FET incorporée dans la capsule du micro.

Il existe des capsules à 2 contacts ou à 3 contacts.

Le schéma ci-contre représente un micro électret à 2 contacts. Les connexions se présentent sous forme de deux demicercles, le côté négatif présente une petite languette supplémentaire. R1 est la résistance d'alimentation, C1 le condensateur de découplage et R2 la résistance de charge. Parfois R1, R2 et C1 sont intégrés dans le microphone, parfois pas. Dans certains cas on trouve aussi la connexion "a".

Un micro électret présente une impédance de 1 à 10 k Ω

Le niveau de sortie se situe aux environs de 20 à 30 mV/Pa (soit -34 à -30 dBV) .

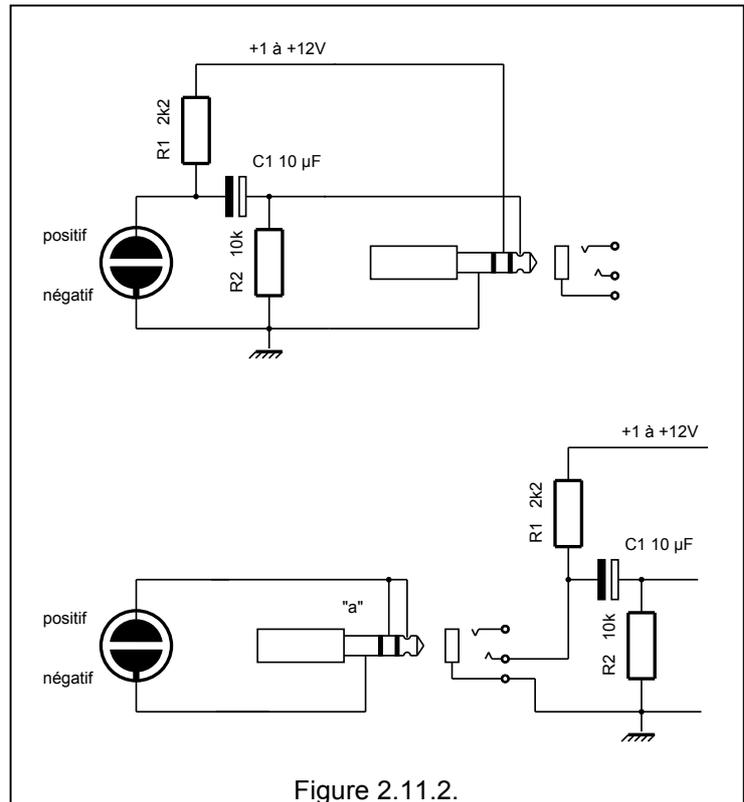


Figure 2.11.2.

2.11.2. Haut-parleur

2.11.2.1. Le haut parleur électrodynamique

Le haut parleur est constitué d'

- une **membrane** suspendue dans une structure, et c'est cette membrane qui en se déplaçant va produire des pressions et des dépressions de l'air, c-à-d des ondes sonores
- une **bobine mobile** solidaire de la membrane, c'est elle qui va faire déplacer la membrane, c'est le "moteur"
- un **aimant permanent** qui va créer le champ magnétique

La puissance électrique varie de 0,1 W à une centaine de Watts. La sensibilité est la pression mesurée à 1 m du haut parleur elle se situe entre 85 dB/ Wm (pour les plus petits HP) à 110 dB Wm (pour les HP de sonorisation). Le rendement des HP est relativement faible et se situe entre 0,5 % (pour les petits HP) à 20 % pour les HP de sono. La plus grosse partie de l'énergie est donc dissipée en chaleur dans la bobine.

L'impédance des HP est normalisée et donnée à 1 kHz, on trouve entre autre des valeurs de 4, 8 et 16 Ω .

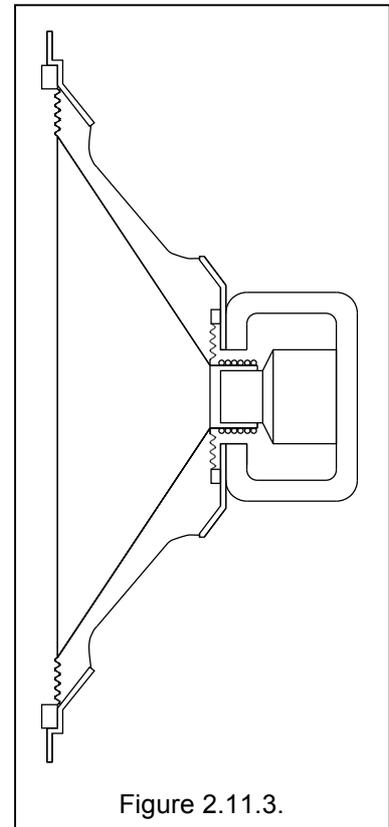


Figure 2.11.3.

La réponse dans la partie basse du spectre dépend essentiellement du diamètre du haut parleur.

Pour les fréquences élevées c'est plutôt la masse du cône qui devient déterminante.

