

Institut Supérieur des Études Technologiques de Radès

Département de Génie Électrique

TECHNOLOGIE GÉNÉRALE

Support de cours

*3^{ème} et 4^{ème} niveaux Génie Électrique
Option Maintenance*

Dr J.Y. HAGGÈGE

Ingénieur ENIT

Agrégé de Génie Électrique

Technologue à l'ISSET de Radès

2003

Table des matières

1	Les conducteurs	1
1.1	Caractérisation des conducteurs	1
1.1.1	Conductivité	1
1.1.2	Classification des matériaux en électricité	1
1.1.3	Nature de la conduction électrique	2
1.1.4	Résistance et résistivité	2
1.1.5	Résistivité et température	2
1.2	Les conducteurs métalliques	2
1.2.1	Cuivre et alliages de cuivre	3
1.2.2	Aluminium et alliages d'aluminium	5
1.3	Les fils conducteurs	6
1.3.1	Fils de bobinage	6
1.3.2	Lignes aériennes	7
1.3.3	Câbles isolés	10
1.4	Les contacts	12
1.4.1	Contacts permanents	12
1.4.2	Contacts démontables	12
1.4.3	Contacts mobiles	13
1.5	Conducteurs spéciaux	13
1.5.1	Résistances non ohmiques	13
1.5.2	Supraconducteurs	15
1.5.3	Thermocouples	16
1.5.4	Fusibles	16
1.6	Phénomènes thermiques dans les machines électriques	17
1.6.1	Calcul de l'échauffement	17
1.6.2	Régime de surintensité cyclique	20
1.6.3	Surintensités occasionnelles	23
2	Les isolants	25
2.1	Définition	25
2.2	Caractéristiques diélectriques des isolants	25
2.2.1	Permittivité relative	25
2.2.2	Rigidité diélectrique	26
2.2.3	Angle de pertes diélectriques et facteur de dissipation diélectrique	27
2.2.4	Calcul du champ électrique dans un isolant	28

2.2.5	Résistance à l'arc	29
2.2.6	Influence de la température sur les isolants	29
2.3	Matériaux isolants	30
2.3.1	Types d'isolants utilisés dans l'industrie électrique	30
2.3.2	Isolants solides	30
2.3.3	Isolants liquides	34
2.3.4	Isolants gazeux	35
3	Les semiconducteurs	37
3.1	Introduction	37
3.2	Propriétés des semiconducteurs	37
3.2.1	Semiconducteurs purs	37
3.2.2	Nature de la conduction dans un semiconducteur pur	38
3.2.3	Semiconducteurs dopés	39
3.3	Production du silicium	39
3.4	La jonction PN	40
3.4.1	Propriétés de la jonction PN	40
3.4.2	Potentiel dans la jonction PN	41
3.4.3	Courants dans une jonction PN	42
3.4.4	Jonction PN polarisée	44
3.4.5	Claquage d'une jonction PN	46
3.5	Les transistors bipolaires	46
3.5.1	Constitution	46
3.5.2	Fabrication	47
3.5.3	Principe de fonctionnement du transistor bipolaire	48
3.6	Les transistors unipolaires	51
3.6.1	Le JFET	51
3.6.2	Le MOSFET	55
3.7	Les circuits intégrés	58
3.7.1	Notion d'intégration	58
3.7.2	Fabrication des circuits intégrés	59
3.8	Technologies microélectroniques	60
3.8.1	Circuits logiques bipolaires	60
3.8.2	Circuits logiques unipolaires	61
3.9	Composants opto-électroniques	62
3.9.1	Photodiode	62
3.9.2	Phototransistor	64
3.9.3	Diodes électroluminescentes (LED)	65
3.9.4	Photopiles	65
3.9.5	Emploi des composants opto-électroniques	66
4	Les composants de l'électronique de puissance	69
4.1	Introduction	69
4.1.1	But de l'électronique de puissance	69

4.1.2	Transformations possibles en électronique de puissance	69
4.1.3	Structure générale d'un convertisseur en électronique de puissance .	70
4.1.4	Applications de l'électronique de puissance	70
4.1.5	Semiconducteurs de puissance	70
4.2	La diode de puissance	71
4.2.1	Structure de base d'une diode de puissance	71
4.2.2	Principe de fabrication	71
4.2.3	Caractéristique statique d'une diode de puissance	72
4.2.4	Pertes à l'état passant	72
4.2.5	Caractéristiques en commutation	72
4.2.6	Diode Schottky	73
4.3	Le thyristor	74
4.3.1	Constitution	74
4.3.2	Fonctionnement du thyristor	75
4.3.3	Problèmes liés à l'amorçage et au blocage des thyristors	78
4.3.4	Applications industrielles des thyristors	81
4.4	Le triac	81
4.4.1	Structure	81
4.4.2	Fonctionnement	83
4.4.3	Caractéristique du triac	83
4.4.4	Amorçage	83
4.4.5	Applications du triac	84
4.4.6	Le diac	84
4.5	Le thyristor GTO	85
4.5.1	Constitution	85
4.5.2	Avantage essentiel du GTO	85
4.5.3	Utilisations	86
4.6	Le transistor bipolaire de puissance	86
4.6.1	Structure	86
4.6.2	Transistor Darlington monolithique	86
4.7	Le MOSFET de puissance	89
4.7.1	Constitution	89
4.7.2	Principe de fonctionnement	90
4.7.3	Caractéristique statique	90
4.7.4	Circuit équivalent	91
4.7.5	Caractéristique dynamique	91
4.7.6	Utilisation du MOSFET de puissance	92
4.8	L'IGBT	93
4.8.1	Principe	93
4.8.2	Structure	93
4.8.3	Circuit équivalent	94
4.8.4	Symboles	94
4.8.5	Caractéristique statique	94
4.8.6	Caratéristiques dynamiques	94

4.8.7	Utilisation de l'IGBT	95
4.9	Technologies émergentes	95
4.10	Montage et refroidissement des composants de puissance	95
4.10.1	Rôle du boîtier du semiconducteur de puissance	95
4.10.2	Environnement d'un semiconducteur de puissance	95
4.10.3	Isolement électrique	96
4.10.4	Câblage	97
4.10.5	Radiateurs	97
5	Piles et accumulateurs	101
5.1	Introduction	101
5.2	Principe d'un générateur électrochimique	101
5.3	Piles	102
5.3.1	Principe	102
5.3.2	Fonctionnement	102
5.3.3	Force électromotrice	102
5.3.4	Représentation d'une pile	103
5.3.5	Energie d'une pile	103
5.3.6	Caractéristiques d'une pile	103
5.3.7	Polarisation des piles	104
5.4	Quelques types de piles	104
5.4.1	Piles sèches	104
5.4.2	Piles à l'oxyde mercurique	106
5.5	Accumulateurs	107
5.5.1	Grandeurs caractéristiques	107
5.5.2	L'accumulateur au plomb	107
	Bibliographie	111

Chapitre 1

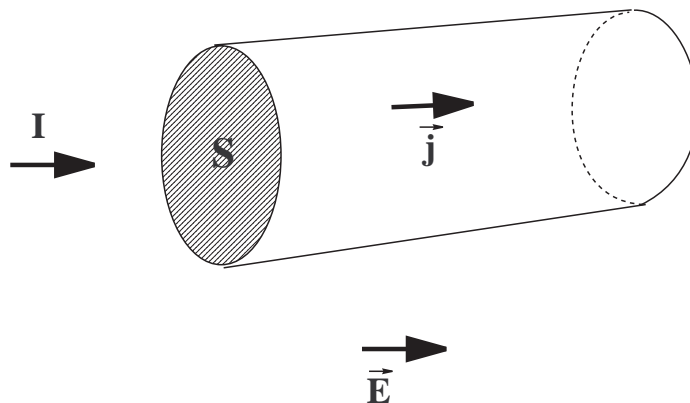
Les conducteurs

1.1 Caractérisation des conducteurs

1.1.1 Conductivité

Lorsqu'un champ électrique \vec{E} est appliqué à un matériau quelconque, la densité de courant \vec{j} qui le traverse est proportionnelle au champ :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$



avec \vec{j} : densité de courant telle que :

$$j = \frac{I}{S}$$

La constante de proportionnalité σ est la **conductivité** qui s'exprime en $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ou Siemens (S).

1.1.2 Classification des matériaux en électricité

Les matériaux utilisés en électricité sont classés suivant leur conductivité :

- Pour les conducteurs : $\sigma > 10^5 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$;
- Pour les isolants : $\sigma < 10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$;
- Pour les semiconducteurs : $\sigma \approx 1 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

1.1.3 Nature de la conduction électrique

- Conducteurs métalliques → électrons libres ;
- Electrolytes → ions positifs ou négatifs ;
- Semiconducteurs purs → électrons libres et trous ;
- Semiconducteurs dopés → dépend de la nature du dopage.

1.1.4 Résistance et résistivité

La résistance électrique d'un conducteur est définie par la loi d'Ohm :

$$R = \frac{U}{I}$$

Pour un conducteur filiforme, on a :

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

avec $\rho = \frac{1}{\sigma}$ = résistivité.

1.1.5 Résistivité et température

La résistivité est liée à la température par la relation :

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0))$$

avec :

- α : coefficient de température ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) ;
- ρ_0 : résistivité à la température T_0 .

En général, α dépend du domaine de température dans lequel on travaille. Il est positif pour les conducteurs métalliques ($\Rightarrow \rho$ augmente lorsque T augmente).

1.2 Les conducteurs métalliques

L'industrie électrotechnique emploie :

- des métaux non ferreux : aluminium, cuivre, magnésium, mercure, molybdène, nickel, zinc, ... et leurs alliages ;
- des métaux ferreux : fers, fontes, aciers ... et leurs alliages.

Les deux matériaux les plus utilisés sont :

- le cuivre et ses alliages ;
- l'aluminium et ses alliages.

1.2.1 Cuivre et alliages de cuivre

1.2.1.1 Fabrication

Le cuivre se trouve sous forme de minerais sulfurés ou oxydés qui contiennent moins de 2 % de cuivre (limite économique = 0,5 %). Il est peu abondant sur terre (0,007 % de la lithosphère).

1.2.1.2 Obtention du cuivre à partir du minerais

- Minerais sulfuré → affinage thermique : le minerais est grillé, fondu et désulfuré dans un convertisseur ⇒ cuivre pur à 99,5 %;
- Minerais oxydé → affinage électrolytique : le minerais est dissous dans de l'acide sulfurique puis le cuivre en solution est extrait par électrolyse ⇒ cuivre pur à 99,9 %.

1.2.1.3 Propriétés physiques du cuivre

- Métal lourd : masse volumique $\mu = 8,96 \text{ g/cm}^3$;
- Bonne conductivité thermique $\lambda = 393 \text{ W/m.K}$;
- Température de fusion élevée : $T_f = 1083 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.2.1.4 Propriétés mécaniques

Elles dépendent de la pureté du matériau. En électrotechnique, le cuivre utilisé doit avoir une pureté $\geq 99,9 \%$ → fils, câbles, barres, ... En électronique, on utilise du cuivre pur à 99,99 %, ne contenant pas d'oxygène (« oxygen-free ») → se soude facilement.

1.2.1.5 Propriétés électriques

- Bonne conductivité électrique : résistivité $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Faible coefficient de température : $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

1.2.1.6 Propriétés chimiques

Dans l'air sec et froid, le cuivre ne s'oxyde pas ; dans l'air humide et chargé en CO_2 , il se recouvre d'une couche imperméable : le vert-de-gris (carbonate de cuivre). L'étamage permet une protection contre l'oxydation. Le cuivre est faiblement attaqué par l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique concentré. Il est attaqué par l'acide nitrique et l'ammoniac.

1.2.1.7 Propriétés magnétiques

Le cuivre est diamagnétique (très faible aimantation dans le sens opposé au champ magnétique) ⇒ le cuivre peut être utilisé pour la fabrication de ressorts d'appareils de mesure.

1.2.1.8 Propriétés métallurgiques

Le cuivre est **ductile** et **malléable** : il peut être :

- laminé → feuilles, tôles, ... qui peuvent être facilement découpées ou pliées ;
- étiré et filé → fils, tubes, barres, ...

1.2.1.9 Cuivres faiblement alliés

Dans ces cuivres, la teneur des éléments d'addition reste normalement inférieure à 1 %. Cuivres à l'argent, au cadmium, au chrome, au béryllium, au tellure, au zirconium : très utilisés dans l'industrie électrotechnique. Ils possèdent les propriétés suivantes :

Cu + Ag	Cu + Cd	Cu + Cr	Cu + Be	Cu + Te	Cu + Zr
Possibilité d'étamage et de soudure à l'étain.	Grande résistance aux efforts alternés (ex : vibrations).	Mou et ductile ⇒ facile à travailler.	Très grande résistance mécanique, grande résistance aux efforts alternés, faible conductivité électrique.	Bonne conductivité électrique, grande facilité d'usinage, résistance à la corrosion.	Bonne résistance aux vibrations et aux températures élevées.
Bobinages de moteurs fonctionnant à température élevée (> 200 °C), lames de collecteurs.	Conducteurs pour caténares, bagues de moteurs, porte-électrodes pour machines à souder.	Electrodes de machines à souder, lames de collecteurs, contacts de gros interrupteurs.	Ressorts, pièces de frottement.	Pièces d'appareillages électriques.	Electrodes de soudage, collecteurs de moteurs à température élevée (aviation).

1.2.1.10 Laitons

Alliages Cu + Zn ou Cu + Zn + Pb en proportions variables. Faciles à usiner, utilisés pour des pièces d'appareillages : culots, douilles, cosses, raccords, matériels téléphoniques.

1.2.1.11 Bronzes

Alliages Cu + Sn + Zn (+ Pb ou Al). Résistent à la corrosion et aux vibrations : bagues de moteurs, supports d'isolateurs, cages de moteurs.

1.2.2 Aluminium et alliages d'aluminium

1.2.2.1 Fabrication

L'aluminium se trouve à l'état naturel sous forme de minerais oxydé : la **bauxite** qui contient des oxydes d'aluminium, de fer, de silicium et de titane. L'aluminium est extrait de la bauxite par métallurgie en deux étapes :

- Extraction de l'**alumine** à partir de la bauxite par des procédés chimiques et thermiques ;
- Electolyse de l'alumine en solution.

La production d'une tonne d'aluminium nécessite :

- 5 tonnes de bauxite pour extraire 2 tonnes d'alumine ;
- 14000 kWh (tension continue de 7 à 8 V).

1.2.2.2 Propriétés physiques de l'aluminium

- Métal léger : masse volumique $\mu = 2,7 \text{ g/cm}^3$;
- Bonne conductivité thermique : $\lambda = 222 \text{ W/m.K}$;
- Température de fusion $T_f \approx 650 - 660 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.2.2.3 Propriétés mécaniques

Faible résistance à la rupture.

1.2.2.4 Propriétés électriques

- Bonne conductivité : résistivité $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$;
- Coefficient de température : $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

1.2.2.5 Propriétés chimiques

L'aluminium se recouvre rapidement d'une couche d'alumine de faible épaisseur ($\approx 1 \text{ } \mu\text{m}$) qui le rend stable chimiquement. Il résiste à l'action des graisses, huiles, hydrocarbures, alcools, acide nitrique, ... Il est attaqué par les acides chlorhydrique et fluorhydrique, la soude, la potasse, le mercure. Au contact du cuivre, du fer, du plomb et en milieu humide corrosif, l'aluminium est altéré par corrosion électrolytique \Rightarrow il faut garder l'aluminium en milieu sec.

1.2.2.6 Propriétés magnétiques

L'aluminium est amagnétique.

1.2.2.7 Propriétés métallurgiques

L'aluminium est très malléable à froid ou à chaud. On peut lui faire subir :

- A froid : laminage, filage, pliage, ...
- A chaud : moulage, soudage, usinage, ...

1.2.2.8 Traitements thermiques

L'aluminium peut être traité thermiquement pour :

- l'adoucir → aptitude à la déformation plastique ;
- le durcir → amélioration de ses propriétés mécaniques.

1.2.2.9 Principale utilisation de l'aluminium

Fabrication de câbles en remplacement du cuivre.

1.3 Les fils conducteurs

On distingue les fils de bobinage et les fils de câblage. Il y a deux sortes de câbles : les câbles aériens nus, en contact avec l'atmosphère, suspendus à des pylônes et les câbles isolés, souterrains, sous-marins ou suspendus sur de courtes distances.

1.3.1 Fils de bobinage

Ils sont très utilisés dans l'industrie électrotechnique pour la production ou l'utilisation des champs magnétiques. Ils sont souvent placés autour d'un noyau ferromagnétique.

1.3.1.1 Caractéristiques nécessaires

- Faible résistance électrique pour éviter l'échauffement et les chutes de tension ;
- Bonne résistance mécanique à la rupture par traction ou par pliage répétés, intervenant lors de l'opération de bobinage.

1.3.1.2 Matériaux employés

Les fils de bobinage sont en cuivre ou en aluminium.

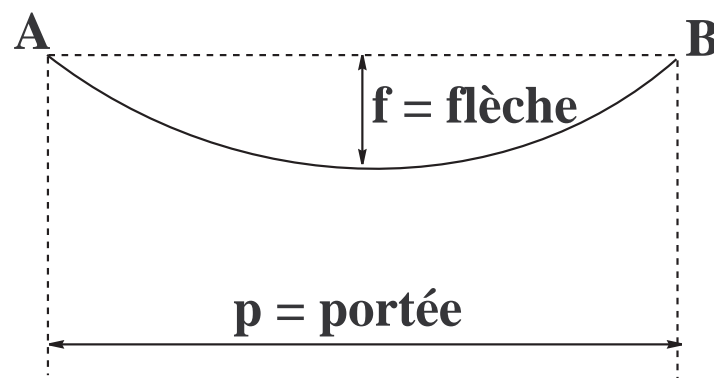
- Rotors de moteurs à cage → aluminium pur à 99,5 % ;
- Fils de faible section → cuivre électrolytique ;
- Enroulements rotoriques des turbo-alternateurs de grande puissance → cuivre faiblement allié à l'argent.

1.3.2 Lignes aériennes

1.3.2.1 Constitution

Alliages d'aluminium, ex : l'**almélec**, moins conducteur que le cuivre mais plus solide et moins cher. Propriété importante : résistance à la rupture ≥ 350 N/mm. Câbles nus, formés d'une âme en acier recouverte par des fils d'aluminium : acier \rightarrow solidité , aluminium \rightarrow bonne conductivité.

1.3.2.2 Géométrie



On montre que l'équation de la ligne peut s'écrire :

$$y - y_0 = a \operatorname{ch} \frac{x - x_0}{a}$$

où a est le **paramètre** de la ligne, défini par :

$$a = \frac{T}{p_0}$$

avec :

- T : tension du câble (en N) ;
- p_0 : poids linéique du câble (en N/m).

Le paramètre a possède la dimension d'une longueur (m).

Relation entre flèche f et portée p :

$$f = \frac{p^2}{8a}$$

Longueur du câble suspendu entre A et B :

$$l(AB) = 2a \operatorname{sh} \frac{p}{a}$$

1.3.2.3 Conditions d'établissement

Les conducteurs doivent être hors d'atteinte : le point le plus bas de la ligne doit être à au moins 6 m au dessus du sol et à 3 m au dessus des bâtiments. Dans le cas des lignes presque horizontales (faible flèche), l'écartement entre les conducteurs (phases + neutre) est donné par :

portée	écartement
$p \leq 4 \text{ m}$	$e \geq 15 \text{ cm}$
$4 \text{ m} \leq p \leq 6 \text{ m}$	$e \geq 20 \text{ cm}$
$6 \text{ m} \leq p \leq 15 \text{ m}$	$e \geq 25 \text{ cm}$
$p \geq 15 \text{ m}$	$e \geq 35 \text{ cm}$

Les conducteurs sont fixés à des isolateurs rigides par des attaches en fil d'aluminium ou de cuivre.

1.3.2.4 Effet du vent sur les conducteurs

Le vent exerce sur les conducteurs une poussée :

$$F = C_x \cdot d \cdot \Delta l \cdot \mu \frac{V^2}{2}$$

avec :

- C_x : coefficient de traînée ;
- d : diamètre du conducteur ;
- Δl : élément de longueur du câble ;
- μ : masse volumique de l'air ;
- V : vitesse du vent.

Cette poussée se transmet aux supports. Élément de dimensionnement de ces supports, elle s'ajoute au poids des câbles \Rightarrow augmentation de leur tension mécanique.

1.3.2.5 Choix des sections des lignes aériennes

La section à donner à un conducteur dépend des pertes et des échauffements admissibles :

- Echauffements en régime permanent (effet Joule + rayonnement solaire) ;
- Echauffements dus aux surcharges transitoires.

L'échauffement acceptable par un conducteur est limité par la température qu'il atteint : température élevée \rightarrow dilatation \rightarrow augmentation de la longueur du câble : la ligne peut traîner à terre ; température + tension mécanique \Rightarrow détérioration irréversible des lignes.

1.3.2.6 Calcul du diamètre des lignes aériennes en fonction de l'échauffement admissible

Les pertes par effet Joule dans la ligne sont évacuées par la surface latérale des conducteurs. Soit T la température du conducteur et T_a la température ambiante. L'échauffement $\theta = T - T_a$ en régime permanent est lié à la puissance P dissipée, par l'expression :

$$P = K \cdot S_l \cdot (T - T_a)$$

avec :

- K : coefficient de dissipation thermique (en $W/^\circ C/m^2$), dépend de la nature et de la forme du conducteur ;
- S_l : surface latérale du conducteur.

Bilan de puissance : Pertes Joule = Puissance dissipée.

$$\begin{aligned} \Rightarrow RI^2 &= K \cdot S_l \cdot (T - T_a) \\ \Rightarrow \frac{\rho L}{\pi d^2} I^2 &= K \cdot \pi d \cdot L \cdot (T - T_a) \\ \Rightarrow \rho I^2 &= \frac{K \pi^2 d^3 (T - T_a)}{4} \\ \Rightarrow d^3 &= \frac{4 \rho I^2}{K \pi^2 \theta} \\ \Rightarrow d &= \sqrt[3]{\frac{4 \rho I^2}{K \pi^2 \theta}} \end{aligned}$$

Exemple : pour l'aluméc, on a : $\rho = 3,5 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ et $K = 20 W/^\circ C/m^2$. On impose : $I_{max} = 500 A$, $T_{max} = 60^\circ C$ et $T_a = 20^\circ C$. On a alors $d = 16,4 mm$. La densité de courant correspondante est : $j = \frac{I}{S} = 2,35 A/mm^2$.

1.3.2.7 Densité de courant économique

Les valeurs de sections obtenues par l'échauffement maximal conduisent généralement à des pertes élevées \Rightarrow il faut tenir compte du facteur économique.

Les pertes maximales dans la ligne sont : $P_{max} = 3RI^2$ avec R inversement proportionnel à la section, ex : $R = \frac{35}{S} (\Omega/km)$ pour l'aluméc. D'où :

$$P_{max} = \frac{k}{S} I_{max}^2 \text{ (W/km)}$$

Soit c le coût unitaire des pertes (en dinars/W), le coût total des pertes est :

$$C_{pertes} = \frac{k}{S} I_{max}^2 \cdot c$$

Le coût kilométrique de la ligne peut s'écrire :

$$C_{\text{ligne}} = a + bS$$

Le coût total (ligne + pertes) est :

$$C = \frac{k}{S} I_{\text{max}}^2 \cdot c + a + bS$$

Ce coût est minimal lorsque $\frac{dC}{dS} = 0$, soit :

$$\frac{I_{\text{max}}^2}{S^2} = \frac{b}{kc}$$

La densité de courant à l'optimum est donc :

$$j_{\text{opt}} = \frac{I_{\text{max}}}{S} = \sqrt{\frac{b}{kc}}$$

Elle dépend de la constante physique k et des constantes économiques b et c .

Exemple : pour une ligne en almélec, on a : $k = 3 \times 35 = 105$, $b = 5 \cdot 10^{-4}$ dinar/mm²/km et $c = 10^{-5}$ dinar/W. On a alors : $j_{\text{opt}} = 0,7$ A/mm².

En pratique, on prend une densité de courant telle que $j < 1$ A/mm², $\approx 0,7$ à $0,8$ A/mm², valeur inférieure aux densités limites d'échauffement.

1.3.3 Câbles isolés

1.3.3.1 Constitution

Les câbles isolés sont constitués d'une âme conductrice et d'une enveloppe isolante. On distingue :

- les câbles multiconducteurs : ensemble de conducteurs électriquement distincts mais liés mécaniquement dans un revêtement (gaine, tresse, armure ...);
- les câbles monoconducteurs : un seul conducteur isolé revêtu d'une gaine de protection.

L'âme doit posséder :

- une bonne **conductivité électrique** afin de réduire les pertes d'énergie \Rightarrow elle est réalisée en **cuivre** ou en **aluminium**;
- une **résistance mécanique** suffisante pour éviter la rupture du conducteur au cours de la pose, des fixations et du serrage des conducteurs;
- une bonne **souplesse** pour faciliter le passage des conducteurs dans les conduites afin de respecter le tracé des canalisations ou pour alimenter les appareils mobiles;
- une bonne **tenue à la corrosion** due aux agents atmosphériques et aux environnements chimiques.

1.3.3.2 Classe de souplesse d'un câble

Câbles des installations fixes : classes 1 et 2, 1 → âme **massive** rigide, 2 → âme **câblée** rigide (formée de brins de cuivre ou d'aluminium disposés en hélice).

Câbles souples : classes 5 et 6.

1.3.3.3 Résistance linéique

C'est la résistance d'un kilomètre de câble, mesurée à 20 °C, pour une section et une classe de souplesse données.

Calcul :

$$R_{20} = \frac{\rho}{\frac{n\pi d^2}{4}} \cdot k$$

avec :

- R_{20} : résistance à 20 °C en Ω/km ;
- ρ : résistivité du métal en $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ (17,24 pour le cuivre, 28,26 pour l'aluminium) ;
- n : nombre de brins de l'âme ($n = 1$ pour une âme massive) ;
- d : diamètre des brins en mm ;
- k : facteur compris entre 1 et 1,2 qui dépend de la constitution de l'âme (massive ou câblée), tient compte de la longueur réelle du câble.