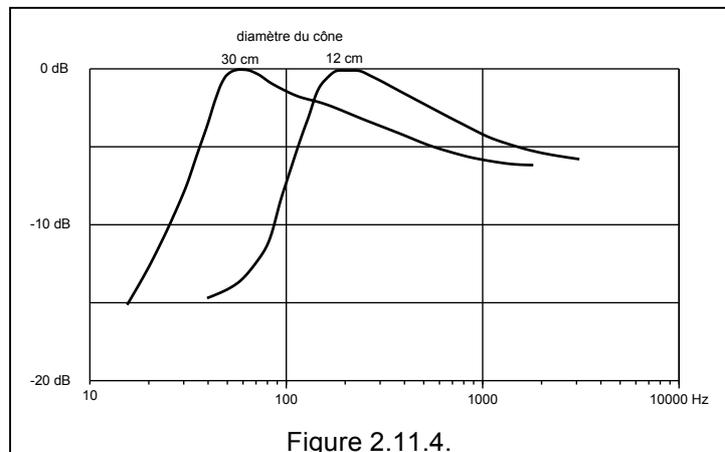


Figure 2.11.4.

2.11.2.2. Dispositifs acoustiques

Lorsque la membrane se déplace vers l'avant (par exemple) il se produit une compression sur la face avant et une dépression sur la face arrière. Une partie de l'air comprimé à l'avant contourne le cône et vient combler une partie de la dépression à l'arrière. Il s'ensuit une sorte de "court circuit acoustique" qui est d'autant plus marqué que la fréquence est basse. Pour éviter ce phénomène, on monte le haut parleur sur un écran. Cet écran est constitué par exemple par un panneau de bois ou par le boîtier du récepteur.

Idéalement la distance "a" devrait être égale à $\lambda/2$. Ainsi pour une fréquence de 100 Hz

$$\lambda/2 = 340^{28} / 2 \times 100 = 1,7 \text{ m}$$

ce qui est évidemment assez imposant !

Mais il existe de nombreux dispositifs plus sophistiqués tels que les baffles repliés, les enceintes closes, les bass-reflex et les labyrinthes acoustiques qui permettent d'obtenir d'excellentes performances.

Dans un récepteur (ou dans un émetteur-récepteur) de radioamateur c'est le châssis de l'appareil qui joue le rôle de baffle. Un meilleur confort d'écoute est obtenu en utilisant un casque à écouteurs.

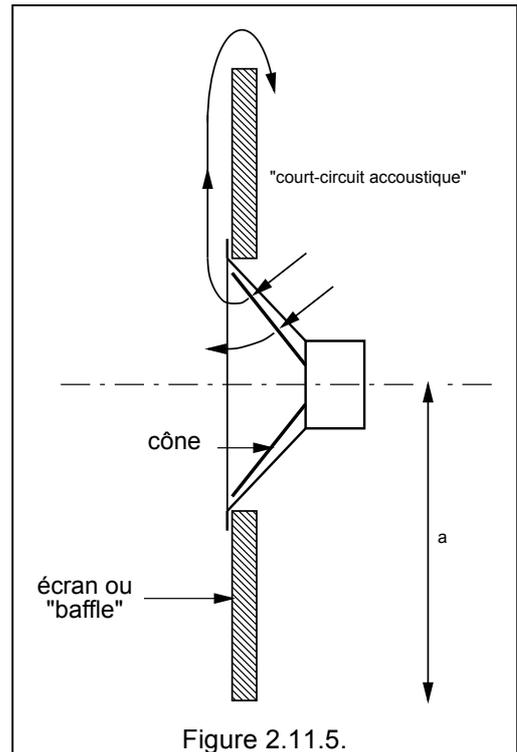


Figure 2.11.5.

2.11.2.3. Mise en série et mise en parallèle

Pour de fortes puissances on peut mettre des hauts parleurs en série ou en parallèle ou en série-parallèle²⁹. En général on ne met que des hauts parleurs de mêmes caractéristiques (impédance, puissance, courbe de réponse) dans ces montages.

Il faut de plus qu'ils soient en phase c-à-d qu'à l'alternance positive (par exemple) toutes les bobines mobiles aillent dans le même sens³⁰.

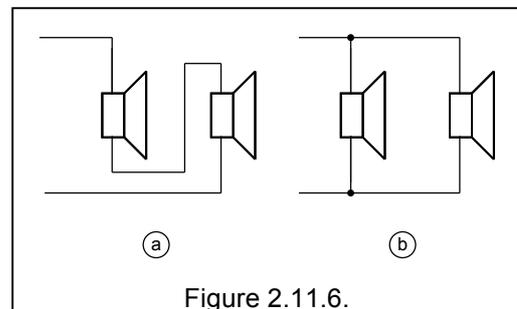


Figure 2.11.6.

²⁸ La vitesse du son dans les conditions normales de température et de pression est de 340 m/s !

²⁹ Les impédances résultantes se calculent comme pour les résistances : mise en série $Z = Z_1 + Z_2 + \dots$ mise en parallèle $1/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2 + 1/Z_3 + \dots$

³⁰ On peut vérifier cela "visuellement" à l'aide d'une pile de 1,5 V. Mais certains hauts parleurs ont déjà un repérage par couleur.