1.3.3.4 Mesure de la résistance linéique

La résistance linéique se mesure sur une éprouvette de câble de 1 m. La résistance mesurée par une méthode de mesure des faibles résistances est ramenée à la résistance linéique à 20 °C pour 1 km :

$$R_{20} = \frac{R_T}{1 + \alpha(T - 20)} \cdot \frac{1000}{L}$$

avec :

- R_T : résistance mesurée à la température T (en Ω) ;
- T : température de l'âme (en °C) ;
- α : coefficient de température ($\alpha = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour le cuivre, $\alpha = 4,03 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour l'aluminium) ;
- L : longueur de l'éprouvette (en m).

1.3.3.5 Equivalence aluminium - cuivre

L'aluminium est de plus en plus utilisé car les réserves mondiales d'aluminium sont très importantes. Il est utilisé pour des sections supérieures à 10 mm². Pour une **même résistance électrique** et une **même longueur**, on a :

$$\frac{\text{Section aluminium}}{\text{Section cuivre}} = \frac{\frac{\rho_{\text{Al}} L}{R}}{\frac{\rho_{\text{Cu}} L}{R}} = \frac{\rho_{\text{Al}}}{\rho_{\text{Cu}}} = \frac{28,26}{17,24} \approx 1,63$$

$$\frac{\text{Masse aluminium}}{\text{Masse cuivre}} = \frac{1,63 \times \mu_{\text{Al}}}{\mu_{\text{Cu}}} = \frac{1,63 \times 2,7}{8,9} \approx 0,5$$

⇒ 1 kg d'aluminium remplace 2 kg de cuivre. On montre aussi que pour un **même échauffement**, on a :

$$\frac{\text{Section aluminium}}{\text{Section cuivre}} = 0,84$$

$$\Rightarrow \frac{\text{Masse aluminium}}{\text{Masse cuivre}} = \frac{0,84 \times \mu_{\text{Al}}}{\mu_{\text{Cu}}} = \frac{0,84 \times 2,7}{8,9} \approx 0,25$$

⇒ 1 kg d'aluminium remplace 4 kg de cuivre.

1.4 Les contacts

Un contact est une liaison assurant la continuité électrique entre deux ou plusieurs conducteurs. On distingue les **jonctions** : connexion de deux extrémités de conducteurs, et les **dérivations** : connexion d'un ou plusieurs conducteurs (conducteurs dérivés) en un point d'un autre conducteur (conducteur principal).

Les contacts peuvent être le siège de dégagement de chaleur, de f.é.m (effet de pile entre matériaux différents) ou de chutes de tension.

Il y a trois types de contacts :

- contacts permanents ;
- contacts démontables ;
- contacts mobiles.

1.4.1 Contacts permanents

Ils sont réalisés par :

- sertissage ou rivetage : contrainte mécanique (pression), à froid, sous graisse ;
- soudage : soudure autogène, au chalumeau ou à l'arc de matériaux de même nature ;
- soudure de deux métaux à l'aide d'un alliage à base de cuivre (brasure).

1.4.2 Contacts démontables

La liaison électrique peut être interrompue à l'aide d'un outil (tournevis, clé ...) puis rétablie. La surface réelle du contact dépend de l'état de la surface des conducteurs et de la pression exercée → apparition d'une résistance de contact.

Matériaux :

- argent ou cuivre → bonne conductivité ;
- tungstène ou molybdène → bonne dureté et haut point de fusion ;
- or, platine, argent, nickel, rhodium → bonne résistance à la corrosion.

1.4.3 Contacts mobiles

L'un des conducteurs est en mouvement de translation ou de rotation par rapport à l'autre. Ex : balais de machines électriques (rotation), caténares pour la traction électrique (translation).

Problème principal : usure par frottements mécaniques → utilisation de matériaux présentant une grande dureté : cuivre faiblement allié au cadmium ; usure ramenée à l'un des conducteurs qui peut être facilement remplacé : charbon (pur ou mélangé à du cuivre ou de l'argent) qui est, de plus, autolubrifiant.

1.5 Conducteurs spéciaux

1.5.1 Résistances non ohmiques

Ce sont des conducteurs non-linéaires, ils n'obéissent pas à la loi d'Ohm : la tension à leurs bornes n'est pas proportionnelle au courant qui les traverse. Leur résistance n'est pas constante : elle varie avec un paramètre physique. Ex : thermistance → température, varistance → tension, magnétorésistance → champ magnétique.

1.5.1.1 Thermistances

Ce sont des résistances à base d'oxydes céramiques. Leur résistance varie selon la loi :

$$R_T = R_0 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

avec :

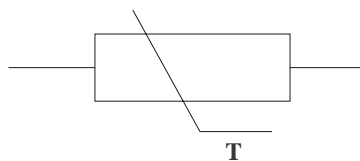
- R_T : résistance à la température T (en **Kelvin**) ;
- R_0 : résistance à $T_0 = 300$ K (25 °C) ;
- B : indice de sensibilité thermique (2000 à 3000 K).

On définit le coefficient de température de la thermistance :

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T} = -\frac{B}{T^2} < 0$$

Il est toujours négatif → thermistance **CTN** (**C**oefficient de **T**empérature **N**égatif).

Symbole :



Utilisation des CTN : mesure de températures, compensation de la dérive en température de composants électroniques, régulation de température.

1.5.1.2 Varistances

Résistances au carbure de silicium (SiC) ou à l'oxyde de zinc (ZnO). Leur résistance décroît lorsque la tension à leurs bornes augmente (\rightarrow VDR : Voltage **D**ependant **R**esistor).

Caractéristique courant-tension :

$$I = K \cdot U^\alpha$$

avec :

- $\alpha = 5$ pour les VDR au SiC ;
- $\alpha = 30$ pour les VDR au ZnO.

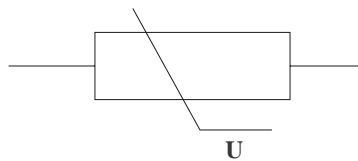
Résistance :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{K \cdot U^\alpha} = \frac{U^{1-\alpha}}{K}$$

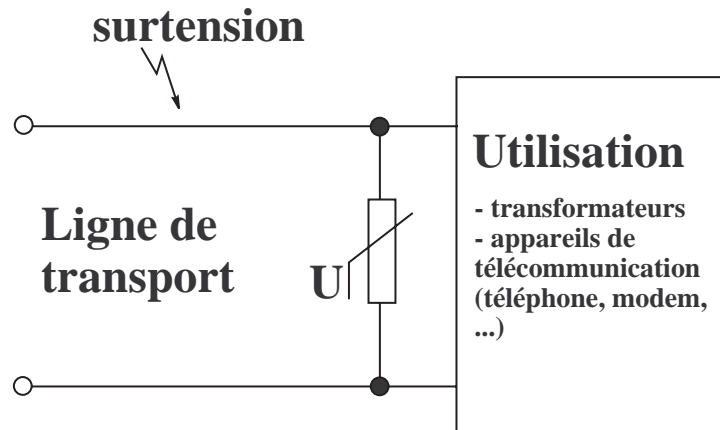
Puissance dissipée dans la VDR :

$$P = UI = K \cdot U^{\alpha+1}$$

Symbole :



Utilisation : protection des équipements contre les surtensions.



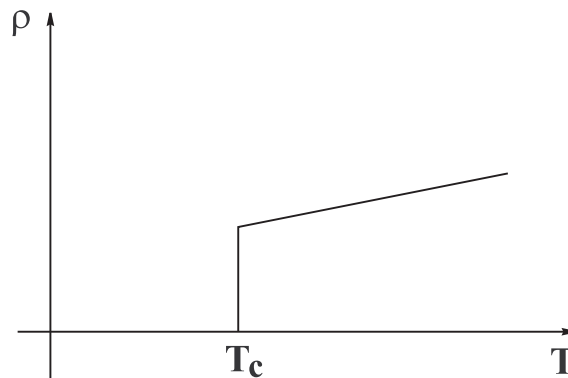
1.5.1.3 Magnétorésistances

Ce sont des sondes en antimoniure d'indium dont la résistance augmente en fonction du champ magnétique, quel qu'en soit le sens. Le champ doit être appliqué perpendiculairement à la sonde. Utilisation : mesure des champs magnétiques.

1.5.2 Supraconducteurs

En dessous d'une température critique T_c , certains matériaux perdent complètement leur résistance électrique, ce sont des **supraconducteurs**.

Evolution de la résistivité d'un supraconducteur :



Conséquence : un courant peut circuler **sans pertes Joule** dans un supraconducteur. La propriété de supraconduction dépend du champ magnétique dans lequel se trouve le supraconducteur : le champ doit être inférieur à une valeur critique B_c .

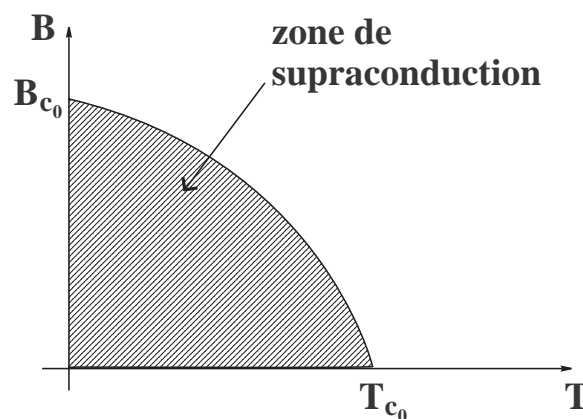
Relation entre T_c et B_c :

$$B_c = B_{c0} \left[1 - \left(\frac{T_c}{T_{c0}} \right)^2 \right]$$

avec :

- B_{c0} : Champ magnétique critique à température nulle ;
- T_{c0} : Température critique à champ magnétique nul.

Interprétation graphique :



Le matériau est supraconducteur lorsque le champ magnétique et la température sont tels que le point de coordonnées (B, T) est à l'intérieur de la zone de supraconduction.

En général, T_c est proche de 0 K \rightarrow difficulté dans l'utilisation pratique des supraconducteurs : nécessité d'un système de réfrigération très important \Rightarrow recherche de supraconducteurs à température critique élevée.

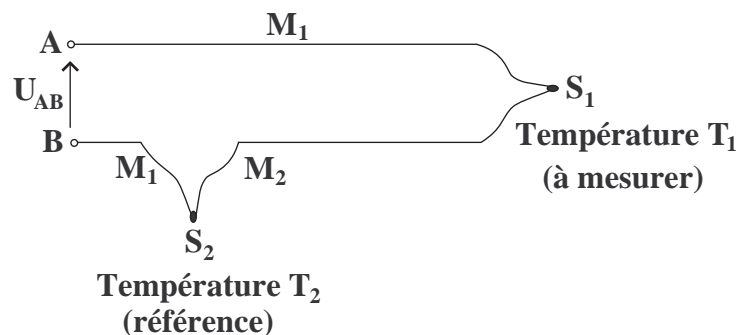
Application des supraconducteurs : bobinages d'électro-aimants pour la production de champs magnétiques très intenses, câbles de transport d'énergie sans pertes Joule (cryo-câbles).

Exemples de matériaux supraconducteurs : NbTi ($T_c = 10$ K), YBaCuO ($T_c = 92$ K).

1.5.3 Thermocouples

Ce sont des instruments permettant de mesurer des températures élevées. Ils sont basés sur l'**effet thermoélectrique** (effet Seebeck) consistant en l'apparition d'une différence de potentiel entre deux métaux différents soudés ensemble et portés à des températures différentes.

Constitution :



avec :

- M₁/M₂ : couple de métaux différents ;
- S₁, S₂ : soudures.

La tension U_{AB} est fonction de la différence de température $T_1 - T_2$. La soudure S₂ étant maintenue à une température T_2 fixe (ex : 0°C, température de la glace fondante), la mesure de U_{AB} permet d'obtenir, à partir d'une table de correspondance fournie par le fabricant du thermocouple, la valeur de la température T_1 à mesurer.

Couple de métaux M₁/M₂ couramment utilisés :

- cuivre/constantan $\rightarrow T_{max} \approx 400$ °C ;
- platine rhodié $\rightarrow T_{max} \approx 1800$ °C.

1.5.4 Fusibles

Ce sont des dispositifs montés en série avec les installations électriques, dont la fonction est d'ouvrir le circuit si le courant qui le traverse dépasse une valeur donnée pendant un temps déterminé.

Propriétés d'un fusible :

- conductivité élevée ;
- faible oxydation ;
- température de fusion basse ;
- bonne ductilité.

Calcul du diamètre d'un fusible filiforme : pour un tel fusible, le diamètre se détermine d'après la relation entre le courant et l'échauffement dans un conducteur cylindrique. La relation entre le diamètre et le courant de fusion est donc de la forme :

$$d = K_f \cdot I_f^{2/3}$$

avec :

- d : diamètre du fusible (en mm) ;
- I_f : courant de fusion (en A) ;
- K_f : coefficient dépendant du matériau et de la température ambiante, déterminé expérimentalement.

Valeurs de K_f pour quelques matériaux conducteurs à la température ambiante de 25 °C :

matériau	coefficient K_f
argent	0,0638
plomb	0,3029
zinc	0,1722
aluminium	0,1036
cuivre	0,0594

1.6 Phénomènes thermiques dans les machines électriques

L'échauffement dans les machines électriques a pour principale origine les **pertes dans les conducteurs** (effet Joule), les autres facteurs contribuant à l'échauffement étant les pertes dans les circuits magnétiques (hystérésis et courants de Foucault), dans les isolants (pertes par courants de fuite et pertes diélectriques), dans les semiconducteurs (pertes Joule et pertes en commutation pour les convertisseurs statiques) et dans les pièces mécaniques (frottements et résistance de l'air pour les machines tournantes). Les machines électriques nécessitent donc un **refroidissement** pour évacuer ces pertes.

1.6.1 Calcul de l'échauffement

1.6.1.1 Equation de l'échauffement

L'élimination de la chaleur produite par les pertes se fait essentiellement par **convection**, c'est-à-dire par transfert thermique entre la machine et l'air ambiant.

La puissance thermique dissipée par convection a pour expression :

$$P_{th} = KS(T - T_a)$$

avec :

- P_{th} : puissance dissipée (en W) ;

- K : coefficient de dissipation thermique (en $W/^\circ C/m^2$) , dépend des matériaux constituant la machine ;
- S : surface de dissipation (surface en contact avec l'air) ;
- T : température de la machine ;
- T_a : température ambiante.

L'évolution de l'échauffement au cours du temps se fait d'après le bilan énergétique :

Pertes Joule = échauffement de la machine + dissipation dans l'air ambiant

Energie nécessaire pour échauffer la machine :

$$\mathcal{E}_m = mc dT$$

avec :

- m : masse de la machine (en kg) ;
- c : chaleur massique (en $J/^\circ C/kg$) ;
- dT : échauffement (en $^\circ C$).

Energie dissipée dans l'air pendant la durée dt :

$$\mathcal{E}_d = P_{th} dt = KS(T - T_a) dt$$

Energie totale due aux pertes Joule :

$$\mathcal{E}_J = P dt$$

où P représente la puissance des pertes Joule.

Le bilan énergétique s'écrit donc :

$$\mathcal{E}_J = \mathcal{E}_m + \mathcal{E}_d$$

$$\Rightarrow mc dT + KS(T - T_a) dt = P dt$$

$$\Rightarrow mc \frac{dT}{dt} + KS(T - T_a) = P$$

On note $\theta = T - T_a$ l'échauffement, on a alors :

$$mc \frac{d\theta}{dt} + KS \theta = P$$

C'est une équation différentielle linéaire du premier ordre dont la solution avec la condition initiale $\theta(0) = 0$ est :

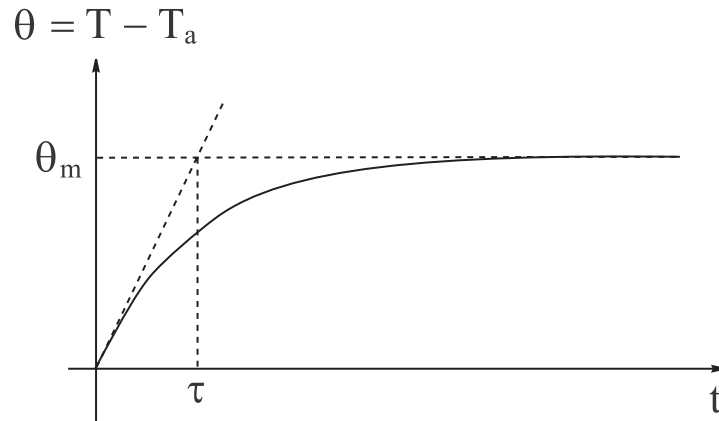
$$\theta(t) = \theta_m \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

avec :

- $\tau = \frac{mc}{KS}$: constante de temps thermique ;

- $\theta_m = \frac{P}{KS}$: échauffement stabilisé, échauffement à l'équilibre thermique ($t \rightarrow \infty$).

Evolution de l'échauffement au cours du temps :



1.6.1.2 Loi d'Ohm thermique

A l'équilibre thermique ($t > 3\tau$), on a :

$$\theta_m = T - T_a = \frac{P}{KS}$$

On note $R_{th} = \frac{1}{KS}$ la **résistance thermique machine-air ambiant**. On a alors :

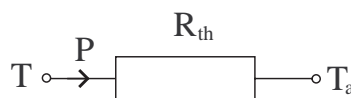
$$T - T_a = R_{th} \cdot P$$

C'est la **loi d'Ohm thermique**.

Equivalence électrique :

$$\begin{array}{lcl} T - T_a & \Leftrightarrow & \text{tension} \\ P & \Leftrightarrow & \text{courant} \\ R_{th} & \Leftrightarrow & \text{résistance électrique} \end{array}$$

Représentation :



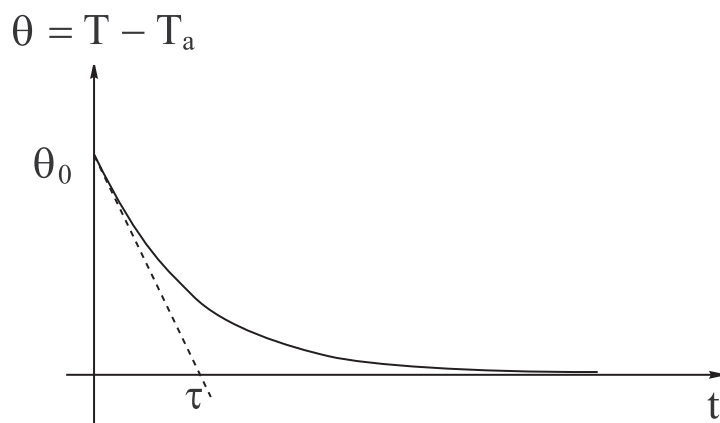
1.6.1.3 Refroidissement

Lorsque la machine est arrêtée, $P = 0$ et l'équation de l'échauffement devient :

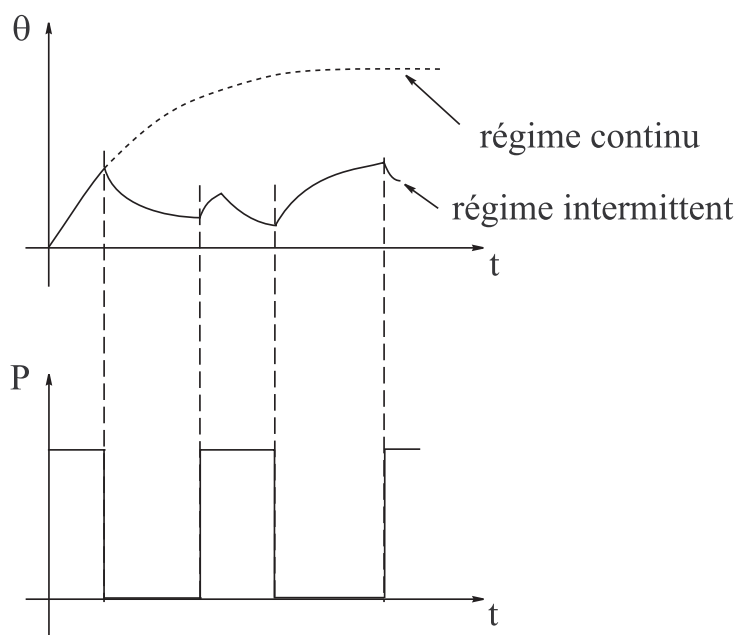
$$mc \frac{d\theta}{dt} + KS\theta = 0$$

$$\Rightarrow \theta(t) = \theta_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

avec θ_0 : échauffement initial.



1.6.1.4 Echauffement en régime intermittent



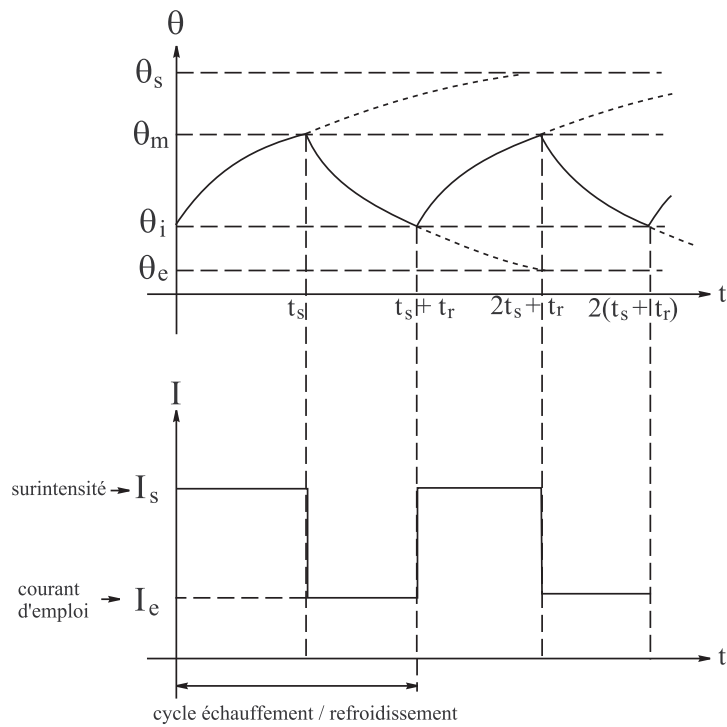
1.6.2 Régime de surintensité cyclique

1.6.2.1 Evolution de l'échauffement en régime de surintensité cyclique

Un régime de surintensité cyclique est défini par :

- t_s : temps de présence de la surcharge ;
- t_r : temps de refroidissement entre deux surcharges consécutives ;
- I_s : valeur de la surcharge \rightarrow échauffement stabilisé θ_s ;
- I_e : courant d'emploi assigné maintenu entre deux surcharges successives \rightarrow échauffement stabilisé θ_e ;

- I_{th} : courant thermique assigné \rightarrow échauffement stabilisé θ_m .

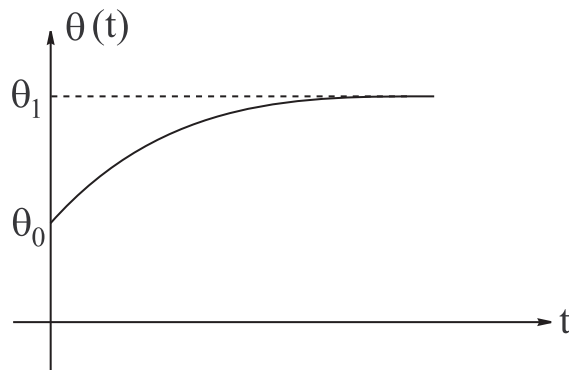


L'équation de l'échauffement s'écrit :

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{\tau} = \frac{P}{\tau KS} \propto I^2$$

La solution de cette équation avec la condition initiale θ_0 et la condition finale θ_1 est :

$$\theta(t) = (\theta_0 - \theta_1)e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_1$$



On a alors :

$$\begin{cases} \theta_m = (\theta_i - \theta_s)e^{-\frac{t_s}{\tau}} + \theta_s \\ \theta_i = (\theta_m - \theta_e)e^{-\frac{t_r}{\tau}} + \theta_e \end{cases}$$

Par élimination de θ_i :

$$\theta_s + (\theta_m - \theta_s)e^{+\frac{t_s}{\tau}} = \theta_e + (\theta_m - \theta_e)e^{-\frac{t_r}{\tau}}$$

Les échauffements stabilisés sont proportionnels à I^2 (pertes Joule) :

$$\theta_s \propto I_s^2$$

$$\theta_m \propto I_{th}^2$$

$$\theta_e \propto I_e^2$$

On pose :

$$A_s = \frac{I_s}{I_{th}} \Rightarrow A_s^2 = \frac{\theta_s}{\theta_m}$$

$$A_e = \frac{I_e}{I_{th}} \Rightarrow A_e^2 = \frac{\theta_e}{\theta_m}$$

On a alors :

$$A_s^2 + (1 - A_s^2)e^{+\frac{t_s}{\tau}} = A_e^2 + (1 - A_e^2)e^{-\frac{t_r}{\tau}}$$

1.6.2.2 Calcul de la cadence maximale des surcharges

Les valeurs de t_s , I_s , I_e , I_{th} et τ sont généralement connues \Rightarrow calcul de la cadence maximale des surcharges, c'est-à-dire la durée d'un cycle d'échauffement/refroidissement. Temps t_r nécessaire au refroidissement :

$$t_r = -\tau \ln \frac{A_s^2 + (1 - A_s^2)e^{+\frac{t_s}{\tau}} - A_e^2}{1 - A_e^2}$$

Exemple : un appareil présente les caractéristiques suivantes :

- courant thermique assigné $I_{th} = 250$ A ;
- courant permanent d'emploi assigné $I_e = 125$ A ;
- constante de temps thermique $\tau = 22$ minutes.

Cet appareil est soumis à des surcharges périodiques de valeur $I_s = 400$ A et de durée $t_s = 1,2$ minutes.

On calcule $A_s = \frac{I_s}{I_{th}} = \frac{400}{250} = 1,6$ et $A_e = \frac{I_e}{I_{th}} = \frac{125}{250} = 0,5 \Rightarrow t_r \approx 2,75$ minutes.

La durée d'un cycle d'échauffement / refroidissement est donc : $1,2 + 2,75 = 3,95$ minutes.

On en déduit la cadence horaire maximale de surcharges :

$$\frac{60 \text{ min}}{3,95 \text{ min}} \approx 15 \text{ surcharges/minute}$$

Application : les machines fonctionnant uniquement en régime intermittent (ex : machines outils) peuvent être sous-dimensionnées du point de vue du courant maximal admissible.