2.11.2.4. Woofers, medium et tweeters

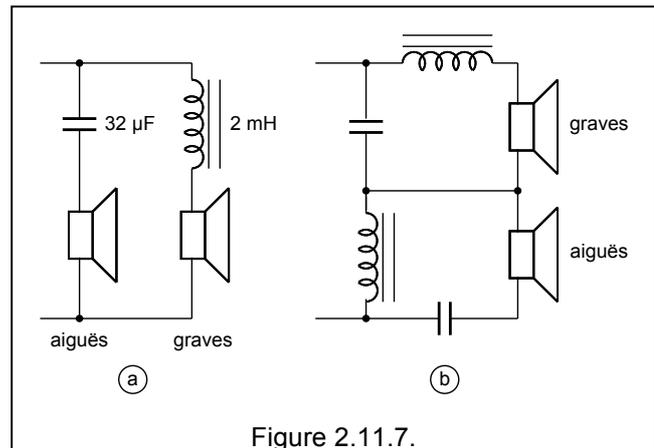
Lorsqu'il s'agit d'installation haute fidélité, on utilise plusieurs types de HP, chacun reproduit une partie du spectre :

- les subwoofers ...les fréquences inférieures à 100 Hz
- les woofers (ou boomers) ... les fréquences graves entre 100 Hz et 3 kHz
- les mediums ... entre 400 Hz et 6 kHz, ils sont souvent utilisés comme "haut-parleur à tout faire" lorsqu'on ne recherche pas la qualité Hi-Fi, c'est également ce genre de haut parleur que l'on retrouve dans les récepteurs de radio amateur.
- les tweeters, les fréquences aiguës de 3 à 20 kHz et certains vont même jusqu'à 35 kHz !

Il faut alors utiliser un filtre pour aiguiller la partie correspondante du spectre au bon haut parleur. La figure a représente un filtre simple avec un condensateur et une self. Pour une impédance de 4Ω et une fréquence de 1000 Hz, on trouve des valeurs de $32 \mu\text{F}$ et de 1 mH . Le condensateur doit être du type "non polarisé" et pour la self on peut soit réaliser une self à air, soit avec un pot ferrocube.

La figure b représente un système avec deux filtre LC, ce qui permet d'obtenir une atténuation de 10 dB par octave.

Notez aussi qu'un haut parleur est réversible et on peut en faire un microphone électrodynamique !



2.11.2.5. Les casques à écouteurs

On y trouve le même genre de transducteur courant électrique/pression acoustique que dans les hauts parleurs, mais de dimension beaucoup plus réduite, puisque "la caisse de résonance" ne mesure que quelques cm.

2.12. La soudure et les fers à souder

2.12.1. La soudure vue sous l'aspect "métallurgie"

Ce paragraphe est aussi très important, car tout montage fait appel à la soudure.

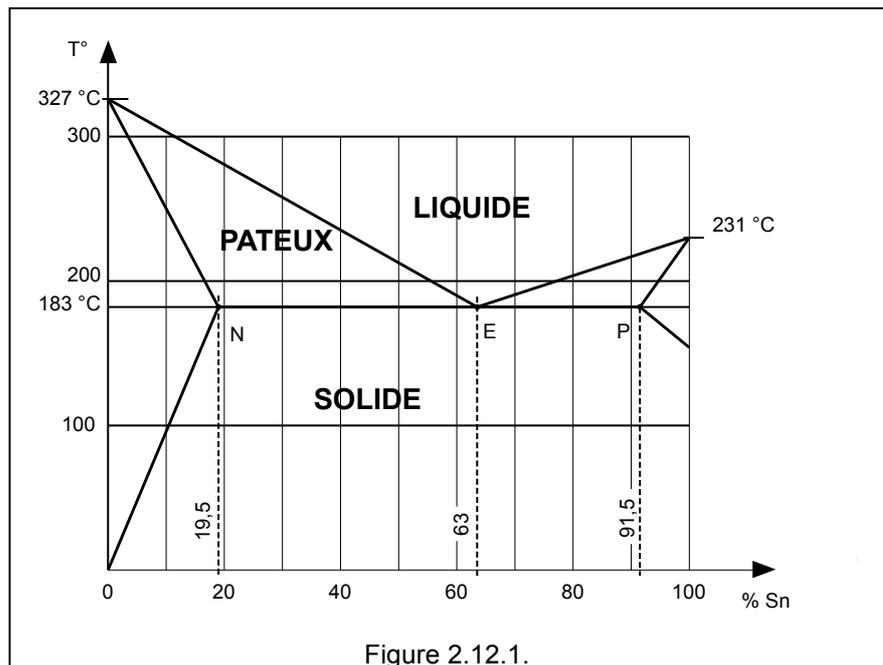
On entend par soudure l'opération qui consiste à assembler, par une micro opération métallurgique deux pièces métalliques A et A' en y interposant un alliage B fondant à une température beaucoup plus basse que les métaux à assembler.

Température de fusion du cuivre (Cu) 1083 °C
du plomb (Pb) 327 °C
de l'étain (Sn) 231 °C

Il faut que le métal des pièces à souder s'allie avec l'alliage fondu en se dissolvant partiellement dans la soudure.

En fait il faut que l'attraction des atomes de soudure pour les atomes de métal à assembler soit plus grande que l'attraction des atomes de soudure entre eux. L'étain est le métal qui répond à cette condition.

En métallurgie on a l'habitude de dessiner un diagramme de fusion, et pour l'alliage étain-plomb, ce diagramme est représenté ci-contre

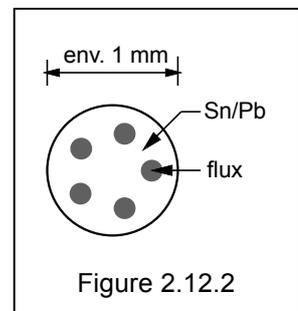


Pour tous les alliages dont la teneur en Sn est comprise entre 19,5% (point N) et 91,5% (point P), la **température de fusion est de 183 °C**, de tous les alliages Sn-Pb, c'est l'alliage qui contient 63% de Sn qui possède la température de fusion la plus basse et qui passe sans transition de l'état liquide à l'état solide. Un alliage qui a la propriété de passer de l'état solide à l'état liquide sans passer par l'état pâteux s'appelle un **eutectique**, c'est le point E du diagramme. La soudure utilisée en électronique contient donc 63% d'étain et 37% de plomb.

La soudure se présente sous forme de fil. Pour l'électronique courante on emploie généralement de la soudure de 0,8 ou de 1 mm de diamètre. Pour la soudure de pièce plus importante (connecteur, boîtier, gros câble, ...) on peut utiliser un diamètre plus important.

Les pièces à souder sont très souvent recouvertes d'une mince couche d'oxyde. Celle-ci empêche la diffusion des atomes des pièces à souder, c'est pourquoi on ajoute du flux décapant sous forme de petits canaux dans le rouleau de soudure.

Si la température de fusion de l'alliage 63% Sn et 37% de Pb est de 183°C, il était néanmoins courant d'utiliser un fer à souder réglé³¹ entre 300° et 450°C.



³¹ Il s'agit ici des stations de soudage avec contrôle électronique de la température.

2.12.2. RoHS et la soudure sans plomb

La directive européenne **RoHS** (Restriction of hazardous substances) (2002/95/CE) vise à limiter l'utilisation de substances dangereuses³² parmi lesquelles le plomb qui attaque le système nerveux, les reins, ... En ce qui concerne les applications électriques et électroniques, les accumulateurs au plomb représentent 79 % des applications, les munitions 5% et la soudure environ 0,6%. Les circuits de recyclage des accumulateurs au plomb est bien établi, et la directive RoHS vise à interdire la soudure classique 63/37 (63% d'étain et 37% de plomb) à partir de juillet 2006 et la remplacer par un nouvel alliage composé de

étain (Sn) 95 à 96 % + argent (Ag) 3 à 4% + cuivre (Cu) 0,5 à 0,7 %

La soudure sans plomb possède une température de fusion plus élevée soit **220°C** au lieu de 180°C.

2.12.3. Fers à souder

Les fers à souder qui seront habituellement utilisés possèdent une puissance de 15 Watts (la plupart des petites soudures) à 150 Watts (soudure de fiches PL259, réalisation de boîtier en tôle galvanisée, soudure de mises à la masse,...). Les fers à souder à régulation de température sont à conseiller : on trouve des fers à souder à régulation continue entre 50 et 400°C et des fers à souder à régulation par magnastat, dans ce dernier cas, la température est fixée par la panne qui est livrée.

La panne est en cuivre à cause de sa grande conductibilité thermique, mais elle a tendance à se dissoudre au fur et à mesure que l'on soude, c'est ainsi que l'on a mis au point des pannes en alliages spéciaux, ou avec des traitements métallurgiques spéciaux. Il est évident que les pannes qui ont subies un traitement de surface spécial ne peuvent pas être "limées" ou brossées avec une brosse en fer. Elles doivent être nettoyée à chaud, sur une éponge humide.

Il faut choisir la panne en fonction du travail à effectuer, d'une façon pratique, la panne doit être environ deux fois plus grosse que la section des fils ou des composants à assembler.

A conseiller pour un débutant : Acquérir dans l'ordre

1. un fer à souder d'une puissance de 50 Watts environ avec régulation de température et une fine panne (par exemple les fers à souder de la marque Weller). Ce fer à souder sera votre fer à souder principal.
2. une deuxième "grosse panne" pour ce fer. Cette panne servira à souder des boîtiers en fer blanc, de grosses cosses, etc. ...
3. un fer à souder de 100 à 150 Watts avec une régulation du type "magnastat" par exemple. Ce fer servira à la soudure des fiches PL259 par exemple.

Si vos moyens sont limités, commencer alors plutôt par un fer à souder sans régulation de 25 Watts, muni d'une panne fine ordinaire.

Veiller à

- travailler avec une panne propre et bien étamée pour faciliter la soudure.
- éviter les excès de soudure.
- porter d'abord les pièces à souder à une température assez élevée avec le fer à souder avant de mettre la soudure en contact avec la panne.

32 Parmi ces substances il y a le plomb, le mercure, le cadmium, le chrome hexavalent, les polybromobiphényles (PBB) et les polybromodiphényléthers (PBDE).