1.6.3 Surintensités occasionnelles

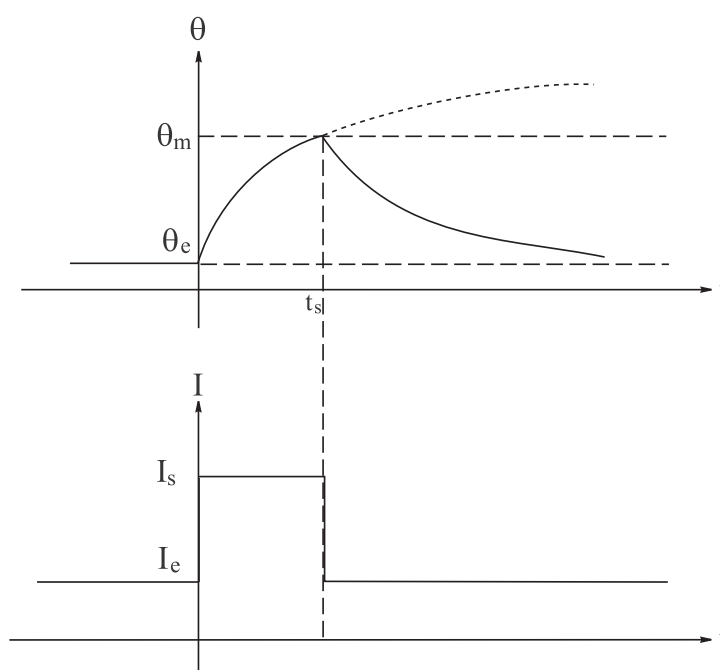
1.6.3.1 Cas d'une surintensité apparaissant en régime établi

On peut calculer la durée maximale t_s de cette surintensité :

$$t_s = \tau \ln \frac{A_e^2 + (1 - A_e^2)e^{-\frac{t_r}{\tau}} - A_s^2}{1 - A_s^2}$$

Surintensité occasionnelle $\Rightarrow t_r \rightarrow \infty \Rightarrow e^{-\frac{t_r}{\tau}} \rightarrow 0$ d'où :

$$t_s \approx \tau \ln \frac{A_e^2 - A_s^2}{1 - A_s^2}$$



Exemple : avec les valeurs précédentes de I_s , I_e , I_{th} et τ , on a : $t_s \approx 8,6$ minutes.

1.6.3.2 Cas d'une surintensité apparaissant à la mise sous tension

Dans ce cas, la machine est froide \Rightarrow le courant d'emploi n'intervient plus, l'échauffement initial $\theta_e = 0 \Rightarrow A_e = 0$:

$$t_s \approx \tau \ln \frac{-A_s^2}{1 - A_s^2}$$

On a alors : $t_s \approx 11$ minutes.

Chapitre 2

Les isolants

2.1 Définition

Les **isolants** ou **diélectriques** sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à 10^{16} $\Omega.m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques.

Les isolants sont utilisés pour :

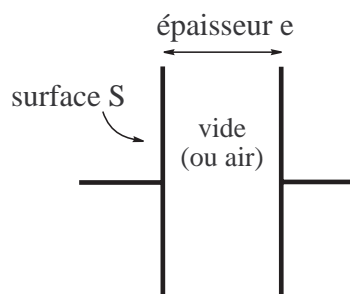
- assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés → protection des personnes et des équipements ;
- supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre ;
- remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur.

Un système d'isolation est un isolant ou un ensemble d'isolants associés dans une machine électrique.

2.2 Caractéristiques diélectriques des isolants

2.2.1 Permittivité relative

Soit un condensateur plan à vide (ou à air) :



Sa capacité est :

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{e}$$

où $\varepsilon_0 = 8,85.10^{-12}$ F/m est la permittivité absolue du vide (ou de l'air). Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient :

$$C = \varepsilon_r C_0 = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{e}$$

La **permittivité relative** est définie par le rapport :

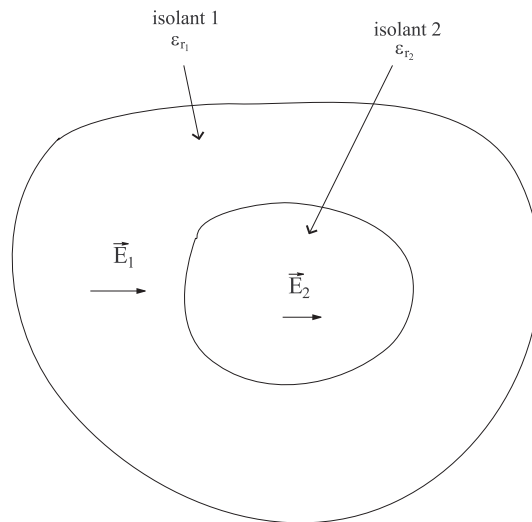
$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

La **permittivité absolue** est :

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

Pour l'air ou le vide, $\varepsilon_r = 1$. Pour tous les autres isolants, $\varepsilon_r > 1$.

Dans un isolant, le champ électrique est inversement proportionnel à la permittivité :



On a la relation :

$$\varepsilon_{r1} \vec{E}_1 = \varepsilon_{r2} \vec{E}_2$$

2.2.2 Rigidité diélectrique

Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au delà d'une certaine valeur appelée **tension de claquage**, il apparaît un **arc électrique** dans l'isolant : courant intense traversant l'isolant en suivant un chemin formé par des molécules ionisées. Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a **rupture diélectrique** ou **claquage** \Rightarrow destruction de l'isolant, irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrons).

La **rigidité dielectrique** G d'un isolant est définie par le rapport entre la tension U à laquelle se produit le claquage et la distance L entre les électrodes entre lesquelles est appliquée la tension :

$$G = \frac{U}{L}$$

G est généralement exprimée en kV/mm.

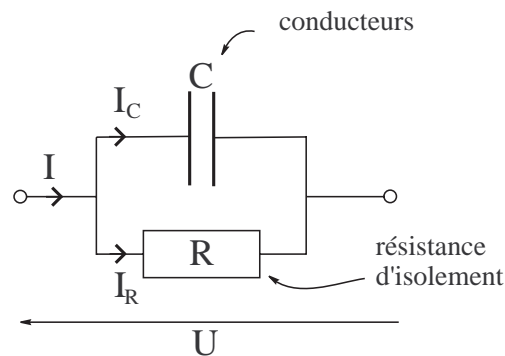
Par rapport aux positions relatives de la direction du champ électrique et des surfaces principales de l'isolant, la rigidité diélectrique peut être **transversale** ou **longitudinale**. La rigidité diélectrique dépend de :

- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension ;
- la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère ;
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...).

2.2.3 Angle de pertes diélectriques et facteur de dissipation diélectrique

2.2.3.1 Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif

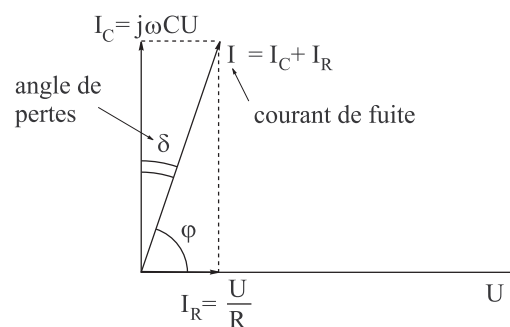
Un isolant placé entre deux conducteurs peut être modélisé de manière simplifiée par le circuit équivalent suivant :



La capacité C représente les conducteurs et la résistance R est la **résistance d'isolement** de l'isolant, elle est toujours $\geq 10^{12} \Omega$.

2.2.3.2 Calcul de l'angle de pertes diélectriques

L'**angle de pertes** δ est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension U entre les conducteurs et le **courant de fuite** I traversant l'isolant :



On a :

$$\tan \varphi = \frac{CU\omega}{\frac{U}{R}} = RC\omega$$

$$\Rightarrow \tan \delta = \frac{1}{\tan \varphi} = \frac{1}{RC\omega}$$

La valeur $\tan \delta$ est appelée **facteur de dissipation diélectrique**. On définit également l'**indice de pertes** :

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_r \tan \delta$$

L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant :

- bon isolant \rightarrow résistance d'isolement R élevée $\Rightarrow \delta$ faible ;
- mauvais isolant $\rightarrow R$ faible $\Rightarrow \delta$ élevé.

En pratique, le facteur de dissipation $\tan \delta$ varie entre 10^{-2} et 10^{-4} . Il dépend de la fréquence de la tension appliquée selon une loi plus complexe que celle déterminée précédemment à partir du modèle simplifié : $\tan \delta$ présente des maxima pour certaines fréquences.

2.2.3.3 Calcul des pertes diélectriques

Un isolant est le siège d'un dégagement de chaleur dû aux **pertes diélectriques**. On montre que la puissance par unité de volume des pertes diélectriques est :

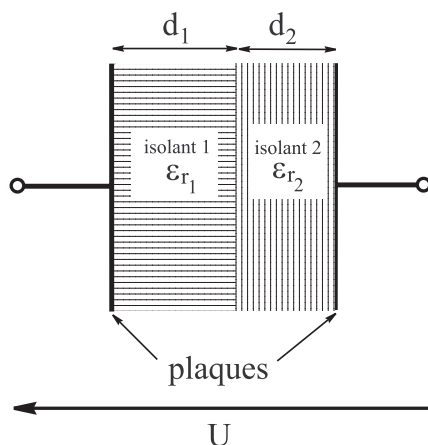
$$P_u = \frac{5}{9} \varepsilon_r'' f E^2 10^{-12}$$

avec :

- P_u : pertes diélectriques (en W/cm³) ;
- ε_r'' : indice de pertes $\varepsilon_r \tan \delta$;
- f : fréquence (Hz) ;
- E : valeur efficace du champ électrique (en V/cm).

2.2.4 Calcul du champ électrique dans un isolant

Soit un condensateur dont les plaques sont séparées par deux isolants :



On veut calculer les champs E_1 et E_2 respectivement dans l'isolant 1 et dans l'isolant 2. On a :

$$\begin{cases} E_1 d_1 + E_2 d_2 = U \\ \varepsilon_{r1} E_1 = \varepsilon_{r2} E_2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} E_1 = \frac{U}{d_1 + \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} d_2} \\ E_2 = \frac{U}{\frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}} d_1 + d_2} \end{cases}$$

Application : calcul du champ dans les isolants contenant des inclusions d'impuretés (bulles d'air, ...).

2.2.5 Résistance à l'arc

C'est la durée maximale d'application d'une tension supérieure à la tension de claquage d'un isolant avant l'apparition d'un arc électrique. Elle se mesure en secondes.

2.2.6 Influence de la température sur les isolants

Une élévation de température contribue à diminuer la durée de vie d'un isolant :

- diminution de la résistance d'isolement (les isolants ont généralement un coefficient de température négatif) ;
- diminution de la rigidité diélectrique ;
- oxydation ;
- ramolissement pouvant atteindre la fusion.

2.2.6.1 Loi expérimentale de vieillissement des isolants

Une augmentation de 10 °C de la température d'un isolant conduit à doubler sa vitesse de vieillissement. L'élévation de température est provoquée par les pertes diélectriques et l'échauffement des conducteurs. La chaleur est difficilement évacuée par les isolants car ceux-ci ont une conductivité thermique très faible.

2.2.6.2 Classification thermique des isolants

Les isolants sont classés suivant la température maximale en dessous de laquelle ils ont une durée de vie d'une dizaine d'années.

classe	température max. (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	>180

2.3 Matériaux isolants

2.3.1 Types d'isolants utilisés dans l'industrie électrique

Isolants naturels :

- minéraux ;
- organiques.

Isolants synthétiques :

- matières plastiques
 - . thermoplastiques ;
 - . thermodurcissables.
- élastomères ;
- composites.

Les isolants sont classés en trois types :

- solides ;
- liquides ;
- gazeux.

2.3.2 Isolants solides

2.3.2.1 Minéraux

Verres : sable siliceux + chaux + soude. Utilisés pour les isolateurs, les fils de verre, résistent à la chaleur et aux agents chimiques.

Propriétés : $T_{max} = 400$ à 500 °C

$$G \approx 7 \text{ kV/mm}$$

$$\delta = 0,02 \text{ à } 0,04$$

$$\varepsilon_r = 7$$

Céramiques : argile + quartz + fondants + oxydes métalliques. Utilisées dans les isolateurs de lignes aériennes et d'antennes, les supports d'inductances HF et UHF, les

condensateurs HF, les composants piézo-électriques.

Propriétés : $T_{max} = 200$ à 500 °C
 $G \approx 10$ à 20 kV/mm
 $\delta = 5.10^{-4}$ à $1, 2.10^{-2}$
 $\varepsilon_r = 10$ à 3000

Mica et produits micacés : silicates hydratés de métaux alcalins. Utilisés pour l'isolation à haute température des radiateurs de composants de puissance (feuilles de mica).

Propriétés : $T_{max} = 500$ à 1000 °C
 $G \approx 210$ à 240 kV/mm
 $\delta = 3.10^{-4}$ à 26.10^{-4}
 $\varepsilon_r = 6$ à 7

2.3.2.2 Organiques

Papiers : cellulose extraite du bois ou de l'alfa. Imprégnés de diélectrique liquide pour éviter l'absorption d'eau, ils sont utilisés dans les transformateurs secs et les condensateurs.

Propriétés : $T_{max} = 105$ °C
 $G \approx 50$ à 80 kV/mm (papier sec) ; 100 kV/mm (papier imprégné d'huile)
 $\delta = 2.10^{-3}$ à 4.10^{-3}
 $\varepsilon_r = 4$ à 6

Textiles : coton, soie naturelle, fibres artificielles. Rubans, toiles pour l'isolation, de conducteurs de faible diamètre, bobines, guipage de câbles.

Propriétés : $T_{max} = 90$ à 120 °C
 $G \approx 5$ à 10 kV/mm
 $\varepsilon_r = 3$

Caoutchouc : résine naturelle, latex de l'hévéa. Isolation de conducteurs et de câbles.

Propriétés : $T_{max} = 60$ °C
 $G \approx 20$ à 30 kV/mm
 $\varepsilon_r = 3$

2.3.2.3 Isolants synthétiques : matières plastiques

Une matière plastique est le résultat d'un mélange qui comprend :

- une résine de base ou **polymère**, obtenue à partir de réactions chimiques complexes de polymérisation effectuées sur des matières de base :
 - . dérivés du pétrole ou du charbon ;
 - . calcaires, sable, fluorures, sels marins ;
 - . bois.
- + catalyseurs.
- des **adjuvants** :
 - . lubrifiants : facilitent la fabrication ;
 - . stabilisants : évitent la décomposition ;

- . plastifiants : améliorent la souplesse ;
- . charges (poudre de verre, déchets textiles) : améliorent les caractéristiques mécaniques et physiques.

Les procédés de fabrication des matières plastiques sont principalement basés sur des traitements à haute température, sous des pressions élevées.

On distingue deux catégories de matières plastiques :

- **Thermoplastiques** : ils peuvent être ramollis par chauffage puis durcis par refroidissement de manière répétée. Mise en forme à l'état ramolli dans un moule, processus de fabrication réversible.
- **Thermodurcissables** : ils sont transformés de manière irréversible en matériaux infusibles ou insolubles par un traitement thermique. Ils durcissent sous l'effet de la chaleur.

Caractéristiques des matières plastiques :

- très bonne rigidité diélectrique : toujours ≥ 10 kV/mm ;
- résistivité élevée : $10^8 \leq \rho \leq 10^{17}$ $\Omega.m$;
- faibles pertes diélectriques ;
- propriétés mécaniques inférieures à celles des métaux mais pouvant être améliorées par les procédés de fabrication (charges).

2.3.2.4 Matières plastiques utilisées en électrotechnique

Thermodurcissables

Bakélite (phénoplastes) : à base de résines phénoliques + charge de poudre de bois, papier ou mica. Isolants moulés : plaques à bornes, supports, boîtiers ; isolants stratifiés : plaques, carcasses, tubes, vernis.

Epoxydes : à base de résines époxydes. Excellentes propriétés diélectriques, insensibles aux agents atmosphériques, stables à la chaleur. Facilité de moulage : pièces de grandes dimensions, vernis, colles, laques, plaques de circuits imprimés.

Polyesters : à base d'esters (action d'un acide sur un alcool). Bonnes propriétés diélectriques, résistent à la chaleur. Moulage à froid, vernis à séchage rapide.

Silicones : polymères à base de silicium et d'oxygène. Bonnes qualités diélectriques, très bonne tenue à la température. Ils se présentent sous forme d'huiles, graisses, caoutchouc synthétiques. Enrobage d'isolation et d'étanchéité.

Aminoplastes : polymères à base de résines aminiques. Bonne résistance à l'arc. Pièces d'appareillage, panneaux isolants, vernis.

Thermoplastiques

PVC (polychlorure de vinyle) : bonnes propriétés diélectriques et mécaniques, incombustible. Isolation des câbles, tubes, conduits, pièces d'appareillages.

Polyéthylène (PE) : léger, facile à mouler, isolation des câbles.

Polytétrafluoréthylène (PTFE, Téflon) : très bonne tenue à la température, très bonnes qualités diélectriques et mécaniques, autolubrifiant. Fabrication de joints et de bagues, isolation des câbles.

Polystyrène (PS) : léger, résiste aux chocs, très bonnes qualités diélectriques. Isolation des câbles, cuves.

Polymétacrylate de méthyle (PMMA, Plexiglas) : transparent, résiste aux agents chimiques, bon isolant. Fabrication de vitres, pièces d'appareillages, panneaux.

Polyamide (PA, Nylon) : bonne résistance à l'usure et à la température, léger. Réalisation de pièces d'appareillages, vernis, émail pour l'isolation des fils de bobinage.

Caoutchouc : deux types de caoutchoucs :

- naturel : sève de l'hévéa (latex) + vulcanisation (traitement au soufre pour le durcir) ;
- synthétique : polymère du butadiène.

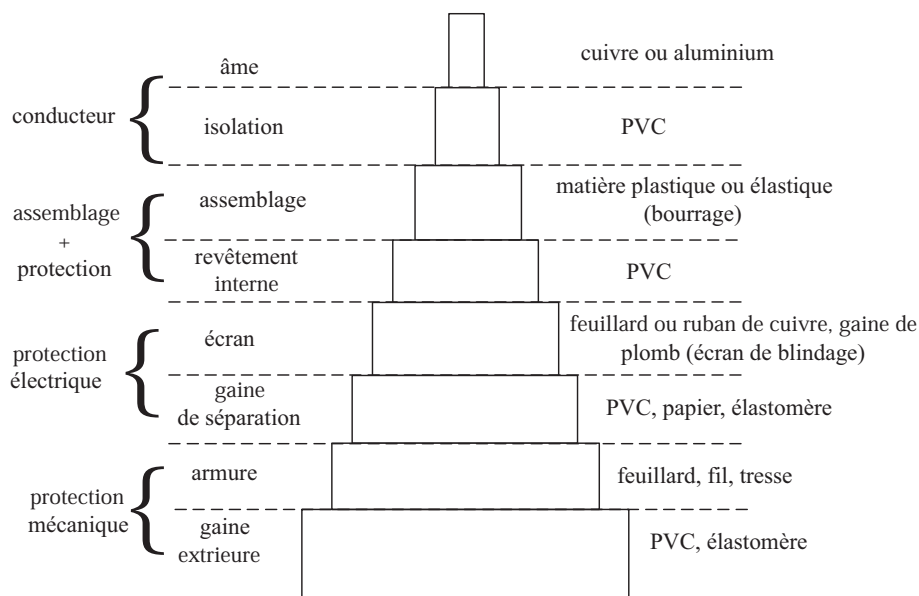
Isolation des câbles, joints étanches pour cuves de transformateurs.

Produits cellulosiques : à base de pâte de papier, de fibres de coton ... Ils se présentent sous forme de fibres ou de vernis.

2.3.2.5 Application : isolation des câbles de transport d'énergie

Un câble de transport d'énergie est constitué d'une âme conductrice pouvant être creuse pour la circulation d'un liquide de refroidissement et d'un ensemble de couches superposées pour l'assemblage des conducteurs et la protection électrique et mécanique.

Structure d'un câble isolé :



2.3.3 Isolants liquides

Les isolants liquides présentent l'avantage de se régénérer après un claquage ; ils servent aussi au refroidissement par convection ou par évaporation (les isolants liquides ont généralement une bonne conductivité thermique). Ils sont utilisés seuls ou bien ils imbibent un isolant solide dont ils remplissent les vides.

2.3.3.1 Huiles minérales

Dérivés du pétrole, utilisées dans les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs et les câbles. Risque d'oxydation à chaud en présence d'oxygène.

Propriétés : rigidité diélectrique : $G \approx 9$ à 10 kV/mm

facteur de dissipation : $\tan \delta = 4.10^{-4}$

permittivité relative : $\epsilon_r = 4$ à 6

2.3.3.2 Huiles synthétiques

Huiles chlorées : ininflammables (pas de risque d'incendies), utilisées pour les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs.

Huiles silicones : résistent à des températures élevées, prix élevés.

Huiles végétales (ricin) : plastifiant dans la fabrication des vernis et des résines.

2.3.3.3 Vernis

Ce sont des associations résine + solvant + siccatif. Utilisés pour l'imprégnation des bobinages.

2.3.4 Isolants gazeux

Tous les gaz sont isolants à la température ambiante.

L'**air** est le plus utilisé, à la pression atmosphérique ou sous pression. Comprimé à 10 bars, sa rigidité diélectrique est de 225 kV/mm ; à la pression atmosphérique elle n'est que de 3 kV/mm. Isolation des lignes aériennes, disjoncteurs pneumatiques, condensateurs à air.

L'**azote** est chimiquement neutre. Transformateurs à atmosphère d'azote sous pression, câbles HT, parafoudres.

L'**hexafluorure de soufre** (SF_6) possède une bonne rigidité diélectrique : 7,5 kV/mm, 5 fois plus lourd que l'air, incolore, inodore, non toxique. Dispositif d'extinction de l'arc électrique dans les disjoncteurs HT.

L'**hydrogène** a une conductivité thermique élevée, refroidissement des machines électriques de grande puissance, problème : risque d'explosion, nécessite une bonne étanchéité.

Chapitre 3

Les semiconducteurs

3.1 Introduction

Les semiconducteurs sont des matériaux solides utilisés pour la fabrication des composants électroniques. Le matériau semiconducteur le plus utilisé est le **silicium** (Si). Autres matériaux semiconducteurs : **germanium**(Ge), **arséniure de gallium** (AsGa), **phosphure d'indium** (InP)...

Ils sont caractérisés par leur résistivité qui peut varier de $10^{-4} \Omega.m$ à $10^2 \Omega.m$ en fonction de la température (ρ diminue lorsque T augmente) : ils se situent donc entre les conducteurs et les isolants.

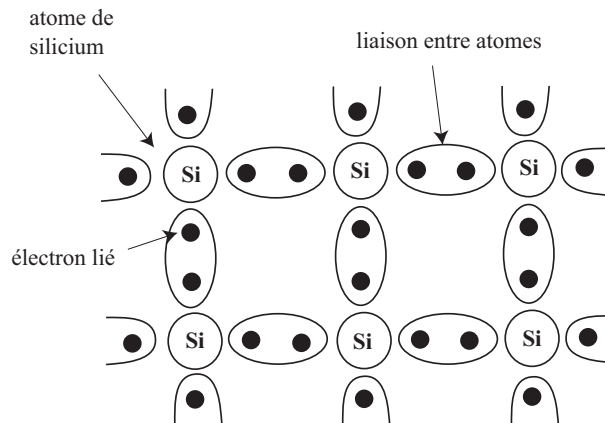
Les semiconducteurs ont été découverts au XIX^{ème} siècle mais leurs applications pratiques ont commencé en 1947 avec la découverte du transistor qui a remplacé les tubes à vide, encombrants, peu fiables et grands consommateurs d'énergie.

Composants à semiconducteurs : diodes à jonction, transistors bipolaires, transistors à effet de champ (JFET et MOSFET), composants de puissance (thyristors, triacs, IGBT...), circuits intégrés.

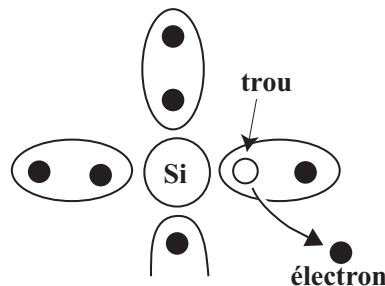
3.2 Propriétés des semiconducteurs

3.2.1 Semiconducteurs purs

Les semiconducteurs purs sont des solides cristallisés : les atomes sont régulièrement disposés dans l'espace, ils forment un **cristal**. Dans le cas du silicium, chaque atome possède quatre électrons périphériques qu'il met en commun avec les quatre atomes voisins → **liaisons** entre atomes assurant la rigidité du cristal.



Sous l'effet de la température ambiante, certains électrons peuvent acquérir une énergie suffisante pour quitter une liaison entre deux atomes → il y a alors création d'une paire électron/trou.

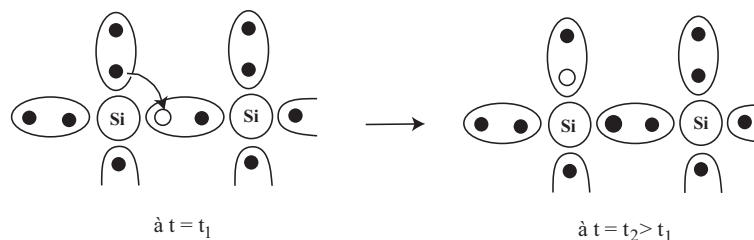


L'atome de silicium correspondant devient alors un ion positif.

3.2.2 Nature de la conduction dans un semiconducteur pur

Le courant électrique dans un semiconducteur pur est constitué :

- d'électrons libres qui se déplacent entre les atomes de silicium ;
- d'électrons liés qui peuvent se déplacer de trou en trou : équivalent au déplacement d'un trou. Un trou est donc équivalent à une charge $+e$ sautant d'atome en atome.