2.13. Les techniques de montages

Il ne suffit pas d'avoir des composants, il faut aussi pouvoir les assembler, voila pourquoi nous terminerons ce chapitre par les techniques de montage.

2.13.1. Le câblage de circuits à tubes

Dans les montages à tubes, on câble généralement les éléments (résistances, condensateurs, ...) "en volant" entre les cosses des tubes et des réglettes appelées "cosses relais". On utilise également du fil de câblage pour effectuer les différentes liaisons.

2.13.2. Les circuits imprimés

Lorsque sont apparus les transistors, les circuits sont aussi devenus plus complexes, c-à-d qu'ils comportaient plus de composants. De plus, les quantités d'appareils produits devenaient de plus en plus grande. C'est pourquoi on a eu recours aux **circuits imprimés** (Printed Circuit Board ou PCB) qui assurent le montage mécanique des composants ainsi que les connexions électriques. Un circuit imprimé consiste en une plaque de matière isolante encore appelé **substrat** constitué, soit,

- de papier imprégné de formaldéhyde de phénol encore connu sous le nom commercial de **pertinax** ou sous la désignation **FR-2**, de couleur brun clair, dont l'odeur est caractéristique et qui ressemble un peu à la bakélite
- ou fibre de verre ou **époxy** ou sous la désignation **FR-4**, d'une épaisseur de 1,6 mm (mais on trouve aussi de 0,8 mm) qui est probablement le matériau le plus utilisé.
- mais pour les micro-ondes, les circuits imprimés en pertinax ou à base de fibre de verres ont trop de pertes, on utilise alors d'autres matériaux tels que le téflon ou la céramique. L'une de ces matières est connue sous l'appellation commerciale de **duroid**
- enfin, pour certaine application, on a développé des circuits imprimés flexibles, qui permettaient de s'adapter aux formes (parfois bizarres) de l'intérieur des boîtiers des appareils photographiques, des caméras ou de l'intérieur des véhicules automobiles

Cette plaque est recouverte d'une couche de cuivre d'une épaisseur de 35 μm (mais on trouve aussi des épaisseurs de 70 μm ou de 140 μm pour des "courants forts"). Cette couche va être découpée, ou plus précisément attaquée chimiquement, de sorte à former des circuits électriques.

Avec une seule face, on est rapidement confronté au problème des croisements de pistes, mais si le nombre de ces croisements n'est pas trop important, on peut utiliser des jumpers, c-à-d des petits morceaux de fil nu. Une autre solution consiste à utiliser les 2 faces du support de base, on parle alors de circuit à 2 couches. Et pour des montages plus complexes encore, on peut ajouter des couches intermédiaires et atteindre ainsi plus de 28 couches ! On peut alors alterner les couches de masses, les couches d'alimentations, et les couches véhiculant les signaux.

Le circuit imprimé est percé de trous afin de pouvoir placer les composants. Les trous standard ont un diamètre de 0,6 à 0,8 mm. Lorsqu'il s'agit de circuit imprimé à 2 ou plusieurs couches on métallise les trous de façon à établir à certains points des contacts électriques entre les deux couches, on appelle ces trous des **vias**. Cette permet aussi une soudure des éléments. Il existe aussi des rivets permettant de réparer des circuits imprimés endommagés ou de réaliser des petites séries.

L'avantage principal du circuit imprimé est sa grande reproductibilité, la suppression d'une grosse partie du câblage. Les circuits imprimés permettent aussi de rendre disponible des kits de montage pour le bricoleur et l'amateur (voir par exemple Velleman, Elektor, FAR CIRCUITS, ...).

De plus, le circuit imprimé peut être découpé de façon à s'adapter aux espaces disponibles à l'intérieur des appareils, toutefois il existe deux format normalisé : l'eurocarte (160 x 100 mm) et la double eurocarte (233 x 160 mm).

La grille de perçage est normalisée au pas de 1/10ème de pouce soit 2,54 mm. Tous les composants sont également normalisés au pas de 2,54 mm. Certains composants tels que les connecteurs audio (encore

appelés "DIN"), les connecteurs DBxx, les connecteurs USB sont fournis en version spéciales pour être fixé directement sur un circuit imprimé.

2.13.2.1. Réalisation pour l'expérimentateur et le radioamateur

1) la méthode "du beau circuit imprimé"

- 1) la première étape consiste à réaliser un transparent encore appelé **typon**, il existe plusieurs solutions :
 - on peut dessiner le circuit sur du papier calque, avec des pastilles à transférer (Alfac ou Mecanorma) et des bandes pour effectuer les pistes
 - certains magazines électroniques publient les circuits imprimés, il suffit alors de le photocopier sur un film transparent.
 - avec un logiciel permettant de créer des dessins de circuits imprimés tels que CIRCAD, EAGLE. Ces logiciels produisent non seulement le plan du circuit imprimé, mais également le plan d'implantation des composants, la liste des composants, le plan de perçage et ils sont parfois aussi couplés au logiciel de dessin du circuit. Les étapes consistent
 - à établir un schéma électrique
 - à établir une **netlist** c-à-d un fichier texte qui résume toutes les connexions électriques d'un circuit. on obtient alors un diagramme appelé "chevelu" qui permet de voir les connexions,
 - à procéder au routage soit manuel soit grâce à la fonction **auto routage**, soit à une combinaison des méthodes manuelles et d'auto routage (ce qui donne souvent les meilleurs résultats)
 - et lorsque tout est terminé, on peut alors **imprimer** un film avec une imprimante à jet d'encre au moins 300 dpi

Notons que le typon est en négatif : il est noir là où le cuivre reste !

Quelques conseils de "design" :

- essayer d'orienter tous les CI dans le même sens
 - essayer d'aligner les résistances et les condensateurs
 - mettre tous les connecteurs d'un seul côté (si possible)
 - vérifier 36 x le montage, car l'erreur n'est pas pardonnable et une "réparation" (couper une piste et mettre des petits bouts de fils) n'est pas esthétique et est difficilement réalisable sur des productions en grande série.
 - les pistes véhiculant du 220 V doivent être séparée de 3 mm au moins, et la distance par rapport aux autres pistes doit également être supérieure à 3 mm
 - tout ce qui a été dit à propos de la loi de Pouillet et de la loi d'Ohm reste valable. La résistance d'une piste de $35 \mu\text{m}$ est $R = 46 \cdot 10^{-5} \times L / l$ où R est la résistance en ohms, L est la longueur de la piste en mm et l la largeur de la piste en mm.
- 2) il faut alors soit utiliser
 - un circuit imprimé présensibilisé (par exemple de la marque Bungard)
 - soit déposer une couche de vernis photosensible (par exemple du Positiv 20 de la marque Kontakt Chemie) sur un morceau de circuit imprimé propre
 - 3) déposer le typon sur le circuit imprimé pré sensibilisé, le maintenir correctement en place et l'insoler avec de la lumière UV on peut utiliser soit un tube TL actinique produisant une lumière violette, soit une simple ampoule de 100 à 250 W à une distance d'environ 30 cm
 - 4) procéder à la révélation à l'aide d'une solution de soude caustique (NaOH) (7 g/litre), on enlève ainsi le verni sensible là où il a été insolé, c-à-d sur les parties qui devront être attaquées dans la phase suivante.
 - 5) procéder à la gravure proprement dite à l'aide de
 - (per)chlorure de fer (FeCl_3) (400 g/l)
 - persulfate d'ammonium (250 g/l)
 - persulfate de sodium (250 g/l).

Tous ces produits fonctionnent mieux à une température de l'ordre de 40°C.

- 6) réaliser le perçage: on utilise une mèche de 0,8 mm pour tous les composants ordinaires et une mèche de 1,2 ou 1,5 pour les potentiomètres ou les gros condensateurs. Il existe des forets en acier rapide (HSS) et des forets au carbure d'une durée de vie beaucoup plus grande, qui donnent une meilleure finition mais qui sont très fragile (attention aux vibrations longitudinales). La vitesse doit être relativement élevée (> 10.000 tours/minutes), une mini perceuse sur colonne est hautement conseillée.

Il est impératif de prendre des précautions lors de la manipulation de tous ces produits chimiques et d'aérer convenablement le local !

2) Les plaquettes pastillées

On peut aussi utiliser des cartes pré forées et présentant des pastilles ("îlots") pour chaque trou. On réalise alors les connexions en mettant assez de soudure que pour court-circuiter ces îlots.

3) La méthode 'ugly'

Elle consiste à utiliser un circuit imprimé comme plan de masse, de mettre la face cuivre vers le haut et de souder tout ce qui peut aller à la masse sur ce circuit imprimé et à coller le reste. Les circuits intégrés sont mis sur le dos et collés sur le circuit imprimé. Toutes les autres connexions sont réalisées en volant. Ce n'est pas toujours très joli (d'où le "ugly"), on ne peut plus vraiment parler de circuit "imprimé", mais c'est efficace et rapide.

Certains utilisent le circuit imprimé pour confectionner des boîtiers blindés ... pourquoi pas !

4) le "breadboard" ou "socket board"

Dans les tous premiers temps, les bricoleurs ont utilisés des "planches à clous", en fait il s'agissait d'un morceau de bois ("une planche à pain") sur lequel il y avait des clous et les fils de connexions des composants étaient entourés autour de ces clous.

Le breadboard actuel est un dispositif un peu plus sophistiqué qui comporte des rangées de contacts (4 à 6) acceptants les circuits intégrés et les composants (résistance, condensateurs, ...). Mais ceci ne convient évidemment que pour le développement de prototypes. Vu ses capacités parasites, le breadboard ne convient pas pour des montages haute fréquence.

2.13.2.2. Réalisations professionnelles

Pour les réalisations semi professionnelles ou professionnelles, on passe directement le projet (le circuit établi avec un programme ad hoc) à un fabricant de circuit imprimé.

Les circuits imprimés professionnels sont également vernis pour protéger les pistes de cuivre de l'oxydation et sérigraphiés pour y représenter les composants et leur référence.

2.13.3. Le montage en surface

La technologie du circuit imprimé a perpétué cette habitude, jusqu'au moment où, d'une part à cause de la faible consommation des circuits, d'autres part à cause de la demande de réaliser des circuits de plus en plus denses (plus de composants / cm²) on est arrivé au concept des CMS qui pourrait se traduire en une phrase "**au lieu de faire des trous et de souder, soudons directement le composant sur les pistes**".