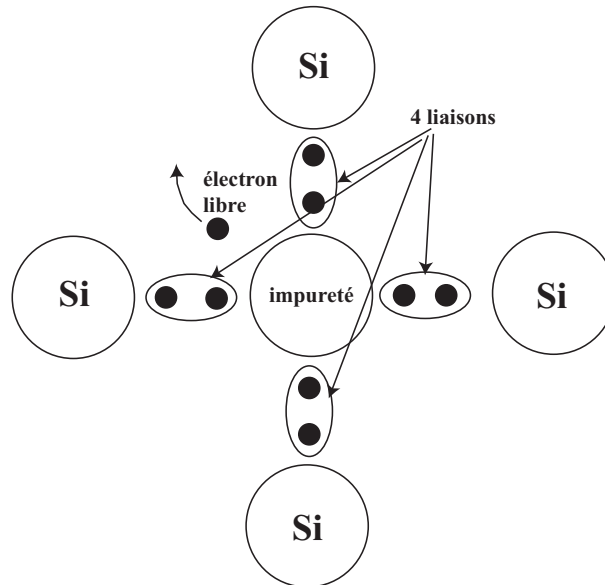
Dans un semiconducteur pur, chaque électron libéré crée un trou ⇒ concentration de trous = concentration d'électrons libres ($\approx 10^9 \text{ e}^-/\text{cm}^3$ pour le silicium à 25°C).

Plus la température augmente, plus il y a création de paires électron/trou ⇒ augmentation de la conductivité d'un semiconducteur avec la température.

3.2.3 Semiconducteurs dopés

Dans un cristal de semiconducteur pur, on ajoute des **impuretés** (atomes étrangers) possédant **5 électrons périphériques**, ex : arsenic, phosphore, antimoine. C'est le **do-page**.

Parmi ces 5 électrons périphériques, 4 forment des liaisons avec des atomes de silicium, le cinquième devient un électron libre. Les atomes d'impuretés sont appelés **donneurs** (d'électrons). Ils deviennent des **ions positifs fixes** par rapport au cristal.



Le nombre d'électrons libres augmente dans le cristal \Rightarrow concentration d'électrons libres $>$ concentration de trous. Les électrons sont **majoritaires** et les trous sont **minoritaires**, le semiconducteur est de **type N**.

De même, si on ajoute à un cristal de semiconducteur pur des atomes d'impuretés possédant **3 électrons périphériques**, il manque un électron pour assurer une liaison \Rightarrow création d'un trou qui peut accepter un électron : les impuretés sont des **accepteurs** (d'électrons), ex : bore, gallium, aluminium, indium. Ils deviennent des **ions négatifs fixes** par rapport au cristal. Le nombre de trous augmente : concentration de trous $>$ concentration d'électrons libres. Les trous sont **majoritaires** et les électrons **minoritaires**. Le semiconducteur est de **type P**.

3.3 Production du silicium

Le silicium est obtenu à partir du sable (silice SiO_2) par des traitements chimiques et physiques complexes. Ce silicium n'est pas directement utilisable car il n'est pas sous forme de cristal : les atomes ne sont pas rangés régulièrement dans l'espace (silicium **polycristallin**).

Pour obtenir le silicium monocristallin, le silicium polycristallin est fondu dans un creuset puis les impuretés (matériau dopant) sont ajoutées.

Trois types de dopage :

- N^- ou P^- \rightarrow dopage faible : 10^{14} atomes/cm³ ;
- N ou P \rightarrow dopage normal : 10^{16} atomes/cm³ ;
- N^+ ou P^+ \rightarrow dopage fort : 10^{20} atomes/cm³.

Un lingot de silicium monocristallin est obtenu par **tirage** à partir d'un **germe** convenablement orienté. Diamètre normalisé des lingots : 150 mm, 200 mm et 300 mm.

Les lingots sont ensuite découpés en plaquettes circulaires, appelées **wafer**, au moyen d'une scie diamantée. Epaisseur des plaquettes après rodage : entre 350 et 650 μm . Elles ne doivent présenter aucun défaut et être parfaitement planes.

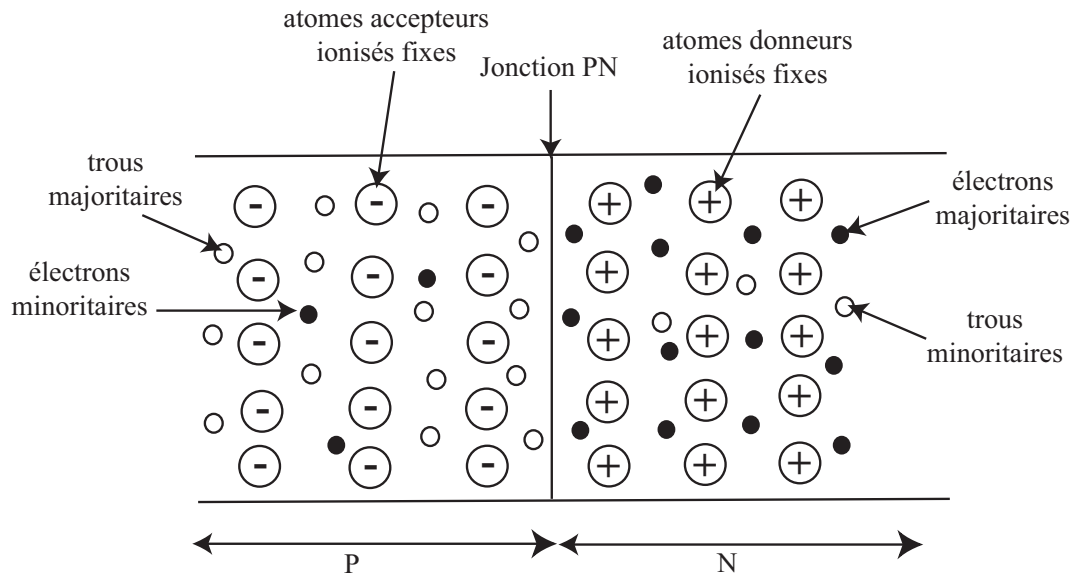
Toutes ces opérations se font dans des salles hermétiques pour empêcher la contamination du silicium par d'autres impuretés que celles nécessaires au dopage.

3.4 La jonction PN

3.4.1 Propriétés de la jonction PN

Soit un cristal de semiconducteur de type N d'un côté d'une frontière et de type P de l'autre côté. La surface de séparation entre les deux régions est appelée **jonction PN**.

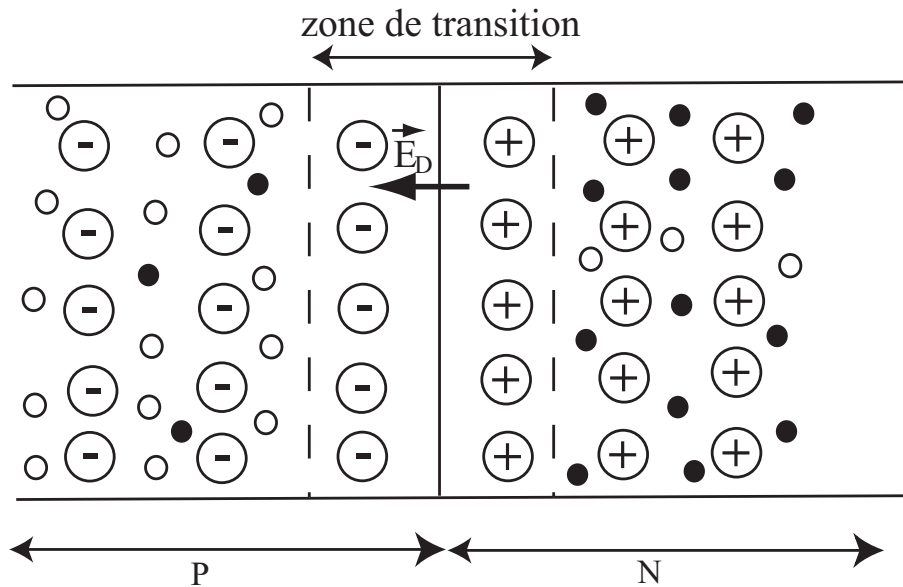
Jonction PN à l'état initial :



Autour de la jonction PN, les électrons libres qui ont une concentration très élevée dans la région N **diffusent** vers la région P où ils ont une concentration très faible.

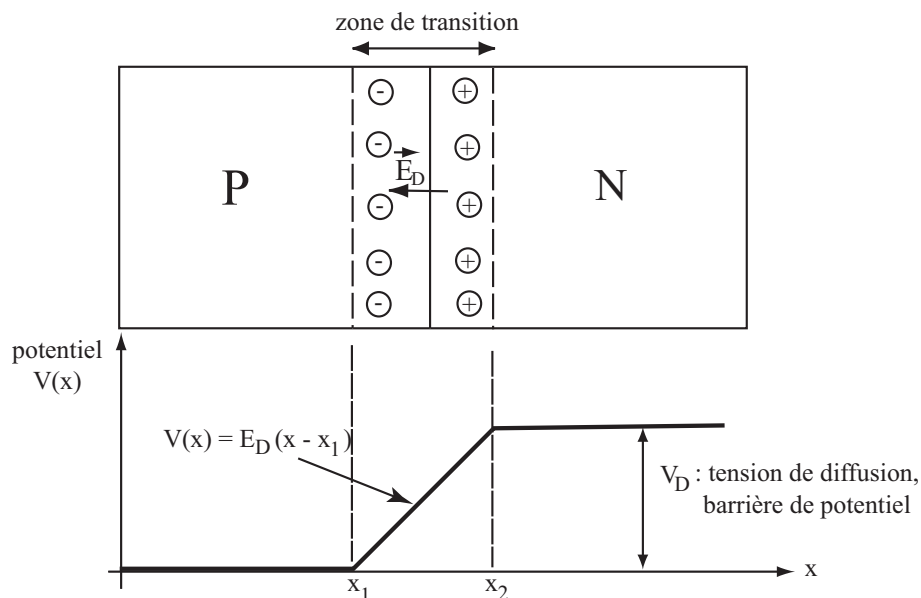
De ce phénomène de diffusion, il résulte la création, autour de la jonction PN, d'une zone dans laquelle il n'y a plus de porteurs de charges mobiles. Il ne reste plus que les ions fixes, positifs du côté N, négatifs du côté P.

Cette zone est appelée **zone de transition** ou **zone de déplétion** ou **charge d'espace**.



Les ions fixes de la zone de charge d'espace créent un champ électrique \vec{E}_D , appelé champ de diffusion, dirigé de la région N vers la région P (des charges positives vers les charges négatives, comme dans un condensateur).

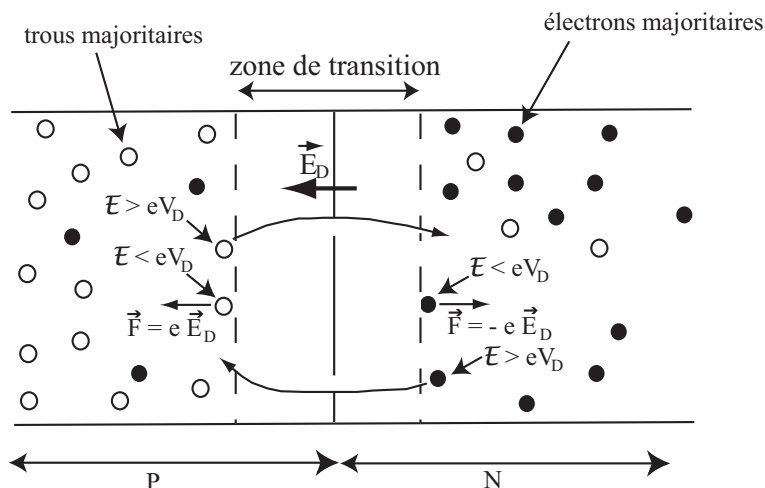
3.4.2 Potentiel dans la jonction PN



Le champ \vec{E}_D entraîne l'existence d'une différence de potentiel V_D appelée **tension de diffusion**, entre les frontières de la zone de transition. Cette barrière de potentiel existe en l'absence de générateur externe (**built-in voltage**). Pour le silicium, $V_D \approx 0,7$ V.

3.4.3 Courants dans une jonction PN

3.4.3.1 Courant de diffusion

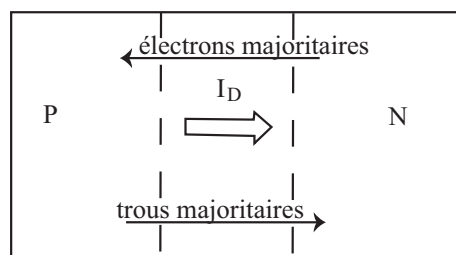


Les électrons libres de la région N qui abordent la zone de transition sont soumis à une force $\vec{F} = -e\vec{E}_D$ due au champ de diffusion qui règne dans cette zone. Deux cas se présentent :

- la majorité d'entre eux, dont l'énergie \mathcal{E} est inférieure à eV_D , ne peuvent pas vaincre cette force \rightarrow ils sont repoussés vers la zone N ;
- certains d'entre eux peuvent acquérir une énergie $\mathcal{E} \geq eV_D$ sous l'effet de la température ambiante (agitation thermique) \rightarrow ils peuvent traverser la zone de transition et passer dans la région P.

Les trous de la région P ont un comportement semblable : la majorité d'entre eux reste dans la région P tandis que certains peuvent passer dans la région N.

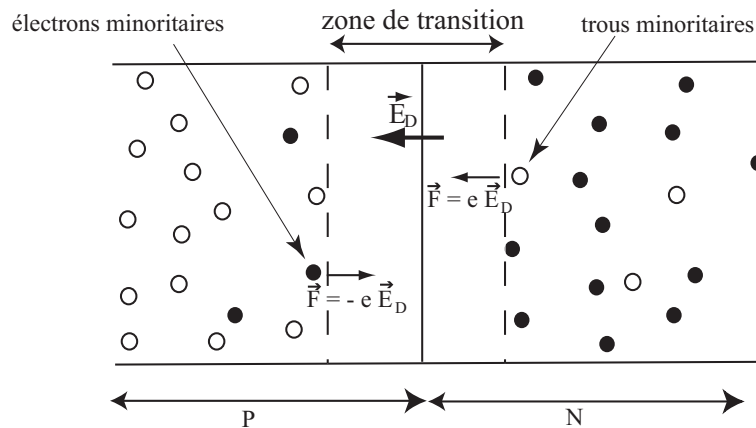
La jonction PN est donc traversée par un double déplacement d'ensemble de porteurs **majoritaires** :



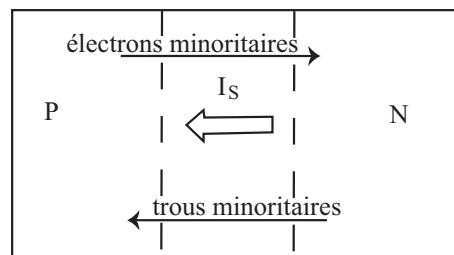
Il en résulte un courant I_D appelé **courant de diffusion**, dirigé de **P vers N** : c'est un **courant de majoritaires**.

3.4.3.2 Courant de saturation

Les porteurs minoritaires d'une région qui abordent la zone de transition sont accélérés par le champ \vec{E}_D vers l'autre région :



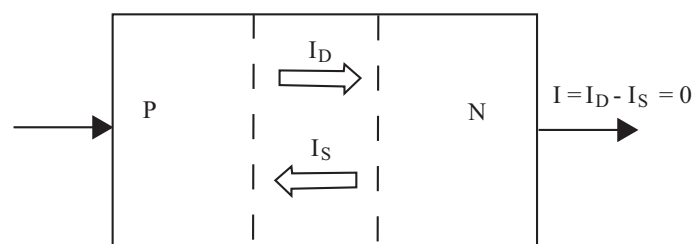
La jonction est alors traversée par un double déplacement de **porteurs minoritaires** :



Il en résulte un courant I_S appelé **courant de saturation** dirigé de **N vers P** : c'est un **courant de minoritaires**.

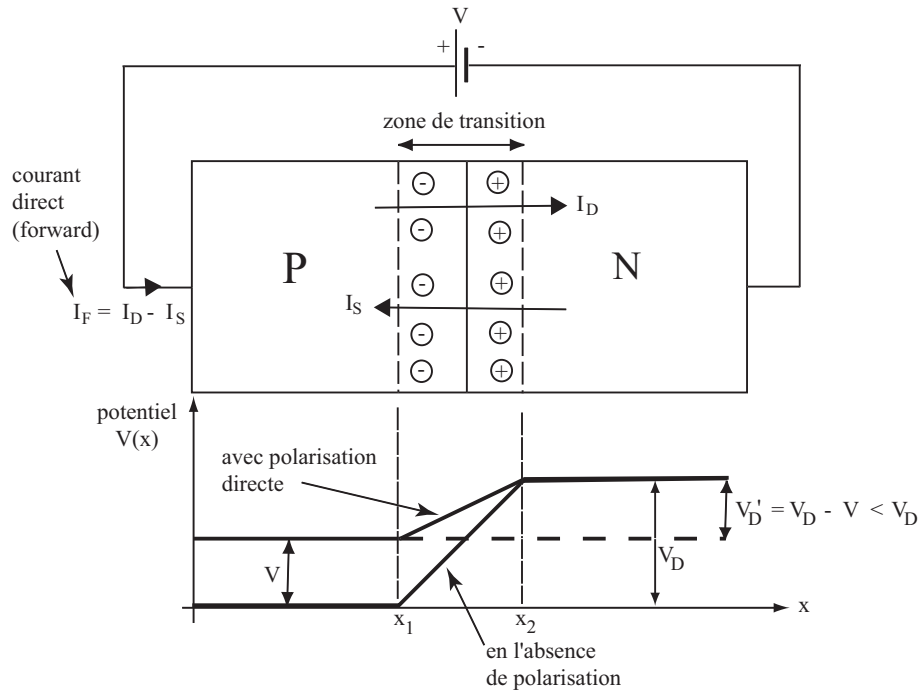
Le courant de saturation I_S ne dépend que du nombre de minoritaires \rightarrow il augmente avec la température ; il est très faible ($\approx 1 \mu A$).

Relation entre le courant de saturation I_S et le courant de diffusion I_D : le courant à l'extérieur du cristal est nul (circuit ouvert) $\rightarrow I_S = I_D$:



3.4.4 Jonction PN polarisée

3.4.4.1 Polarisation en sens direct



Le générateur de tension V augmente le potentiel de la région P \rightarrow la barrière de potentiel devient $V'_D = V_D - V < V \rightarrow$ un plus grand nombre de majoritaires est capable de traverser la zone de transition : il leur suffit d'une énergie plus faible $\mathcal{E} \geq e(V_D - V)$ au lieu de eV_D . Le courant de diffusion I_D augmente et devient très supérieur au courant de saturation I_S . On montre que la relation entre I_D et I_S est :

$$I_D = I_S(T) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right)$$

avec :

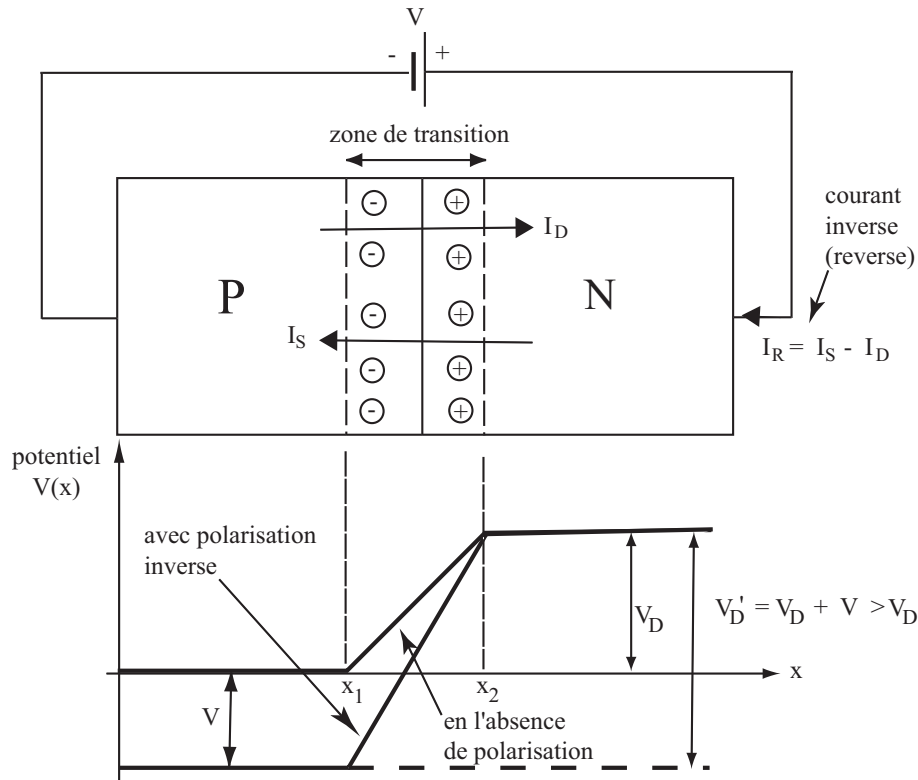
- $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C ;
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K (constante de Boltzmann) ;
- T : température absolue (en K).

Le courant direct $I_F = I_D - I_S$ devient :

$$I_F = I_S(T) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \approx I_D$$

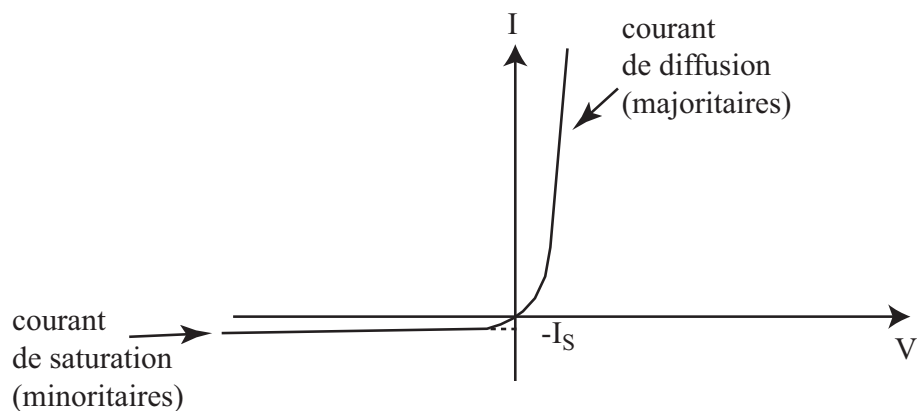
Il augmente avec la tension $V \rightarrow$ la jonction PN conduit en sens direct.

3.4.4.2 Polarisation en sens inverse



Le générateur entraîne une diminution du potentiel de la région P → la barrière de potentiel devient $V'_D = V_D + V > V_D$ → les majoritaires ne peuvent plus franchir la zone de transition car il leur faut une énergie trop importante $\mathcal{E} \geq e(V + V_D)$ → $I_D \approx 0$ et $I_R = I_S - I_D \approx I_S$ → la jonction PN ne conduit pas en sens inverse car I_S est très faible ($\approx 1 \mu\text{A}$).

On en déduit la caractéristique courant/tension de la jonction PN :



3.4.5 Claquage d'une jonction PN

Lorsque la jonction est polarisée en inverse et que la tension atteint une valeur $V < -V_{RM}$ (tension inverse maximale), le courant augmente rapidement : c'est le **claquage**. Il y a trois types de claquage.

3.4.5.1 Claquage par effet thermique

Dissipation de chaleur importante \rightarrow destruction de la jonction par surcharge en puissance.

3.4.5.2 Claquage par avalanche

Lorsque le champ électrique dans la jonction dépasse $5 \cdot 10^5$ V/cm et que celle-ci est faiblement dopée, les atomes du cristal sont ionisés par choc d'électrons.

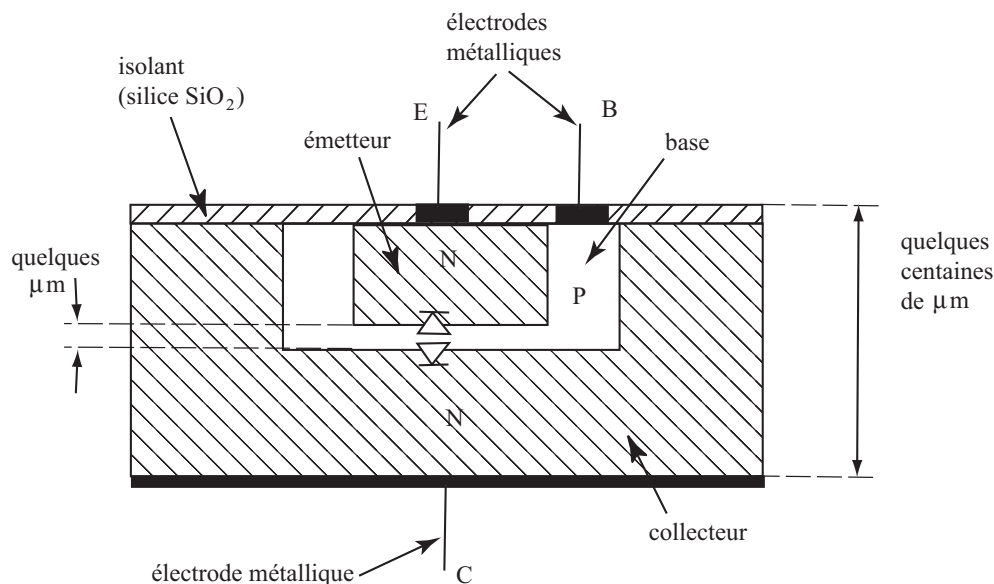
3.4.5.3 Claquage par effet de champ (effet Zener)

Lorsque le champ électrique dans la jonction dépasse 10^6 V/cm dans une jonction fortement dopée, les électrons de liaisons sont arrachés et provoquent l'avalanche.

3.5 Les transistors bipolaires

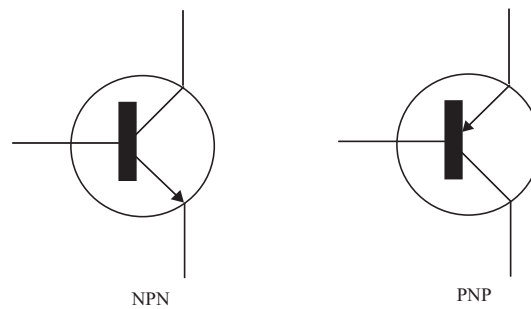
3.5.1 Constitution

Un transistor bipolaire est constitué d'un **substrat** (ou **chip**) de silicium comportant trois zones dopées successivement NPN ou PNP.



La base est très mince et faiblement dopée. Le transistor présente deux jonctions PN de sens passant opposés.

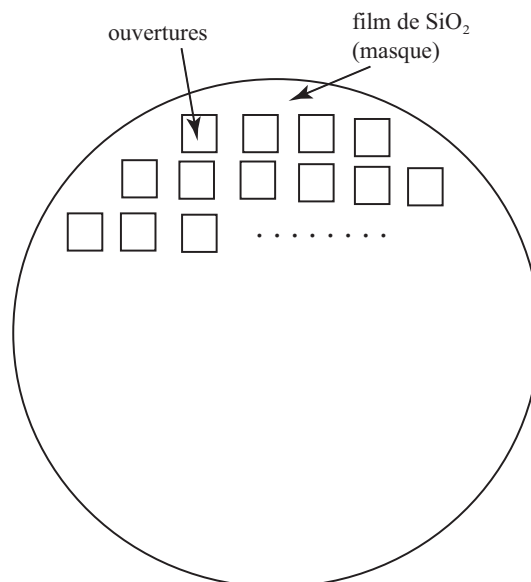
Symboles :



3.5.2 Fabrication

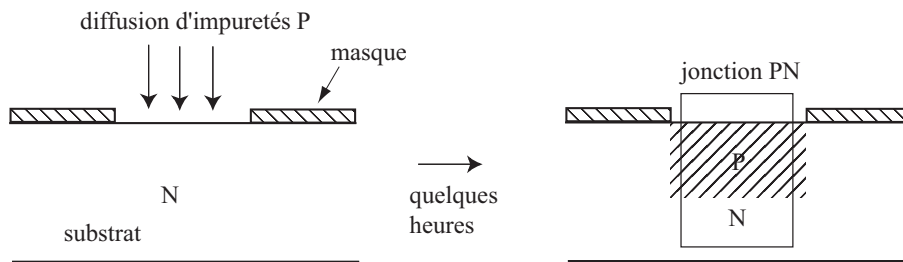
Les transistors sont fabriqués par la méthode de **diffusion gazeuse** :

- élément de départ : plaquette circulaire de silicium monocristallin, dopé de type N ou P, d'épaisseur \approx quelques dixièmes de millimètres et de 10 à 30 cm de diamètre (wafer) ;
- la plaquette de silicium est recouverte par un **masque** : film de silice (SiO_2) percé d'ouvertures de la taille des composants à réaliser. Une plaquette de 10 cm de diamètre permet de réaliser 200000 composants de 0,5 mm de coté ou 400000 composants de 0,35 mm de coté ;

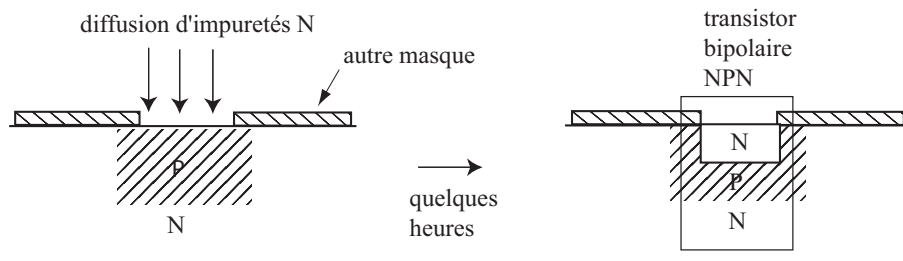


- la plaquette recouverte du masque est placée dans un four chauffé entre 1000 et 1300 °C contenant un gaz riche en impuretés (donneurs ou accepteurs). Les impuretés **diffusent** dans le silicium \rightarrow au bout de quelques heures, la concentration d'impuretés devient importante à la surface du silicium non protégé par le masque

→ obtention d'une jonction PN par la méthode de **diffusion gazeuse** ;



- pour obtenir un transistor bipolaire, on effectue une deuxième diffusion avec un autre masque ;



- l'épaisseur et la concentration en impuretés des zones diffusées dépend de la durée d'exposition aux impuretés. La zone N correspondant à la plaquette de silicium initiale est appelée **substrat** car elle supporte les autres zones. La méthode consistant à effectuer des diffusions successives est appelée **procédé PLANAR** ;
- la plaquette est ensuite découpée en **transistors discrets**. Des fils de connexion sont soudés par **évaporation d'or** sur chaque zone du transistor. Les transistors sont finalement placés dans des boîtiers plastique, céramique ou métallique.

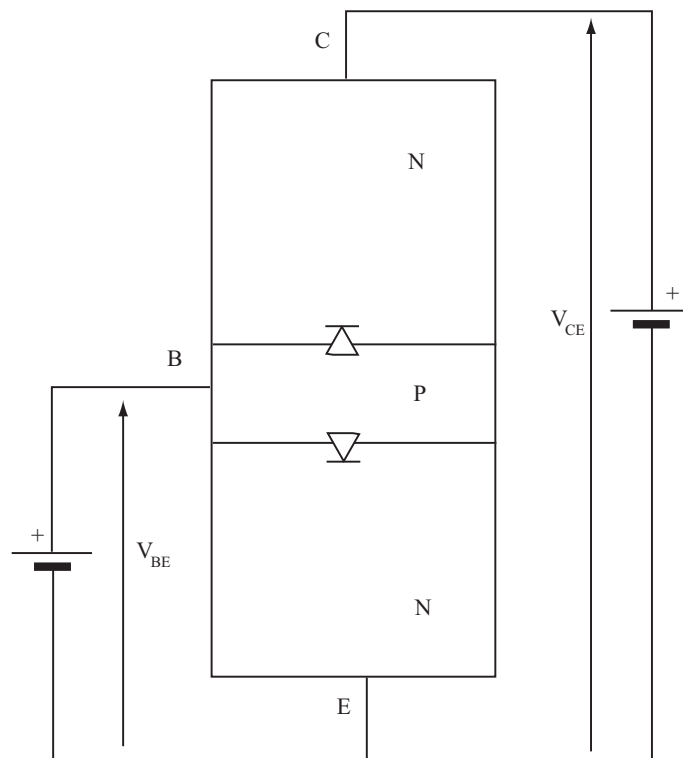
3.5.3 Principe de fonctionnement du transistor bipolaire

3.5.3.1 Polarisation

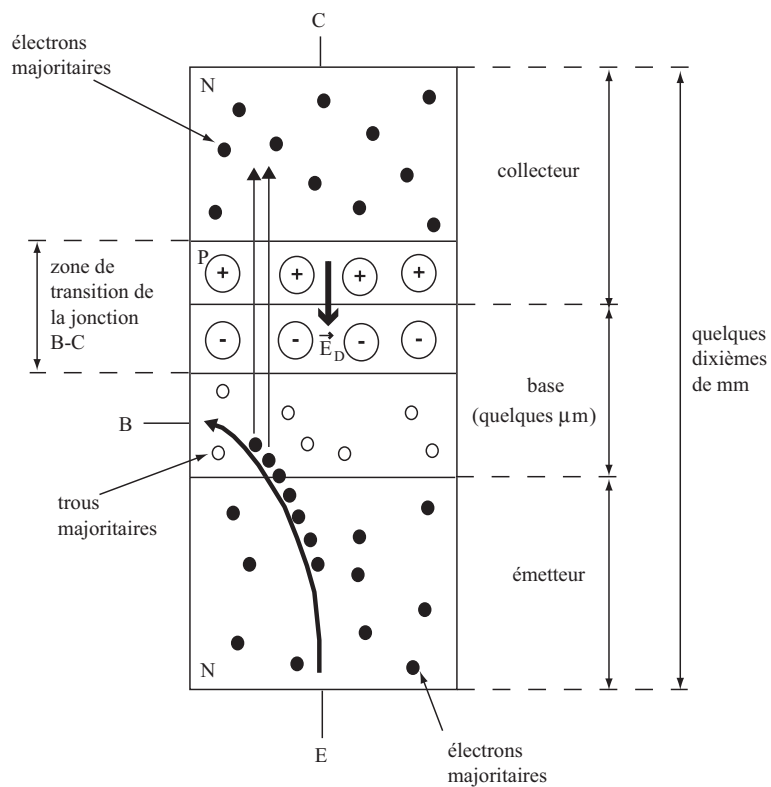
Polarisation normale pour un transistor NPN :

- jonction base-émetteur polarisée en sens direct : $V_{BE} > 0$; si $V_{BE} = 0$, l'une des deux jonctions est bloquée quelque soit V_{CE} ;
- jonction base-collecteur polarisée en sens inverse : $V_{CE} > V_{BE}$.

Dans le cas d'un transistor PNP, $V_{BE} < 0$ et $V_{CE} < V_{BE}$.



3.5.3.2 Fonctionnement

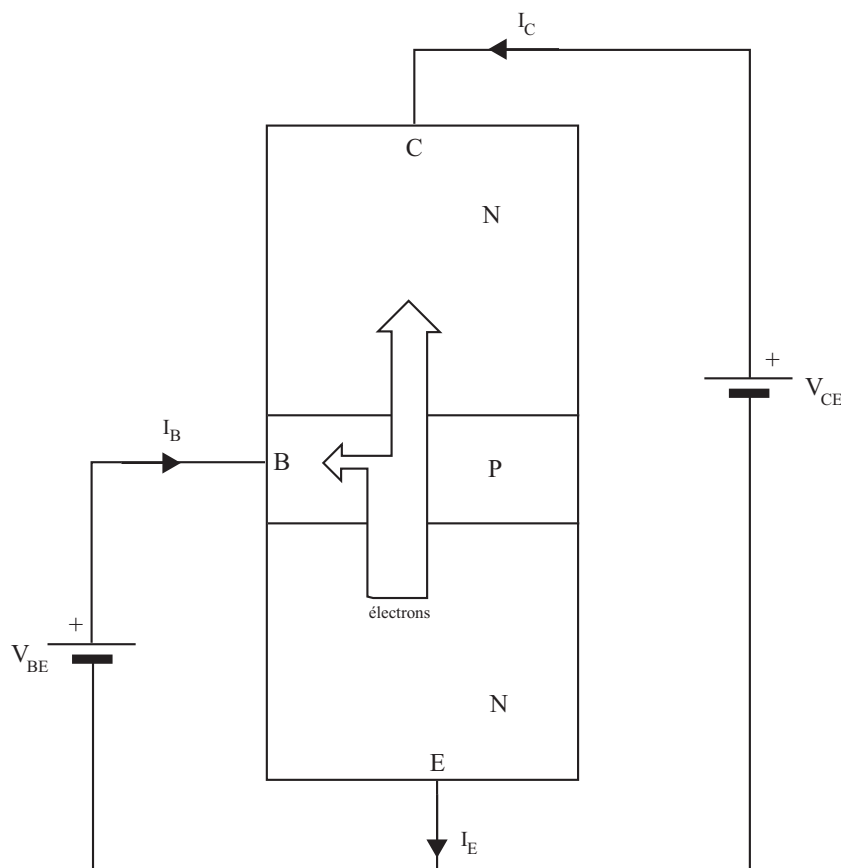


Les électrons majoritaires de l'émetteur diffusent à travers la jonction B-E polarisée en sens direct. Au cours de cette diffusion, quelques électrons se recombinent avec les trous majoritaires de la base mais le plus grand nombre d'entre eux atteint la jonction BC qui est très proche (car l'épaisseur de la base est très faible).

La jonction BC est polarisée en sens inverse \rightarrow elle est le siège d'un champ \vec{E}_D intense (champ de diffusion) dirigé du collecteur vers la base \Rightarrow les électrons qui se rapprochent de la zone de transition de la jonction BC sont attirés par le champ \vec{E}_D qui les envoie dans le collecteur \Rightarrow presque tous les électrons issus de l'émetteur arrivent dans le collecteur car la base est très mince (\rightarrow les électrons sont proches de la jonction BC) et peu dopée (\rightarrow peu de recombinaisons électron/trou).

La jonction BC, **polarisée en inverse** est alors le siège du passage d'un courant important : c'est l'**effet transistor** résultant du fait que les deux jonctions appartiennent à un même cristal et sont très proches l'une de l'autre.

3.5.3.3 Courants dans un transistor bipolaire



Le courant de base I_B est dû à la recombinaison électron/trou dans la jonction BC. Le courant de base est donc un courant de trous.

Le courant de collecteur I_C est dû au passage des électrons de l'émetteur vers le collecteur sous l'effet du champ de diffusion \vec{E}_D . Le courant de collecteur est donc un courant d'électrons.

On définit le **rendement de l'émetteur** :

$$\alpha = \frac{\text{nombre d'électrons arrivés dans le collecteur}}{\text{nombre total d'électrons émis par l'émetteur}} = \frac{I_C}{I_E}$$

C'est une constante pour un transistor donné : α ne dépend que de l'épaisseur et du dopage de la base. En général, $\alpha \approx 0,99$.

On en déduit le gain en courant du transistor :

$$\begin{cases} I_E = I_C + I_B \\ \alpha = \frac{I_C}{I_E} \end{cases} \Rightarrow \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Exemple : $\alpha = 0,99 \Rightarrow \beta \approx 100$.

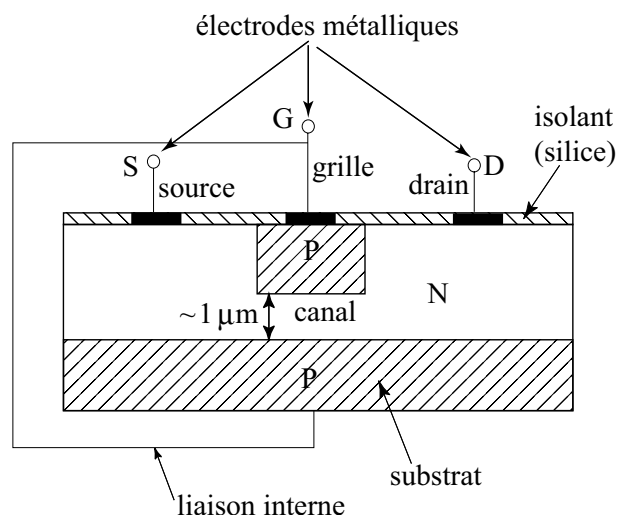
3.6 Les transistors unipolaires

Ce sont les transistors à effet de champ (TEC, FET : Field Effect Transistor). Deux types de TEC :

- TEC à jonctions : le JFET ;
- transistor MOS : MOSFET.

3.6.1 Le JFET

3.6.1.1 Constitution



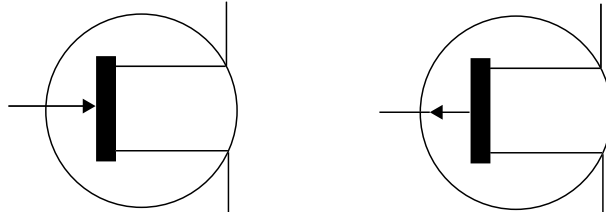
Sur un substrat de type P, on diffuse :

- une couche N très mince ($\approx 1 \mu\text{m}$), faiblement dopée : le **canal** ;
- dans la couche N, une zone P de la forme d'un parallélépipède : la **grille**.

Le canal est en contact avec deux électrodes métalliques de part et d'autre de la grille : le **drain** et la **source**.

Ce transistor est un **JFET à canal N**. Pour un JFET à canal P, la grille et le substrat sont de type N.

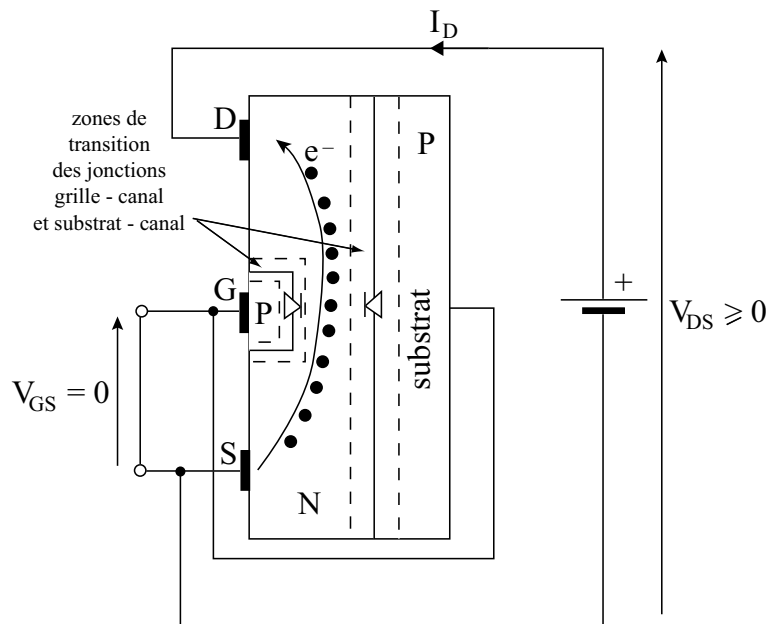
Symboles :



La flèche indique le sens passant de la jonction grille-canal.

3.6.1.2 Fonctionnement

On considère un JFET à canal N :



On suppose $V_{GS} = 0$. Si $V_{DS} > 0$ les électrons majoritaires du canal se déplacent de la source vers le drain sous l'effet de $V_{DS} \rightarrow$ courant de drain $I_D > 0$.

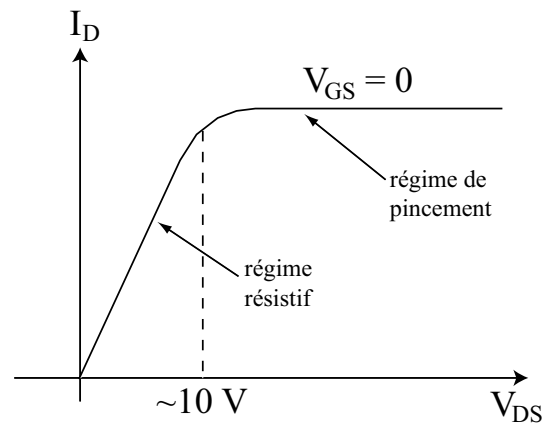
Tant que V_{DS} reste faible (quelques volts), le canal présente entre source et drain une résistance constante R_{DS} ne dépendant que de la longueur, la section et le dopage du canal. Le courant I_D est alors :

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_{DS}}$$

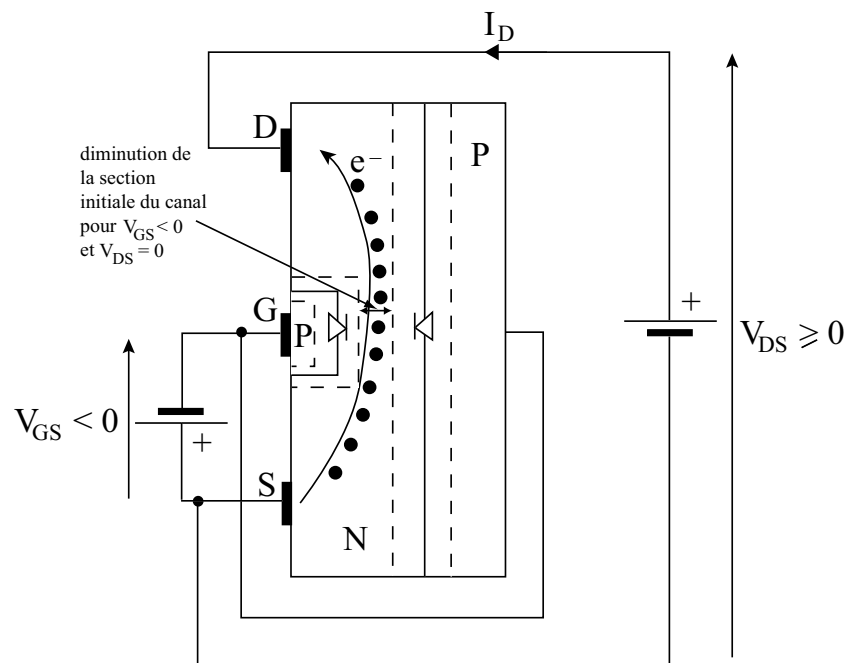
C'est le **régime résistif**.

Si V_{DS} augmente, la tension inverse des jonctions grille-canal et substrat-canal augmente

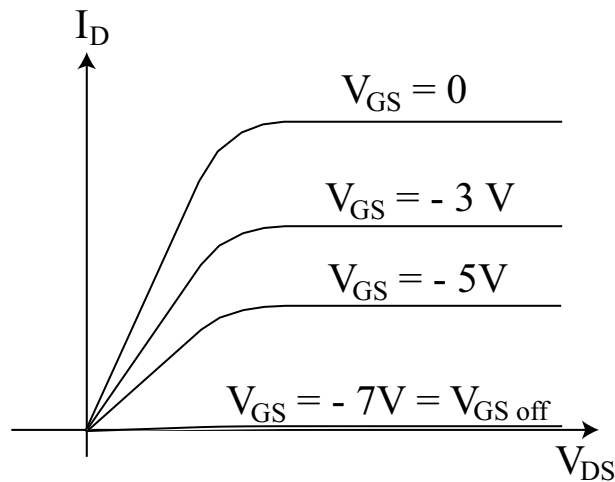
→ apparition et élargissement des zones de transition de ces jonctions → diminution de la section utile du canal : il y a **pincement du canal**. La résistance R_{DS} augmente et l'augmentation de V_{DS} est compensée par celle de R_{DS} → le courant I_D devient constant : c'est le **régime de pincement**.



Si $V_{GS} < 0$:



La section initiale du canal (pour $V_{DS} = 0$) est rétrécie par la polarisation inverse des jonctions grille-canal et canal-source, due à la tension $V_{GS} < 0$ → le régime de pincement est atteint pour un courant I_D d'autant plus faible que la tension V_{GS} est négative.



En régime résistif, le JFET est donc équivalent à une résistance commandée par la tension V_{GS} .

Il existe une tension $V_{GS\ off}$ appelée **tension de pincement** pour laquelle la section utile du canal est nulle même lorsque $V_{DS} = 0 \rightarrow I_D = 0$ quel que soit V_{DS} : le JFET est bloqué.

La tension V_{GS} doit toujours être négative, sinon les jonctions grille-canal et substrat-canal seraient polarisées en sens direct \rightarrow courants importants dans ces jonctions \rightarrow destruction du JFET.

3.6.1.3 Comparaison entre JFET et transistor bipolaire

	transistor bipolaire	JFET
courant d'entrée	faible mais non négligeable : il franchit une jonction en sens direct	négligeable : il franchit une jonction en sens inverse
porteurs assurant le courant de sortie	minoritaires de la base ; ils franchissent deux jonctions	majoritaires du canal ; ils ne franchissent aucune jonction
commande du courant de sortie	courant de base I_B	tension de grille V_{GS}

3.6.1.4 Avantages des JFET

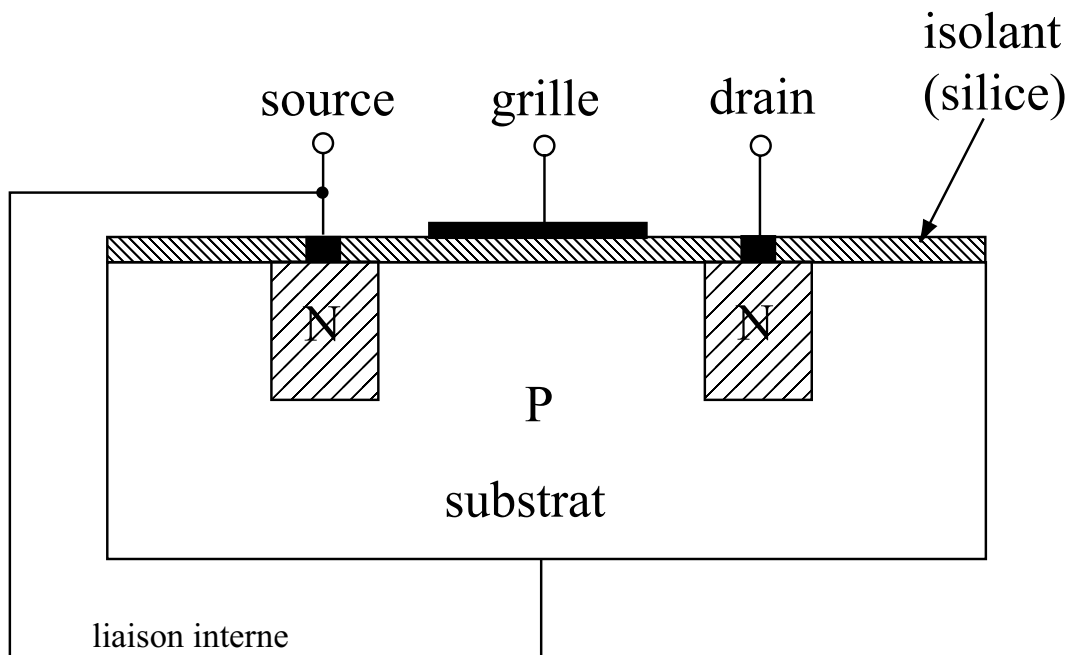
- résistance d'entrée élevée car le courant de grille est négligeable ;
- courant de drain pratiquement indépendant de la température car les porteurs de charge ne franchissent aucune jonction ;
- fabrication plus simple que les transistors bipolaires.

Application des JFET : étages d'entrée des amplificateurs à forte impédance d'entrée.

3.6.2 Le MOSFET

MOSFET = Metal Oxyde Semiconductor FET.

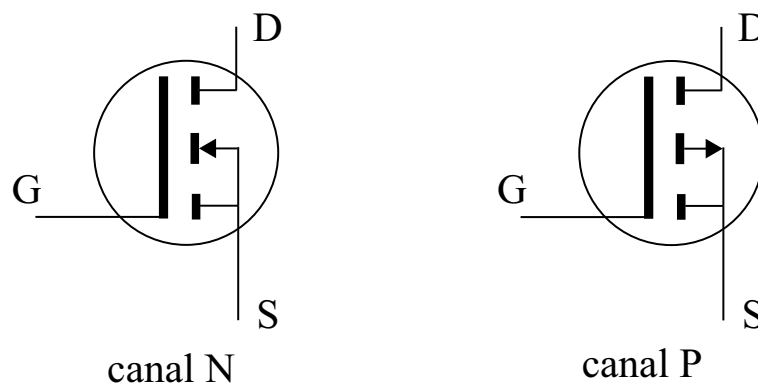
3.6.2.1 Constitution



Sur un substrat de type P, on diffuse deux régions N fortement dopées : la **source** et le **drain**. La **grille** est une électrode métallique séparée du substrat par une mince couche isolante. C'est un **MOSFET à canal N** ou **NMOS**.