Les avantages des CMS sont les suivants:

- plus de trous dans les circuits imprimés (un trou coûte environ 0,025 €, il y a en général un millier de trous sur un circuit imprimé de 100 x 160 mm !),
- plus besoin de plier fils,
- plus de déchet de fil (un déchet d'environ 3 cm par résistance !),
- moins de soudure (les surfaces à souder sont plus petites).
- grande densité de composants possible

Un inconvénient est que le montage pour des amateurs (entendez par là des amateurs d'électroniques et les radioamateurs qui bricolent ...) est moins facile. Le dépannage est aussi moins facile, mais l'expérience montre que ce ne sont en général pas les montages à CMS sont 10 x plus fiables que les autres ! Un autre inconvénient est qu'il faut quelques outils spéciaux (fer à souder; pincettes, grattoir, loupe ...), de la colle pour maintenir le CMS et une soudure spéciale.

En fait il existe non seulement des résistances CMS, mais aussi des condensateurs CMS, des selfs CMS, des diodes CMS, des transistors CMS, des circuits intégrés CMS, des piles CMS, des circuits imprimés dessinés pour recevoir des composants CMS, etc ... c'est pourquoi on parle de "technologie des CMS".

Pour faire une résistance CMS on part d'un support en céramique, sur lequel on dépose un film métallique. Ce film est connecté à deux terminaisons.

Une résistance CMS est capable de dissiper 0,1 W et mesure 1,5 mm x 3 mm, parfois un peu moins. On trouve les valeurs de 1 ohm à 10 Mohm et aussi des jumpers ("0 ohm"). La série standard est la E24 (5%).

Les composants CMS sont livrés

- sur un rouleau qui comporte une petite bulle de plastic, chaque "bulle" contient une résistance CMS. Cette présentation convient pour les chaînes de montage automatique.
- dans des boîtes de rangement en plastic, cette présentation convient pour les laboratoires de développement ou de dépannage.

Lors de l'assemblage automatique des circuits imprimés, les CMS reçoivent une toute petite goutte de colle en dessous du composant et deux petites gouttes de soudure en pâte sur les faces à souder. La machine spéciale met tous les composants en place. Le circuit imprimé garni de tous ses composants est légèrement chauffé (x °C). A ce stade la colle devient dure et maintient les composants en place. Il est encore possible à ce stade de modifier certaines petites erreurs. Ensuite on applique de l'air plus chaud (x °C) ce qui fait fondre la soudure.

2.14. Le programme HAREC

Que faut-il connaître d'après le programme HAREC ?

CHAPITRE 2 2. COMPOSANTS

Vilnius
2004³³

2.1 Résistance

- Résistance
- L'unité : l'Ohm
- Caractéristiques courant/tension
- Puissance dissipée
- Coefficient de température positive et négative [CTP et CTN]

-

2.2 Condensateur

- Capacité
- L'unité : le farad
- La relation entre capacité, dimensions et diélectrique (aspect qualitatif uniquement)
- La réactance [$X_C = 1 / 2 \pi f C$]
- Déphasage entre la tension et le courant
- Caractéristiques, des condensateurs, condensateurs fixes et variables : à air, au mica, au plastique, à la céramique et condensateurs électrolytiques
- Coefficient de température
- Courant de fuite
- Facteur de qualité Q

-

-

-

+

2.3 Bobine

- Bobine d'induction
- L'unité : le henry
- L'effet du nombre de spires, du diamètre, de la longueur et de la composition du noyau (effet qualitatif uniquement)
- La réactance : [$X_C = 2 \pi f L$]
- Déphasage entre la tension et le courant
- Facteur Q
- L'effet de peau
- Pertes dans les matériaux du noyau

-

-

2.4 Application et utilisation des transformateurs

- Transformateur idéal : [$P_{\text{prim}} = P_{\text{sec}}$]
- La relation entre le rapport du nombre de spires et le rapport des tensions
- le rapport des courants:
- le rapport des impédances (aspect qualitatif uniquement)
- Les transformateurs

2.5 Diode

- Utilisation et application des diodes
- Diode de redressement, diode Zener, diode LED [diode émettrice de lumière], diode à tension variable et à capacité variable [VARICAP]
- Tension inverse, courant, puissance et température

2.6 Transistor

- Transistor PNP et NPN
- Facteur d'amplification
- Transistor effet champ [canal N et canal P J-FET]
- La résistance entre le courant drain et la tension porte
- Le transistor dans :
- Le circuit émetteur commun [source pour FET]

-

³³ Cette colonne indique la nouvelle matière ajoutée ou supprimée lors de la réunion CEPT de 2004.