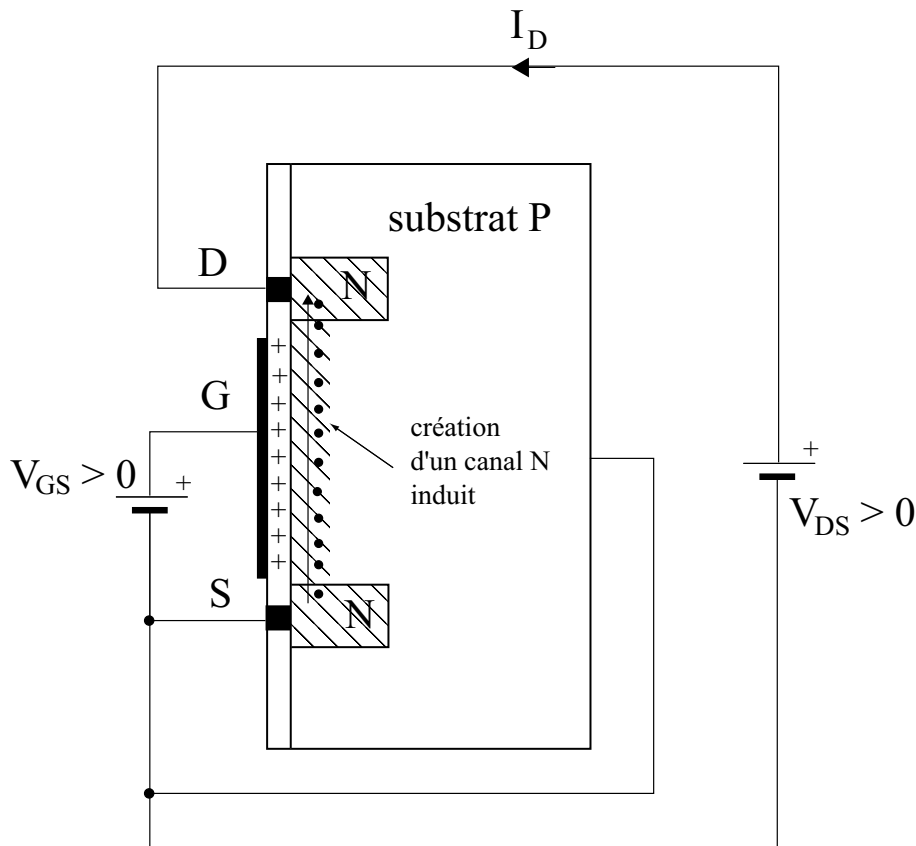
Pour un **MOSFET à canal P** ou **PMOS**, le drain et la source sont de type P et le substrat est de type N.

Symboles :



3.6.2.2 Fonctionnement

Cas d'un NMOS :



La grille et la surface du substrat en regard sont assimilables aux armatures d'un condensateur : c'est un **condensateur MOS**.

Si $V_{GS} > 0$, la grille se charge positivement \rightarrow les électrons minoritaires du substrat P sont attirés à la surface du substrat en face de la grille ; les trous majoritaires du substrat sont repoussés de la surface.

Il se produit une inversion du dopage dans la région située entre le drain et la source : il y a création d'un **canal N induit** par la polarisation de la grille \rightarrow le courant de drain I_D peut circuler à travers le canal si $V_{DS} > 0$.

Lorsque $V_{GS} \leq 0$, le canal ne se forme plus, et si $V_{DS} > 0$, la jonction drain-substrat est polarisée en inverse et $I_D = 0$: le transistor est bloqué.

3.6.2.3 Intérêt des MOSFET

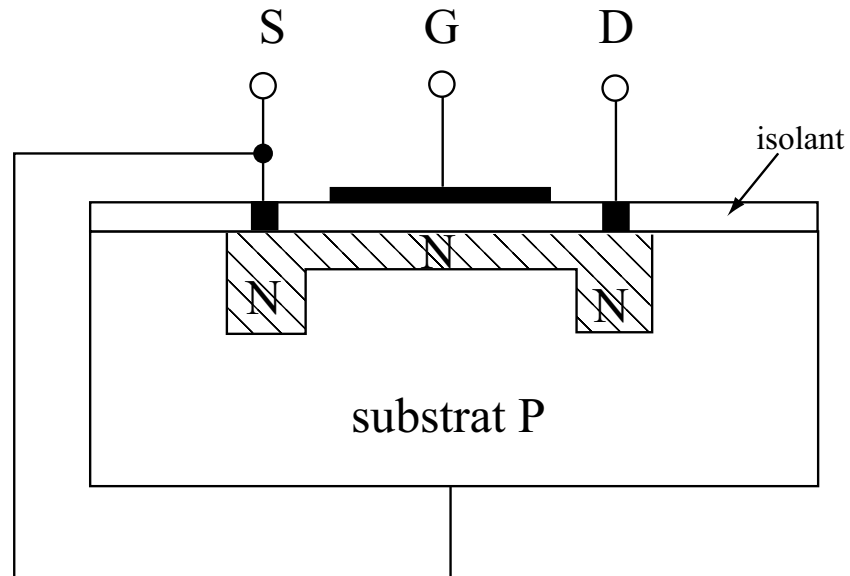
Le courant de grille I_G est extrêmement faible : c'est le courant de fuite de la couche isolante \rightarrow la puissance de commande du MOSFET en commutation est très réduite.

La diffusion des MOSFET sur une plaque de silicium est très facile à réaliser : le drain et la source sont diffusés en une seule opération.

3.6.2.4 Le MOSFET à appauvrissement

Les MOSFET dans lesquels le canal est induit sont appelés **MOSFET à enrichissement**. Il existe un autre type de MOSFET : le **MOSFET à appauvrissement**.

Cas d'un NMOS à appauvrissement :

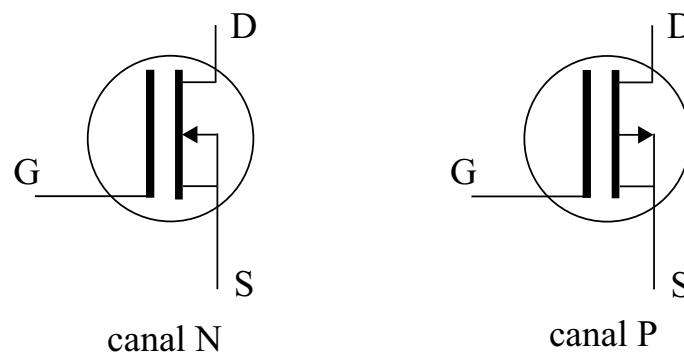


Le canal N existe physiquement : c'est un canal réel (\neq canal induit).

En appliquant une tension $V_{GS} < 0$, le canal N réel est **appauvri** en électrons \rightarrow le courant I_D ne peut plus circuler \rightarrow le transistor est bloqué.

Si $V_{GS} \geq 0$, les électrons circulent dans le canal N réel \rightarrow si $V_{DS} > 0$, $I_D > 0$.

Symboles :



Il y a donc quatre types de transistors MOS :

	canal N	canal P
enrichissement	NMOS à enrichissement	PMOS à enrichissement
appauvrissement	NMOS à appauvrissement	PMOS à appauvrissement

3.6.2.5 Applications des MOSFET

Ils sont utilisés dans les circuits intégrés et les convertisseurs de puissance.

3.7 Les circuits intégrés

3.7.1 Notion d'intégration

3.7.1.1 Principe

Un circuit intégré regroupe, sur un même substrat (puce, chip), l'ensemble des composants électroniques nécessaires pour réaliser une fonction donnée (logique ou analogique). Il est constitué de :

- composants actifs : transistors bipolaires ou unipolaires ;
- composants passifs : diodes, résistances, condensateurs, ... ;
- connexions entre composants.

Ces éléments sont diffusés sur le substrat.

3.7.1.2 Avantages de l'intégration

- fabrication de circuits intégrés en grande quantité → réduction du coût ;
- fiabilité excellente (réduction du nombre de composants discrets) ;
- consommation de plus en plus réduite ;
- possibilité de réaliser des circuits très complexes avec un encombrement très réduit.

3.7.1.3 Inconvénients de l'intégration

- certains composants sont difficilement intégrables : inductances et capacités de fortes valeurs, transistors de puissance ;
- un circuit intégré remplit une fonction bien déterminée → il ne peut pas être modifié par l'utilisateur ;
- la conception d'un nouveau circuit intégré nécessite un investissement économique important. Cependant, il existe des circuits intégrés contenant des composants électroniques non interconnectés : les connexions peuvent être réalisées à la demande de l'utilisateur → personnalisation de circuits intégrés (ASIC : Application Specific Integrated Circuits).

3.7.1.4 Degré d'intégration

Le degré (ou taux) d'intégration est le nombre de transistors intégrés sur un même substrat.

Evolution du degré d'intégration :

- SSI (Small Scale Intégration) : de 1 à 10^2 transistors (1960) ;
- MSI (Medium Scale Integration) : de 10^2 à 10^3 transistors (1966) ;
- LSI (Large Scale Integration) : de 10^3 à 10^5 transistors (1970) ;
- VLSI (Very Large Scale Integration) : de 10^5 à 10^7 transistors (1986) ;
- ULSI (Ultra Large Scale Integration) : $> 10^7$ transistors (actuellement).

3.7.1.5 Taille des puces

- 1,4 mm de coté en 1960 ;
- 8 mm de coté en 1980 ;
- quelques centimètres de coté en 1990.

3.7.1.6 Finesse du trait

Finesse du trait : largeur des connexions entre les éléments d'une puce. C'est un facteur important : plus cette largeur est faible, plus le nombre de composants intégrés peut être important.

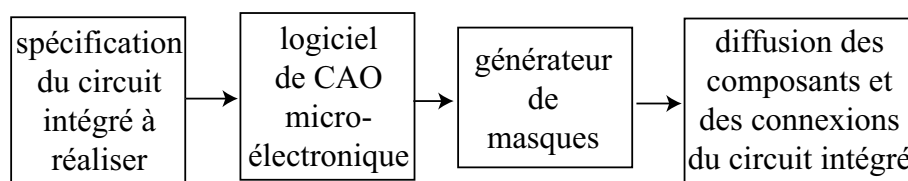
Les premiers circuits intégrés (vers 1960) avaient une finesse de trait $\approx 10 \mu\text{m}$. Actuellement :

- 0,35 μm en 1996 ;
- 0,25 μm en 1999 ;
- 0,18 μm en 2002 ;
- 0,13 μm en 2005.

3.7.2 Fabrication des circuits intégrés

3.7.2.1 Principe

La technologie de fabrication des circuits intégrés est dérivée du procédé PLANAR : diffusions successives à travers des masques. Plus le circuit intégré est complexe, plus le nombre de masques à réaliser est important : jusqu'à 10 masques qui doivent être superposés avec une précision $< 1 \mu\text{m}$ \rightarrow la fabrication des masques nécessite l'utilisation de méthodes de CAO microélectronique.



3.7.2.2 Etapes de fabrication

A partir du schéma électronique du circuit intégré à réaliser, le logiciel de CAO produit un fichier contenant des commandes pour piloter un générateur de masques qui effectue la gravure des différents masques (composants + connexions).

La gravure utilise :

- des rayons lumineux pour la fabrication de motifs d'épaisseur $\geq 1 \mu\text{m}$;
- des rayons ultraviolets pour les épaisseurs comprises entre 0,1 et $1 \mu\text{m}$;
- des rayons X pour les épaisseurs $< 0,1 \mu\text{m}$.

Plus l'épaisseur du trait à graver est faible, plus la longueur d'onde du rayonnement utilisé doit être faible pour garder une bonne précision.

La diffusion des composants d'un circuit intégré ne peut plus se faire au moyen d'un gaz d'impuretés : manque de précision.

On utilise l'**implantation ionique** : projection d'atomes d'impuretés dans le silicium sous l'effet d'un champ électrique dont la valeur permet de contrôler la profondeur de pénétration des impuretés dans le silicium. Cette méthode permet d'obtenir des zones diffusées précises en position, profondeur et dopage.

Sur une plaquette de 20 à 30 cm de diamètre, on peut réaliser une centaine de circuits intégrés. Après diffusion des composants et des connexions, les circuits intégrés sont découpés puis placés dans des boîtiers plastiques ou céramiques.

Les connexions entre la puce et les broches du boîtier sont réalisées avec des fils d'or ou d'aluminium soudés par évaporation.

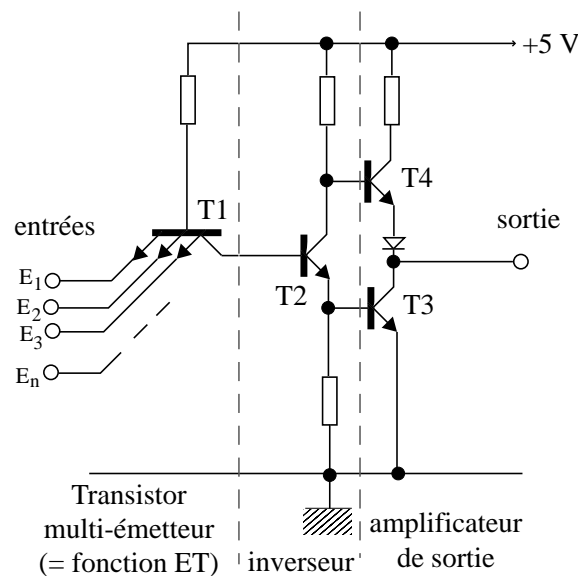
3.8 Technologies microélectroniques

Deux classes de circuits intégrés : les circuits bipolaires (TTL, ECL, I²L) et les circuits unipolaires (NMOS, PMOS, CMOS).

3.8.1 Circuits logiques bipolaires

3.8.1.1 Circuits TTL

Structure d'une porte NAND TTL (TTL : Transistor Transistor Logic) :



Fonctionnement : le transistor T_1 possède autant d'émetteurs que d'entrées à la porte (transistor **multi-émetteur**). Si une entrée est à l'état bas, T_1 conduit $\rightarrow T_2$ est bloqué $\rightarrow T_4$ est conducteur \rightarrow la sortie est à l'état haut (+5 V) : c'est une fonction NAND.

Lorsqu'une entrée est au niveau bas, le courant d'émetteur de T_1 se referme par le circuit d'attaque : la logique TTL est à **extraction de courant**.

Caractéristiques : circuits de la série 74/54 (74xxx : civil, 54xxx : militaire).

- consommation moyenne : 50 mW/porte ;
- bonne rapidité : temps de commutation ≈ 40 ns ;
- tension d'alimentation : 5 V ;
- sortance (nombre d'entrées pouvant être alimentées par une même sortie) élevée : 10.

Améliorations de la technologie TTL :

- TTL Schottky : temps de commutation très faible (≈ 3 ns), consommation moyenne : 20 mW/porte ;
- TTL Low Power : consommation réduite : 3 mW/porte, temps de commutation moyen : 15 ns ;
- TTL Low Power Schottky : compromis vitesse / consommation : 5 ns / 2 mW/porte.

3.8.1.2 Autres technologies bipolaires

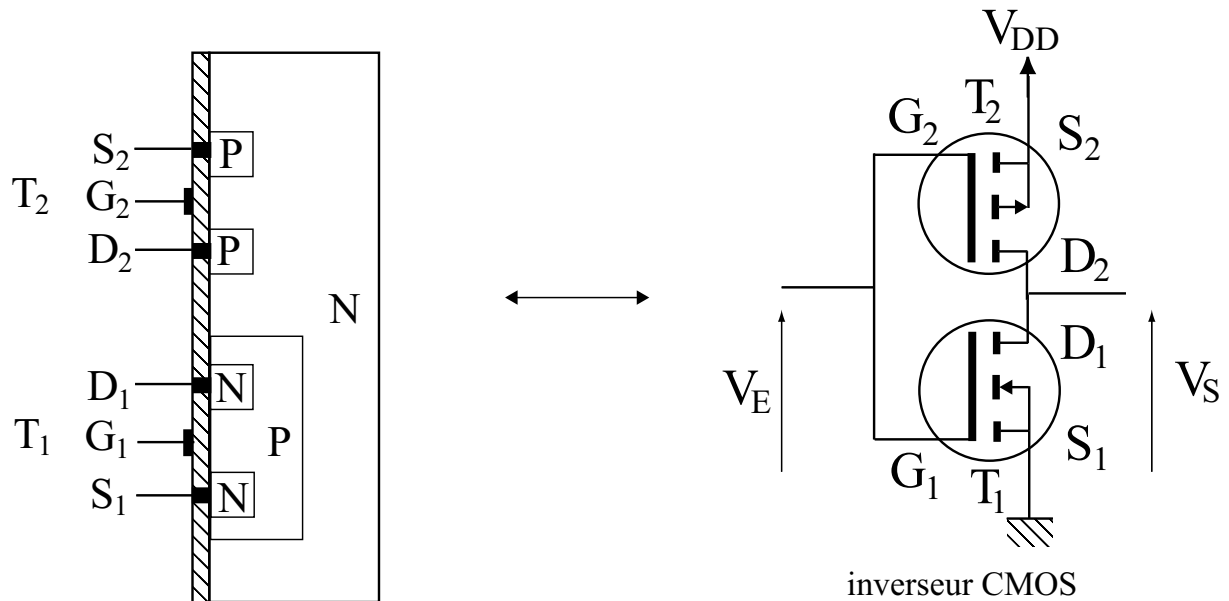
- **ECL** : Emitters Coupled Logic. Très grande rapidité : entre 1 et 2 ns ; consommation plus importante : 25 mW/porte. Utilisée dans les circuits intégrés rapides.
- **I²L** : Integration Injection Logic. Rapidité moyenne : 10 à 50 ns ; faible tension d'alimentation : entre 1 et 12 V. Utilisée dans les télécommunications, en instrumentation et contrôle, dans les automobiles.

3.8.2 Circuits logiques unipolaires

Ce sont des circuits intégrés à base de transistors MOS (NMOS ou PMOS). Les circuits intégrés NMOS et PMOS ont une consommation élevée et une faible rapidité → utilisation de la technologie **CMOS** : grande rapidité et faible consommation.

3.8.2.1 Structure CMOS

CMOS = Complementary MOS : association de deux transistors MOS complémentaires.



3.8.2.2 Fonctionnement

Si $V_E = 0$:

$$\left. \begin{array}{l} V_{G_1 S_1} = 0 \quad \rightarrow \text{T}_1 \text{ bloqué} \\ V_{G_2 S_2} = -V_{DD} \quad \rightarrow \text{T}_2 \text{ conducteur} \end{array} \right\} \Rightarrow V_S = V_{DD}$$

Si $V_E = V_{DD}$:

$$\left. \begin{array}{l} V_{G_1 S_1} = 0 \quad \rightarrow \text{T}_2 \text{ bloqué} \\ V_{G_2 S_2} = V_{DD} \quad \rightarrow \text{T}_1 \text{ conducteur} \end{array} \right\} \Rightarrow V_S = 0$$

Dans la structure CMOS, tous les composants sont actifs (pas de résistances) \rightarrow consommation très faible (\ll TTL).

Un inverseur CMOS = deux transistors MOS \rightarrow taux d'intégration de la technologie CMOS très élevé.

3.9 Composants opto-électroniques

L'opto-électronique étudie des dispositifs électroniques dont le fonctionnement fait intervenir un faisceau lumineux.

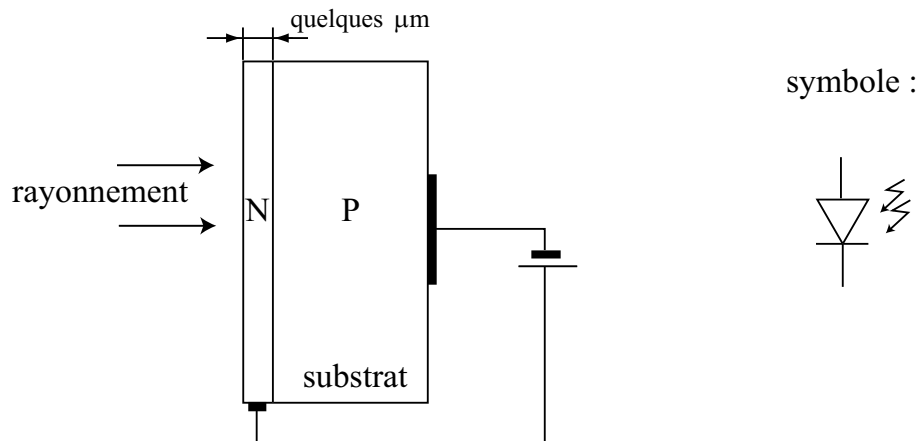
3.9.1 Photodiode

3.9.1.1 Constitution

Réalisation par la technologie PLANAR : sur un substrat de silicium P, on diffuse une mince couche N.

3.9.1.2 Fonctionnement

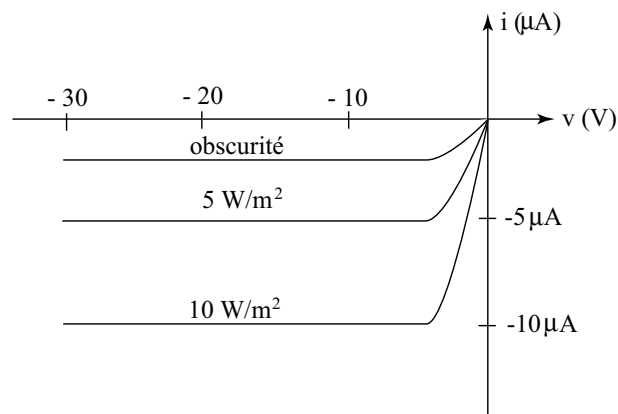
Une diode à jonction polarisée en sens inverse est parcourue par un courant très faible dû aux porteurs minoritaires des régions P et N : courant de saturation $I_S \approx 1 \mu\text{A}$.



Si le cristal est éclairé du côté N et si les photons ont une énergie suffisante, ils peuvent arracher des électrons aux atomes → création d'électrons libres et de trous supplémentaires = porteurs majoritaires (électrons) et minoritaires (trous).

Les majoritaires ne peuvent pas franchir la jonction, puisqu'elle est polarisée en sens inverse. Les minoritaires peuvent traverser la jonction → augmentation du courant inverse, d'autant plus important que l'éclairement du cristal est grand.

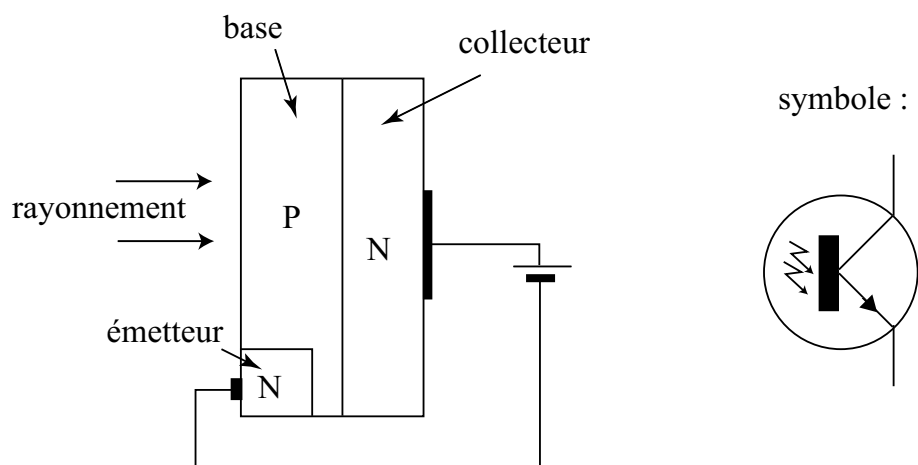
3.9.1.3 Caractéristique



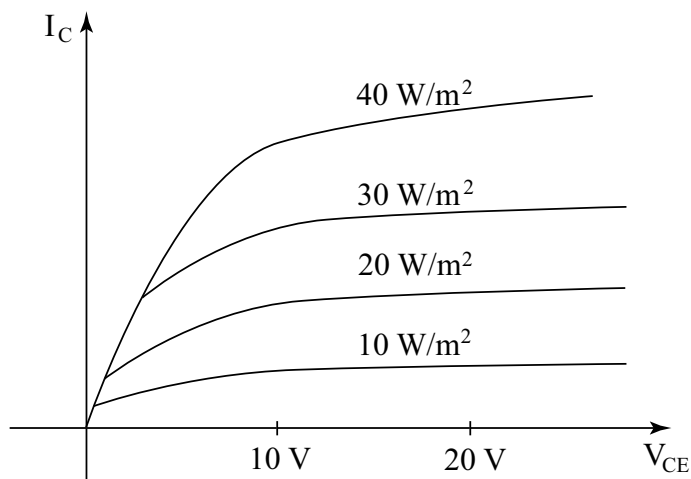
Dans le domaine des radiations visibles, la sensibilité est de $\approx 1 \mu\text{A}/(\text{W/m}^2)$.

Le courant i suit facilement des variations brusques d'éclairement → utilisation aux hautes fréquences ($> 1 \text{ MHz}$).

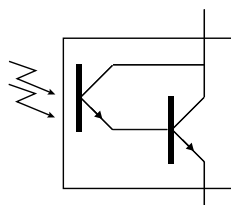
3.9.2 Phototransistor



Le phototransistor ressemble au transistor bipolaire sauf que la base est éclairée par un rayonnement au lieu d'être traversée par un courant de base → création de porteurs minoritaires dans la base et circulation d'un courant entre collecteur et émetteur. Sensibilité ≈ 100 à $200 \mu\text{A}/(\text{W}/\text{m}^2)$.



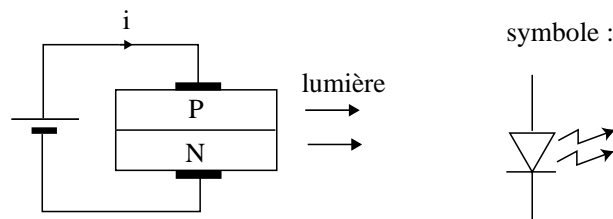
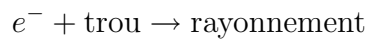
On augmente cette sensibilité en diffusant dans le même cristal un second transistor qui amplifie le courant de collecteur du phototransistor (montage Darlington).



3.9.3 Diodes électroluminescentes (LED)

3.9.3.1 Fonctionnement

Une LED est une diode à jonction PN qui émet un rayonnement lorsqu'elle est polarisée en sens direct. Le rayonnement provient de l'émission d'un photon lors de la recombinaison électron/trou :



L'intensité du rayonnement émis augmente lorsque le courant i augmente. Sa couleur dépend de la nature du semiconducteur. Ex. : arsénio-phosphure de gallium \rightarrow rouge.

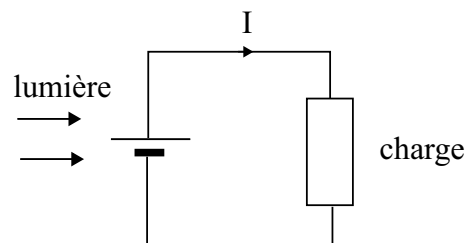
3.9.3.2 Applications

- Source de lumière dans les montages photo-électriques (LED + phototransistor) ;
- voyants ;
- affichage numérique.

3.9.4 Photopiles

3.9.4.1 Constitution

Photopile = groupement de cellules photovoltaïques = diodes à jonction PN placées dans un boîtier dont une face est transparente.

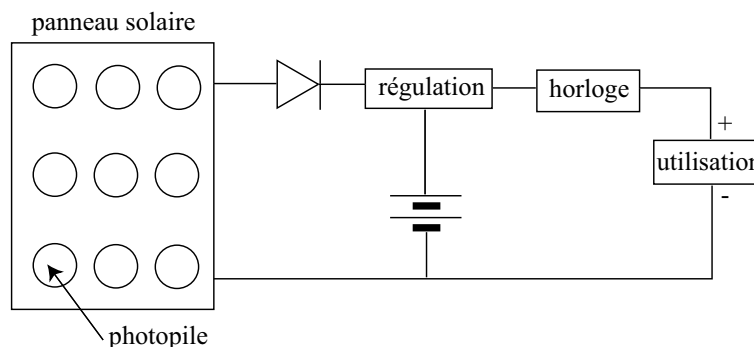


Pour obtenir un courant et une puissance suffisants, on réalise des jonctions de surface importante (plusieurs cm^2). La couche N doit être très mince ($< 1 \mu\text{m}$) pour éviter l'absorption de la lumière. Elle doit être fortement dopée \rightarrow diminution de la résistance interne de la photopile.

3.9.4.2 Applications

- circuits sans générateurs ;
- alimentation en électricité de zones inaccessibles pour les lignes de transport, satellites, stations de télécommunications.

3.9.4.3 Mise en œuvre : station solaire



Module (ou panneau solaire) = plusieurs dizaines de cellules placées sur un circuit imprimé, monté dans un cadre en aluminium, avec une face avant en verre spécial. Sa face arrière reçoit un enrobage de résine époxy. L'ensemble doit être parfaitement étanche.

3.9.4.4 Limitations

- prix élevé ;
- surface importante ($1 \text{ m}^2 \rightarrow 60 \text{ W}$) ;
- faible rendement : $\approx 10 \%$.

3.9.5 Emploi des composants opto-électroniques

3.9.5.1 Photodiode et phototransistor

Capteur d'une information contenue dans un rayonnement :

tout-ou-rien :

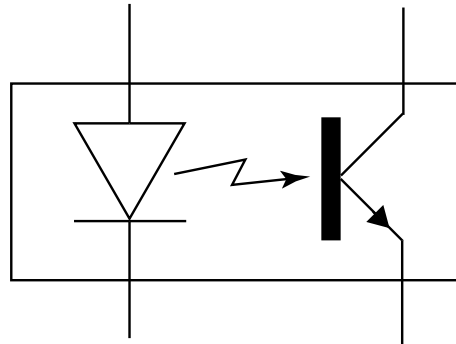
- coupure d'un faisceau lumineux : comptage d'objets, lecture de cartes ou de bandes perforées, ouverture et fermeture automatique de portes, mise en marche d'un escalier roulant, protection du personnel travaillant sur des machines dangereuses.
- variation d'éclairement : éclairage automatique, détection de flammes ou de fumée.

analogique :

- reproduction du son au cinéma (lecture de la piste sonore) ;
- appareils de mesure et d'analyse de l'éclairement.

3.9.5.2 Photocoupleurs

LED + phototransistor dans un même boîtier :



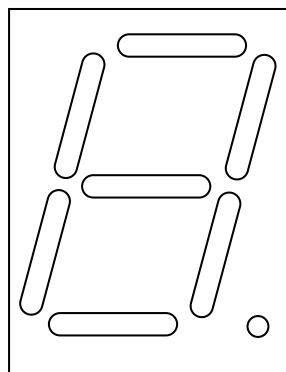
Relais, isolement galvanique.

3.9.5.3 Transmission de l'information

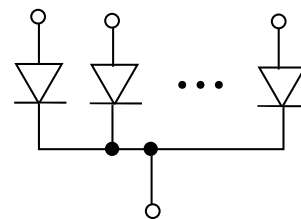
LED + phototransistor reliés par une fibre optique → transmission de la lumière à grande distance. Lumière = porteuse pour les signaux vidéo, numériques, ...

3.9.5.4 Affichage numérique

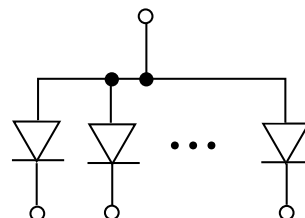
Ensemble de LEDs constituant les segments d'un afficheur (7, 14 ou 16 segments), à anodes ou cathodes communes.



cathode commune



anode commune



Chapitre 4

Les composants de l'électronique de puissance

4.1 Introduction

4.1.1 But de l'électronique de puissance

C'est l'étude des convertisseurs d'énergie électrique dont le rôle est de modifier :

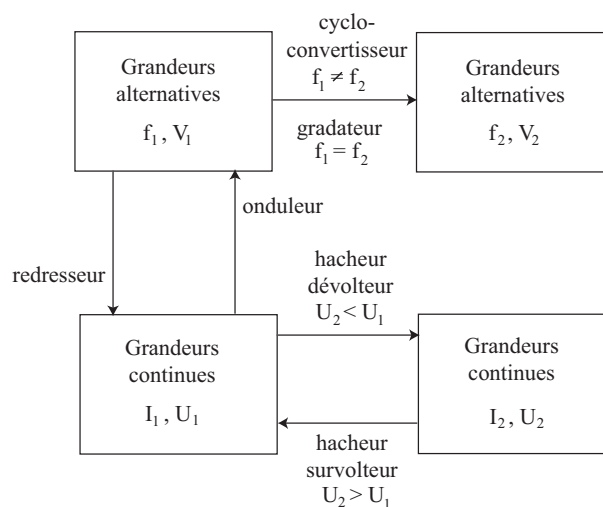
- la forme (continue, alternative),
- les caractéristiques (valeur efficace, fréquence)

des grandeurs électriques.

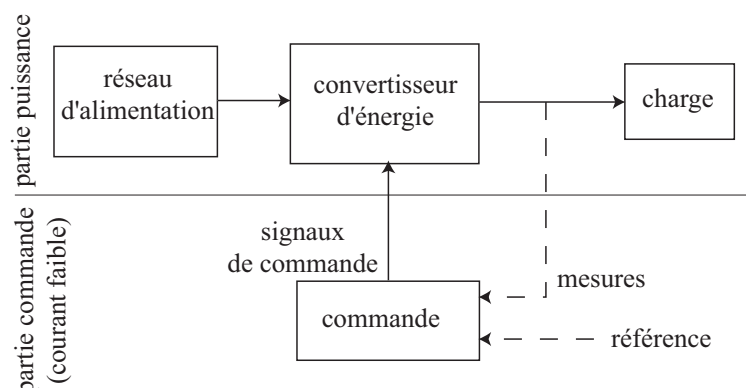
Ces convertisseurs alimentent des récepteurs très divers : moteurs, fours, installations électriques, ...

La puissance fournie à ces récepteurs peut aller de quelques centaines de watts à plusieurs dizaines de mégawatts → électronique de puissance ≠ électronique "petits signaux" ou "courant faible" (quelques watts).

4.1.2 Transformations possibles en électronique de puissance



4.1.3 Structure générale d'un convertisseur en électronique de puissance



4.1.4 Applications de l'électronique de puissance

- entraînements à vitesse commandée : monte-charges, pompes, ventilateurs, laminoirs, ...
- engins de traction : métro, locomotives, ...
- réseaux électriques : excitation et réglage des alternateurs, amélioration du facteur de puissance, ...
- dispositifs de fabrication utilisés en chimie et en métallurgie : fours électriques, bains électrochimiques, réacteurs chimiques, ...
- robotique : commande des actionneurs, ...

4.1.5 Semiconducteurs de puissance

Trois types de semiconducteurs de puissance sont utilisés :

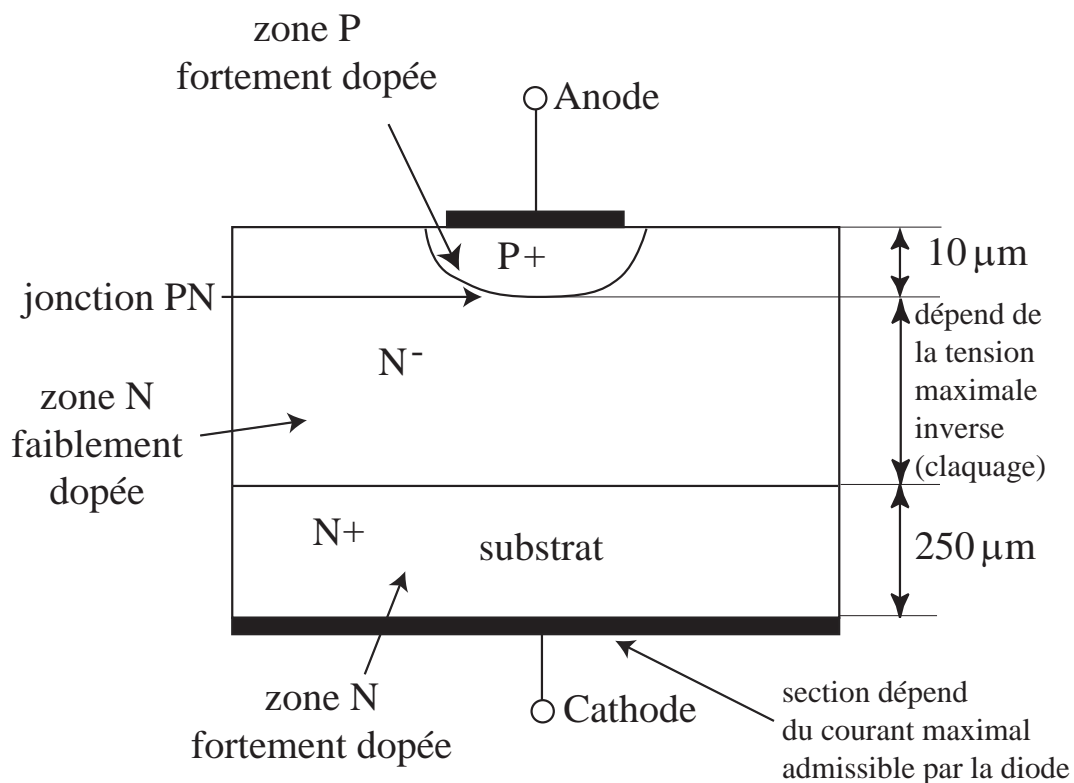
- semiconducteurs non-contrôlés :
 - **diodes de puissance** ;
- semiconducteurs contrôlés sans commande de blocage :
 - **thyristors** ;
 - **triacs** ;
- semiconducteurs contrôlés avec commande de blocage :
 - **transistors bipolaires de puissance** ;
 - **transistors MOSFET de puissance** ;
 - **thyristors GTO (Gate Turn Off)** ;
 - **IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)**.

Il existe actuellement d'autres types de semiconducteurs de puissance basés sur l'intégration de la partie commande et de la partie puissance sur un même cristal : « **circuits intégrés haute tension** » (HVIC : High Voltage Integrated Circuits) ou dans un même boîtier (technologies **hybrides**). Ces deux technologies constituent la technologie « **Smart Power** » : puissance intelligente.

4.2 La diode de puissance

De manière générale, la constitution des semiconducteurs de puissance est différente de leurs équivalents en courant faible. Des modifications sont faites sur les structures de base afin de les adapter aux hautes tensions et aux forts courants.

4.2.1 Structure de base d'une diode de puissance



4.2.2 Principe de fabrication

Diffusion d'une zone N⁻ (faiblement dopée) sur un substrat N⁺ (fortement dopé) → permet de contrôler la tension maximale inverse (tension de claquage) ≠ diode de faible puissance.

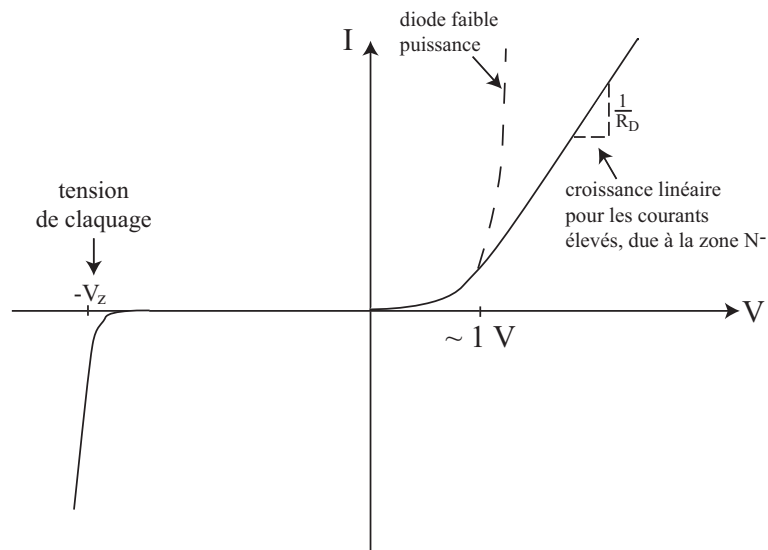
Diffusion d'une zone P⁺ (fortement dopée) → anode de la diode.

La section de la diode dépend du courant maximal admissible par la diode. Elle peut atteindre plusieurs cm^2 pour des diodes supportant des courants directs de plusieurs milliers d'ampères. Une diode peut utiliser toute une plaquette de silicium (wafer) de 10 cm de diamètre.

Le rôle de la zone N⁻ est d'absorber la zone de transition lorsque la diode est polarisée en inverse : zone N faiblement dopée → diminution du nombre d'électrons → diminution du risque d'avalanche → augmentation de la tension de claquage.

Inconvénient de la présence de la zone N⁻ : augmentation de la résistance de la diode en polarisation directe.

4.2.3 Caractéristique statique d'une diode de puissance

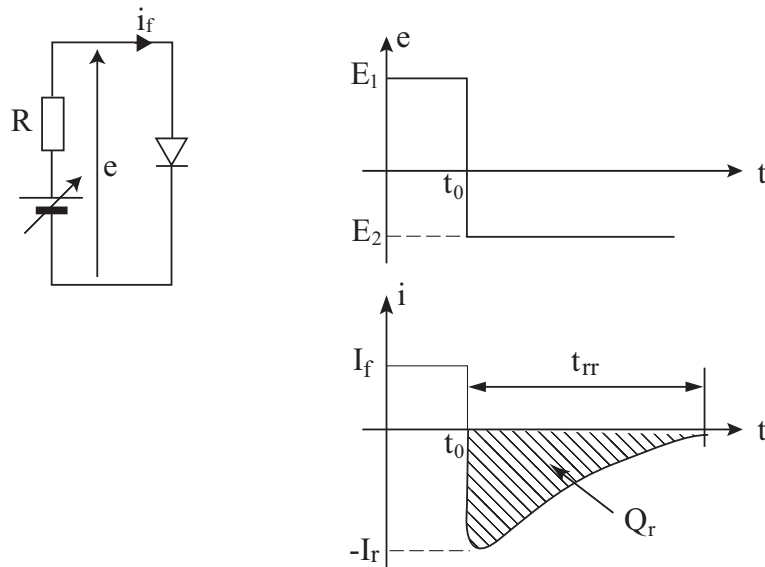


4.2.4 Pertes à l'état passant

Les pertes dans la diode sont dues à la tension de seuil lorsqu'elle est polarisée en sens direct : $P = U_s \cdot I$ avec $U_s \approx 0,7$ à 1 V . Dans les diodes de puissance, ces pertes sont plus importantes à cause de la dissipation dans la zone $N^- \rightarrow$ effet plus important lorsque le courant est plus élevé : $P = U_s \cdot I + R_D \cdot I^2$.

4.2.5 Caractéristiques en commutation

Diode en commutation \rightarrow diode de roue libre (évite les surtensions lors de l'ouverture et de la fermeture des circuits inductifs).



Lorsqu'une diode parcourue par le courant direct $I_f = \frac{E_1}{R}$ est brusquement soumise à une tension inverse, le blocage n'est pas instantané. Un courant bref parcourt la diode

de la cathode vers l'anode. Sa valeur maximale est $-I_r = -\frac{E_2}{R}$ (I_r ne dépend que du circuit extérieur). Sa durée est t_{rr} : temps de recouvrement inverse (temps pendant lequel le courant reste négatif). C'est le temps nécessaire pour décharger la zone de transition, $t_{rr} \approx 1 \mu\text{s}$, t_{rr} augmente avec $I_{f_{max}}$.

La charge évacuée est $Q_r = \int_{t_0}^{t_0+t_{rr}} i dt$. Elle dépend de I_f et de la diode.

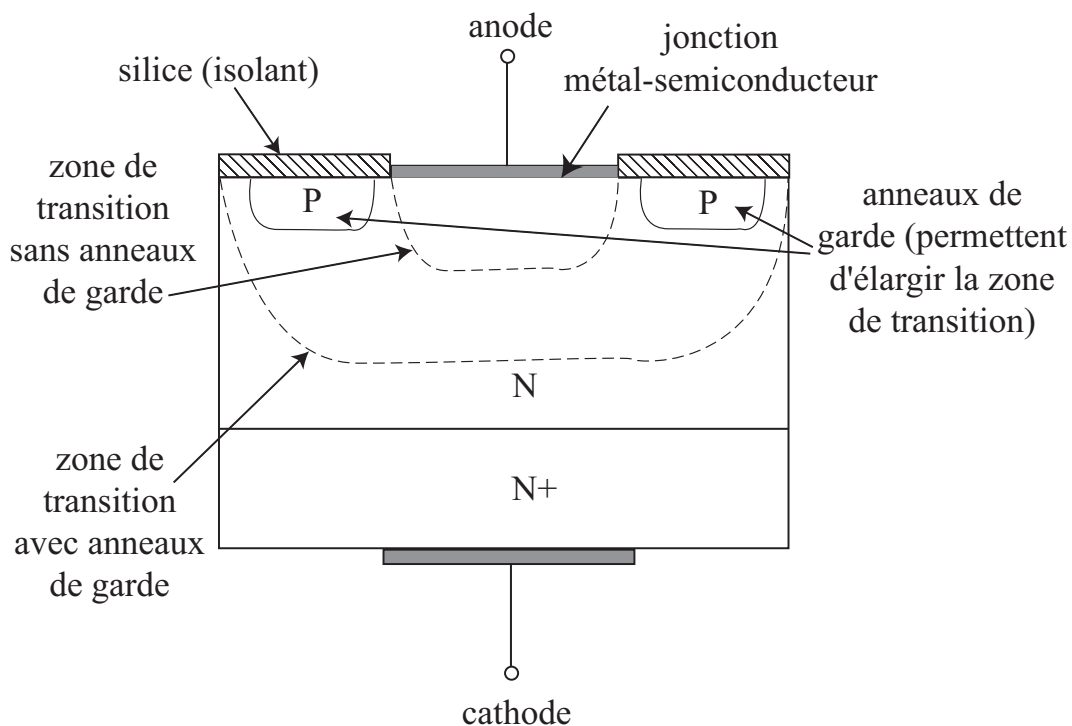
$$\begin{aligned} \text{Ex : } I_f = 150 \text{ A} &\rightarrow Q_r = 35 \mu\text{C} \\ I_f = 800 \text{ A} &\rightarrow Q_r = 60 \mu\text{C} \end{aligned}$$

Conséquences : à chaque blocage, la diode est parcourue par un courant transitoire inverse. Elle est également soumise à une tension inverse qui peut être élevée \rightarrow dissipation d'énergie. La perte de puissance est proportionnelle à la fréquence de commutation et augmente avec la tension inverse lors du blocage \rightarrow surcharge transitoire importante pour les autres composants.

4.2.6 Diode Schottky

La principale caractéristique d'une diode Schottky est d'avoir un temps de recouvrement inverse très faible $\approx 1 \text{ ns}$ et une tension de seuil $V_s \approx 0,4 \text{ V}$.

4.2.6.1 Constitution



4.2.6.2 Caractéristiques

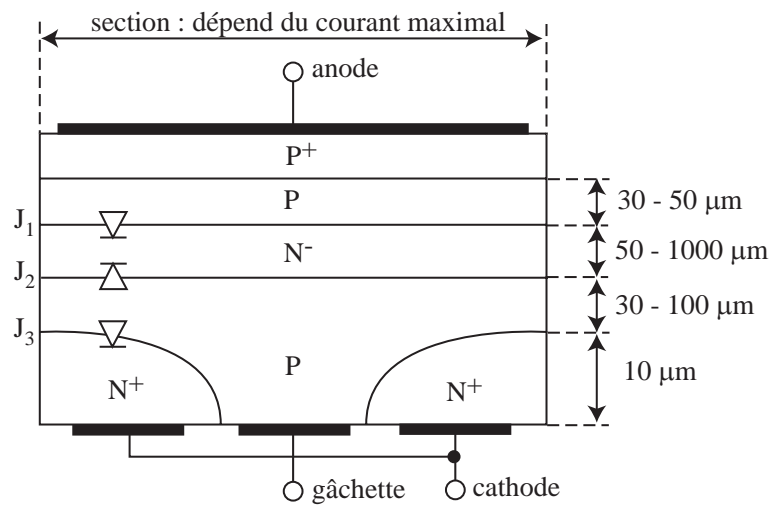
Actuellement, tension inverse maximale ≈ 100 à 200 V , courant direct maximal $\leq 30 \text{ A}$.

4.3 Le thyristor

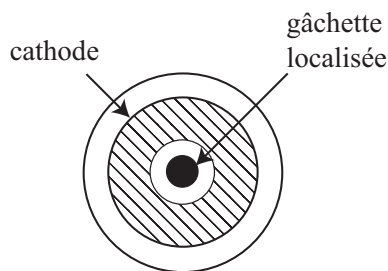
Le thyristor (ou **SCR** : Semiconductor Controlled Rectifier) est l'un des composants de puissance à semiconducteur parmi les plus anciens (1957, General Electric Research Laboratory). C'est le composant qui permet d'atteindre les puissances les plus élevées.

4.3.1 Constitution

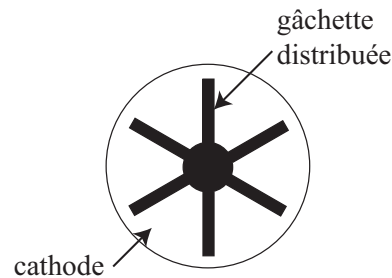
C'est un composant à trois jonctions PN.



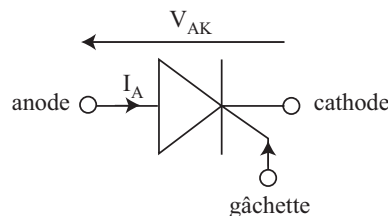
Section pour les faibles courants : gâchette localisée



Section pour les forts courants : gâchette distribuée



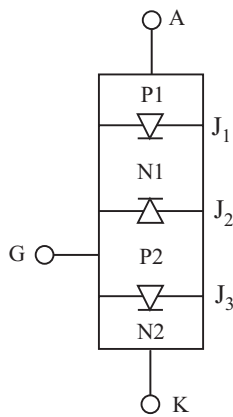
Symbole :



Trois jonctions PN en série entre anode et cathode :

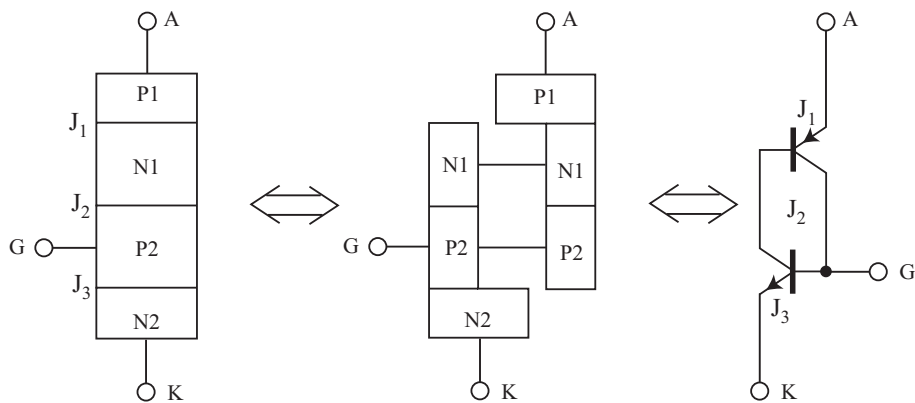
- J₁ et J₃ passantes de A vers K ;
- J₂ passantes de K vers A.

Modèle simplifié :



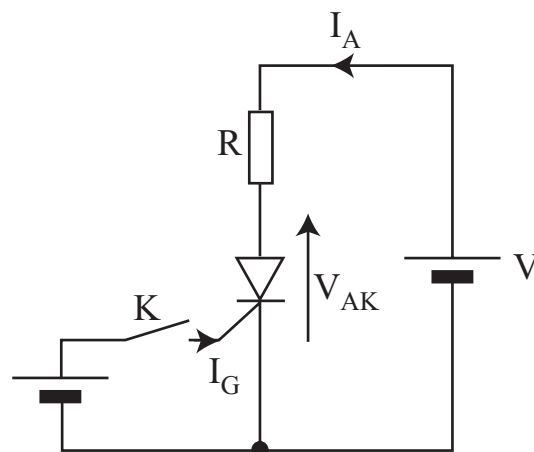
N1 : épaisse et peu dopée ;
 P2 : très mince ;
 N2 : très dopée.