- Le circuit base commune [source pour FET]
- Le circuit collecteur commun [drain pour FET]
- Les impédances d'entrée et de sortie des circuits précités
- Les méthodes de polarisation

-

2.7 Divers

- Dispositif thermoionique simple [valve]
- Circuits numériques simples
- Tensions et impédances dans les amplificateurs haute puissance à tubes, transformation d'impédance
- Circuit intégrés simples (y compris les amplificateurs opérationnels)

-

+

+

2.15b. Table des matières

2.5. Les diodes	1
2.5.1. Généralités.....	1
2.5.2. Les semi-conducteurs.....	2
2.5.3. Caractéristiques des diodes.....	5
2.5.4. Les fonctions des diodes	5
2.5.5. Courbe caractéristique de la diode	6
2.5.6. Les types de diodes à semi-conducteurs.....	7
2.5.6.1. Les diodes à pointe	7
2.5.6.2. Les diodes à jonction pour faible signal	8
2.5.6.3. Les diodes de redressement	9
2.5.6.4. Les diodes doubles et les ponts redresseurs	10
2.5.6.5. Les diodes zéners	11
2.5.6.6. Les varicaps	12
2.5.6.7. Les varactors.....	13
2.5.6.8. Les diodes Schottky ou "hot carrier-diode"	14
2.5.6.9. La diode tunnel ou la diode gunn	14
2.5.6.10. Les diodes PIN	15
2.5.6.11. Les diodes LED	16
2.5.6.12. Les diodes génératrices de bruit	18
2.5.7. Les redresseurs à l'oxyde cuivreux et les redresseurs au sélénium.....	19
2.6. Les transistors	20
2.6.1. Généralités.....	20
2.6.2. Les transistors bipolaires à jonction	20
2.6.3. Caractéristiques des transistors bipolaires	21
2.6.4. Fabrication des diodes et des transistors	22
2.6.4.1. Par alliage:	22
2.6.4.2. Par diffusion:	22
2.6.4.3. Mesa:.....	22
2.6.4.4. Transistor planar:	22
2.6.4.5. Transistor épitaxial:	22
2.6.5. Les caractéristiques du transistor	23
2.6.5. Les 3 montages amplificateurs	26
2.6.6. Les méthodes de polarisation	27
2.6.7. Les transistors à effet de champ à jonction (JFET)	28
2.6.8. Les transistors MOSFET.....	30
2.6.9. Les transistors MOSFET à double grille	32
2.6.10. Codage des semi-conducteurs	33
2.7. Autres dispositifs semi-conducteurs	34
2.7.1. Les amplificateurs opérationnels	35
2.7.2. Les MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits).....	39
2.7.4. Les modules de puissance RF.....	40
2.7.4. Les thyristors.....	41
2.7.5. Les triacs.....	43
2.7.6. Les photodiodes et phototransistors	44
2.7.7. Les optocoupleurs.....	44
2.7.8. Les relais statiques	44
2.7.9. Les régulateurs de tension.....	45
2.7.10. Les circuits intégrés digitaux.....	45
2.8. Les tubes électroniques.....	46
2.9. Les circuits logiques	47
2.9.1. Généralités.....	47
2.9.2. Les portes	47
2.9.2.1. L'inverseur (NOT)	47
2.9.2.2. La porte ET (AND).....	48
2.9.2.3. La porte OU (OR).....	49
2.9.2.4. La porte OU exclusif (XOR).....	49
2.9.2.5. La porte NON ET (NAND).....	50

2.9.2.6. La porte NON OU (NOR)	50
2.9.2.7. Application pratique	51
2.9.2.8. Nombre d'entrées d'une porte	51
2.9.3. Les bascules ou flip-flop	52
2.9.3.1. Le flip-flop R S	52
2.9.3.2. Le flip flop type JK master slave	53
2.9.3.3. Le flip flop D	54
2.9.3.4. Le flip-flop T ou bistable	54
2.9.3.5. Symbolisation	55
2.9.4. Les registres à décalage	56
2.9.5. Les compteurs ou diviseurs	57
2.9.6. Les décodeurs	58
2.9.7. Les comparateurs	58
2.9.8. Les multiplexeurs et les démultiplexeurs	58
2.9.9. Autres fonctions	58
2.9.10. Les mathématiques des circuits logiques	59
2.9.11. Les différentes technologies de circuits logique	60
2.9.11.1. La technologie TTL	60
2.9.11.2. La technologie CMOS	63
2.9.11.3. La technologie ECL	63
2.10. Les quartz	64
2.11. Microphones et haut-parleurs	66
2.11.1. Microphones	66
2.11.1.1. Caractéristiques des microphones	66
2.11.1.2. Les microphones dynamiques	66
2.11.1.3. Les microphones électrets	67
2.11.2. Haut-parleur	68
2.11.2.1. Le haut parleur électrodynamique	68
2.11.2.2. Dispositifs acoustiques	69
2.11.2.3. Mise en série et mise en parallèle	69
2.11.2.4. Woofers, medium et tweeters	70
2.11.2.5. Les casques à écouteurs	70
2.12. La soudure et les fers à souder	71
2.12.1. La soudure vue sous l'aspect "métallurgie"	71
2.12.2. RoHS et la soudure sans plomb	72
2.12.3. Fers à souder	72
2.13. Les techniques de montages	73
2.13.1. Le câblage de circuits à tubes	73
2.13.2. Les circuits imprimés	73
2.13.2.1. Réalisation pour l'expérimentateur et le radioamateur	74
2.13.2.2. Réalisations professionnelles	75
2.13.3. Le montage en surface	76
2.14. Le programme HAREC	77
2.15b. Table des matières	79