Schéma équivalent d'un thyristor :



4.3.2 Fonctionnement du thyristor

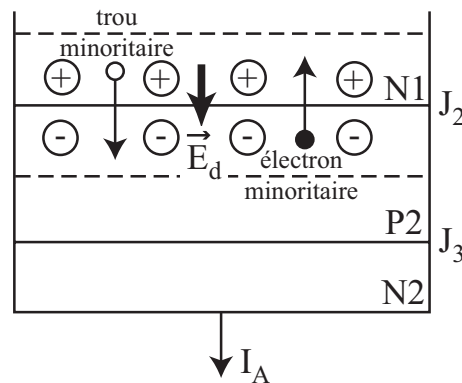
4.3.2.1 Amorçage



On suppose $I_G = 0$ (pas de courant de gâchette) : si $V_{AK} > 0$, les jonctions J_1 et J_3 sont polarisées en sens direct \Rightarrow la tension à leurs extrémités est faible $\Rightarrow V_{AK}$ est pratiquement appliquée à la jonction J_2 , polarisée en inverse $\Rightarrow I_A \approx 0$ (courant inverse de minoritaires) : **le thyristor est bloqué.**

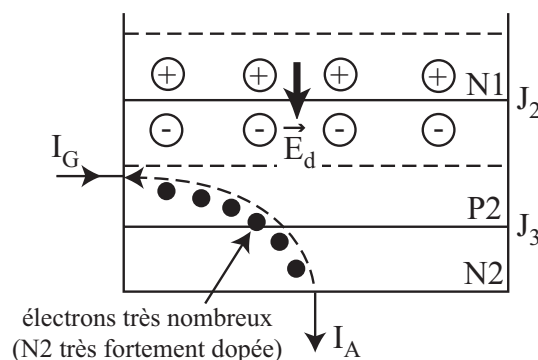
Deux types d'amorçage :

- **Amorçage par avalanche** : si on augmente la tension V , la tension inverse de la jonction J_2 augmente \Rightarrow le champ \vec{E}_d dans J_2 augmente.



Lorsque V devient supérieure à une valeur V_{BO} (BO : Break Over) \approx plusieurs centaines de volts, les minoritaires qui traversent J_2 provoquent une avalanche et J_2 devient conductrice $\Rightarrow V_{AK}$ devient faible ($\ll V$) $\approx 1,5$ V et $I_A = \frac{V}{R} \Rightarrow$ **le thyristor s'amorce** : amorçage par avalanche.

- **Amorçage par courant de gâchette** : si on ferme brièvement l'interrupteur K, une impulsion de courant I_G est envoyée à travers la jonction J_3 .



Comme J_2 est très proche de J_3 (zone P2 très mince), les électrons qui circulent dans J_3 sont soumis au champ \vec{E}_d qui règne dans J_2 . Si I_A devient supérieur à une valeur $I_H \approx$ quelques mA (**courant de maintien ou d'accrochage**) \Rightarrow phénomène d'avalanche et le courant I_A continue de circuler même après la disparition de $I_G \Rightarrow$ **le thyristor s'amorce** : amorçage par courant de gâchette, le plus utilisé en pratique.

4.3.2.2 Bloquage

Si V diminue et devient négative, I_A diminue et lorsque $I_A < I_H$, J_1 et J_3 se bloquent, J_2 n'est plus en régime d'avalanche.

Si $V_{AK} < 0$ et qu'on envoie un courant I_G , le thyristor ne peut pas s'amorcer et reste bloqué car J_1 et J_3 sont polarisées en inverse.

Si $V_{AK} < -V_{RWM}$ (Maximum Reverse Voltage), il y a claquage de J_1 et J_3 (avalanche) mais pas d'amorçage : la tension V_{AK} aux bornes du thyristor reste constante = tension d'avalanche.

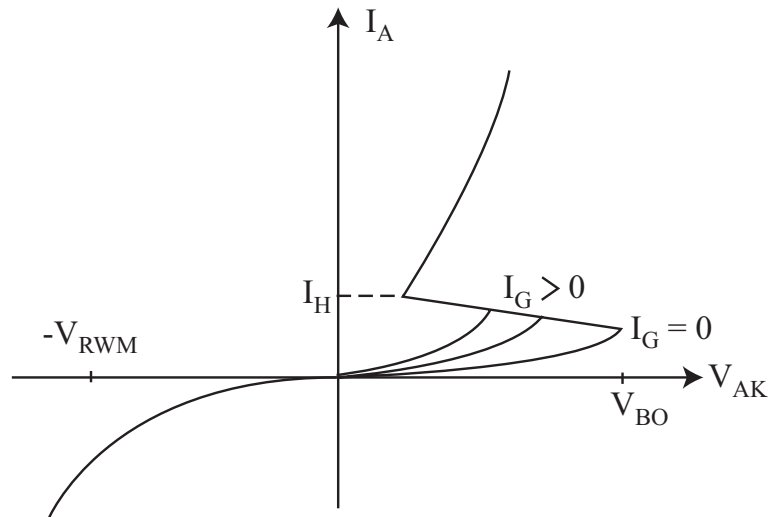
En résumé, le thyristor bloque le courant lorsque :

- $V_{AK} > 0$ et $I_G = 0$ (avec $V_{AK} < V_{BO}$);
- $V_{AK} < 0$ (I_G quelconque).

Il fonctionne comme un court-circuit lorsque :

- $V_{AK} > 0$;
- une impulsion de courant I_G traverse la jonction gâchette-cathode.

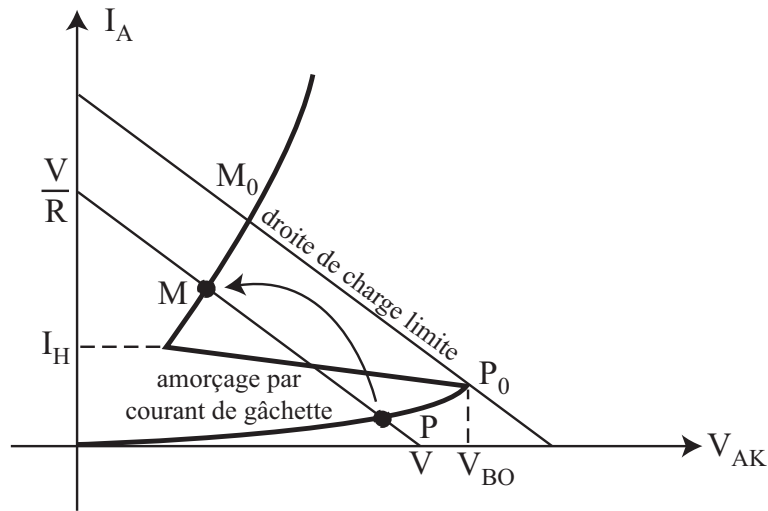
4.3.2.3 Caractéristique courant-tension du thyristor



Remarque : V_{BO} diminue si $I_G > 0$ (courant continu permanent).

4.3.2.4 Fonctionnement en charge

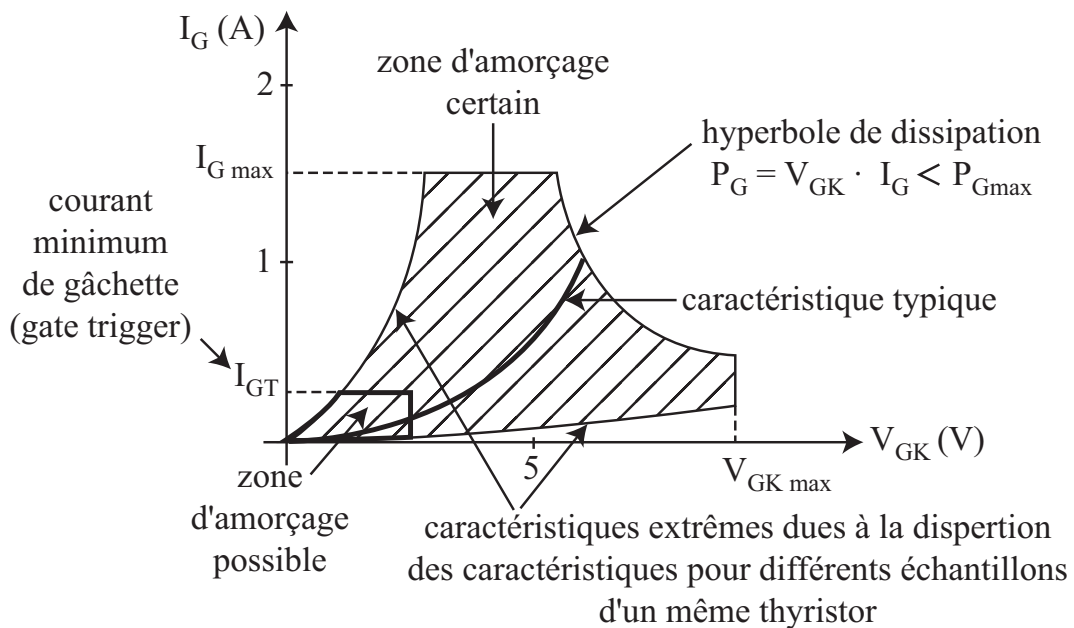
La droite de charge d'équation $I_A = \frac{V - V_{AK}}{R}$ détermine deux points de fonctionnement M et P sur la caractéristique courant-tension, correspondant respectivement à l'état amorcé ou bloqué du thyristor :



4.3.3 Problèmes liés à l'amorçage et au blocage des thyristors

4.3.3.1 Conditions d'amorçage

Caractéristique de gâchette ($I_G - V_{GK}$) :

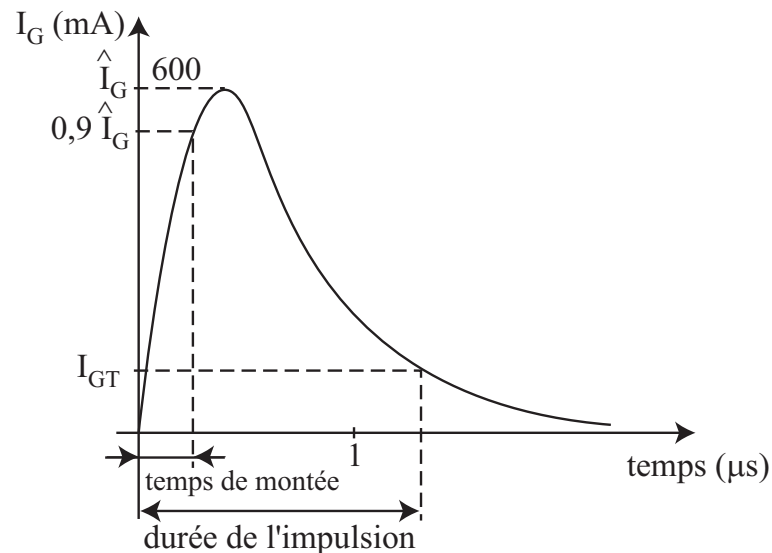


Pour que le thyristor s'amorce correctement par un courant de gâchette I_G , il faut que :

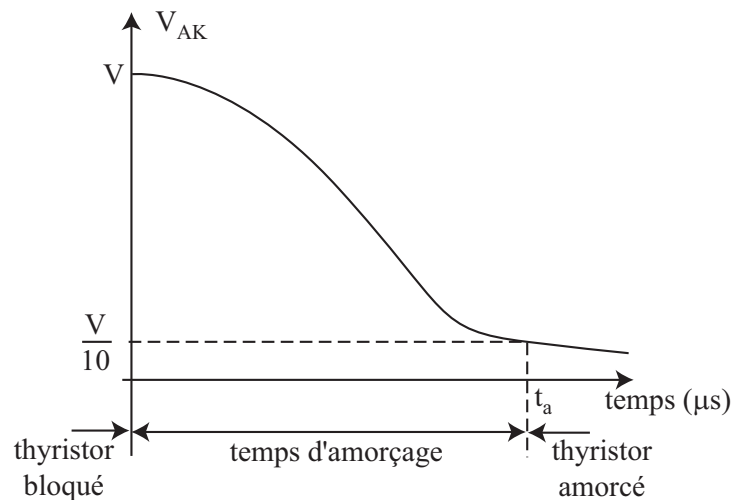
- l'impulsion I_G possède une valeur de crête suffisante pour déclencher l'avalanche dans J_2 : $4 \text{ à } 6 \times I_{GT}$;
- la durée de l'impulsion I_G soit suffisante pour que I_A atteigne la valeur du courant de maintien I_H ;

- le temps de montée de I_G soit faible pour que la surface dans laquelle commence l'avalanche soit grande afin de limiter les échauffements dus à I_A qui augmente rapidement.

Forme caractéristique de l'impulsion d'amorçage I_G :



Temps d'amorçage : lorsqu'on envoie un courant I_G , l'amorçage n'est pas instantané, la tension V_{AK} décroît progressivement à partir de V :



$t_a \approx$ quelques μs , dépend de la nature de la charge.

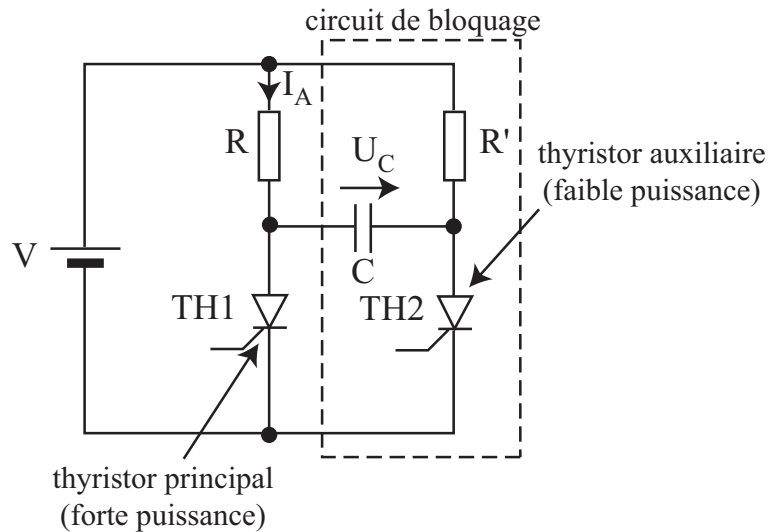
4.3.3.2 Désamorçage d'un thyristor

Deux types de commutations de l'état amorcé à l'état bloqué :

- commutations naturelles : thyristor parcouru par un courant alternatif \rightarrow le thyristor se bloque à chaque passage par zéro de I_A (cas des redresseurs et des gradateurs) \rightarrow nécessite un circuit d'amorçage périodique ;

- commutations forcées : le blocage se fait par inversion de la tension V_{AK} au moyen d'un circuit de blocage (cas des hacheurs et des onduleurs).

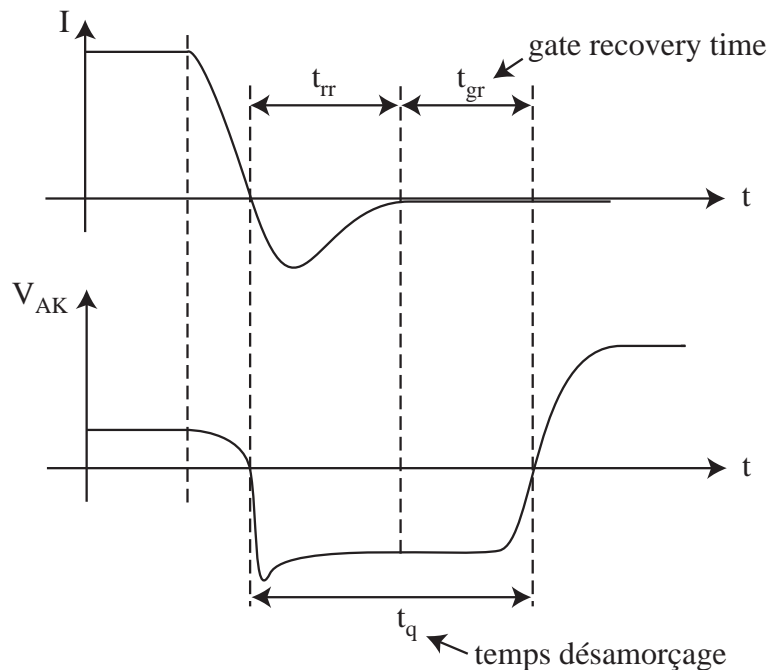
Exemple de circuit de blocage :



Fonctionnement :

- TH1 amorcé, TH2 bloqué \Rightarrow C se charge et $U_C = V > 0$. Si on amorce TH2, la tension $-U_C < 0$ est appliquée à TH1 qui se bloque et C se charge avec $U_C < 0$.
- Au réamorçage de TH1, TH2 se bloque ($U_C < 0$) et C se recharge jusqu'à $U_C = V > 0 \Rightarrow$ le système est prêt pour un nouveau cycle de blocage.

Temps de désamorçage :



Le temps de désamorçage t_q est la somme du temps de recouvrement inverse t_{rr} des jonctions J_1 et J_3 et du temps t_{gr} de disparition des électrons dans la jonction J_2 : $t_q = t_{rr} + t_{gr} \approx 5$ à $400 \mu s$.

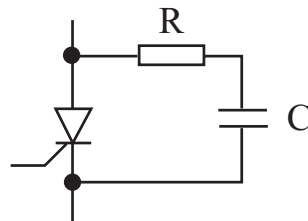
Si on réapplique la tension $V_{AK} > 0$ avant l'instant t_{gr} , le thyristor se réamorçe en l'absence de courant de gâchette (réamorçage intempestif).

4.3.3.3 Amorçage intempestif par $\frac{dV_{AK}}{dt}$

Un thyristor peut être amorcé sans courant de gâchette par une variation rapide de V_{AK} . Pour éviter ce phénomène, on doit avoir :

$$\left| \frac{dV_{AK}}{dt} \right| < \left| \frac{dV_{AK}}{dt} \right|_{max} \approx 100 \text{ à } 400 \text{ V}/\mu s$$

→ utilisation de circuits de **snubber** pour limiter les variations de tension aux bornes du thyristor :



4.3.4 Applications industrielles des thyristors

Le thyristor est l'interrupteur des courants intenses sous des tensions élevées : $\approx 5000 \text{ V}$, 3000 A , aux fréquences jusqu'à quelques centaines de hertz.

Pour accroître les performances des interrupteurs à thyristors, on peut grouper plusieurs thyristors en série et/ou en parallèle.

Le thyristor est irremplaçable pour les applications où les commutations sont naturelles (redresseur, gradateur) : il ne nécessite qu'un circuit d'amorçage.

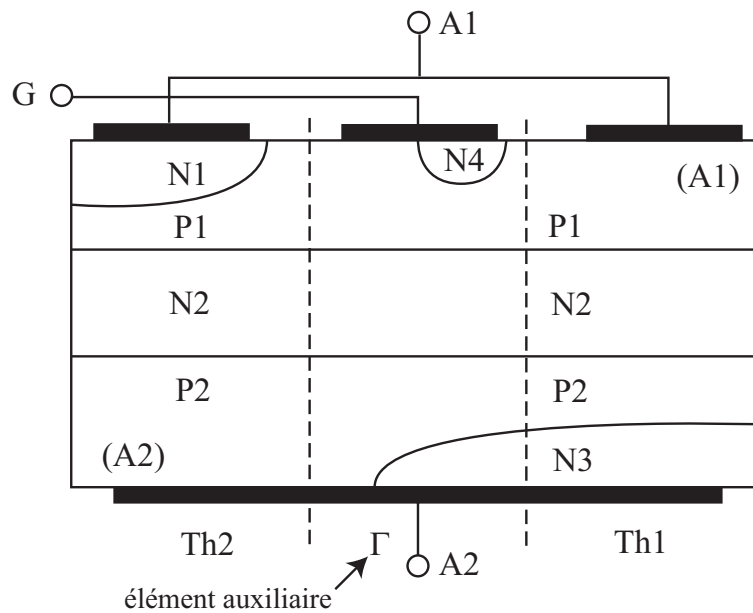
Pour les applications où les commutations sont forcées, il faut utiliser un circuit de blocage \Rightarrow complication du montage. Dans ce cas, le thyristor est concurrencé par le GTO ou les transistors.

4.4 Le triac

Le triac (TRIode for Alternative Current) est un semiconducteur de puissance conçu pour fonctionner en interrupteur commandé sur un réseau alternatif.

4.4.1 Structure

Triac = thyristor bidirectionnel.

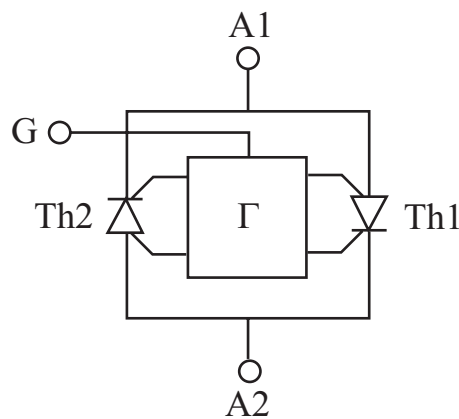


P1 - N2 - P2 - N3 → thyristor Th1 : anode = P1, cathode = N3.

P2 - N2 - P1 - N1 → thyristor Th2 : anode = P2, cathode = N1.

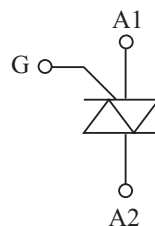
P2 - N2 - P1 - N4 → élément auxiliaire Γ qui couple la gâchette G du triac aux gâchettes de Th1 et Th2.

Schéma équivalent :



→ 2 thyristors en antiparallèle + élément auxiliaire qui aiguille le courant de gâchette vers les deux thyristors.

Symbole :



4.4.2 Fonctionnement

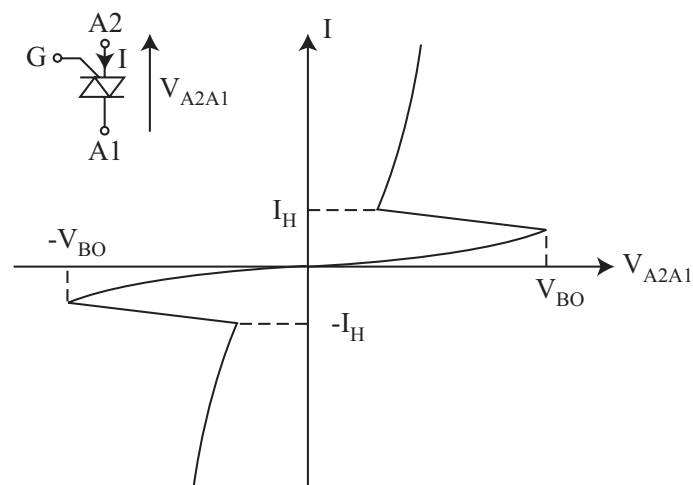
Pas de courant de gâchette \rightarrow aucun courant ne circule entre A1 et A2 : le triac est bloqué. Une impulsion de courant de gâchette I_G met en conduction Th1 ou Th2 par l'intermédiaire de l'élément auxiliaire Γ suivant la polarité de la tension V_{A2A1} .

Si on prend A1 comme référence des potentiels :

- Th1 conduit lorsque $V_{A2A1} < 0$;
- Th2 conduit lorsque $V_{A2A1} > 0$.

4.4.3 Caractéristique du triac

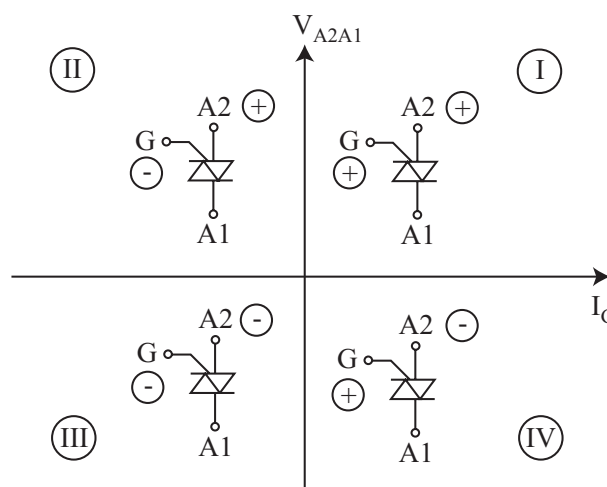
Elle se déduit de celle du thyristor :



4.4.4 Amorçage

Deux types d'amorçage :

- par dépassement de $\pm V_{BO} \rightarrow$ peu utilisé ;
- par courant de gâchette \rightarrow 4 cas possibles : amorçage dans les 4 quadrants.



quadrant de déclenchement	polarité par rapport à A1		condition d'amorçage I_G
	de A2	de G	
I	+	+	faible
II	+	-	moyen
III	-	-	moyen
IV	-	+	fort

4.4.5 Applications du triac

Essentiellement en courant alternatif :

- contacteur statique ;
- circuit de démarrage de moteurs alternatifs ;
- variateurs de puissance (gradateurs)
 - variation de l'intensité lumineuse ;
 - variation de vitesse ;
 - variation de température.

4.4.6 Le diac

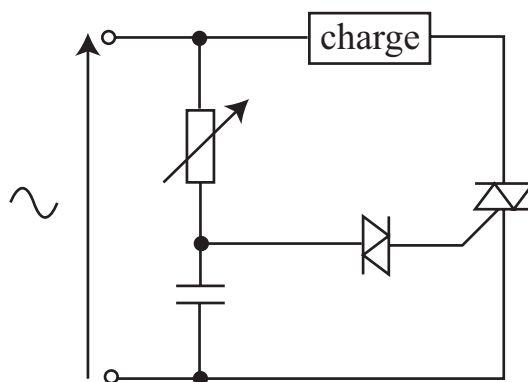
Il existe un triac sans gâchette : le **diac**, amorçable uniquement par dépassement de $\pm V_{BO} \approx \pm 30V$.

Symbole :



Il est utilisé pour le déclenchement des triacs dans les variateurs de puissance.

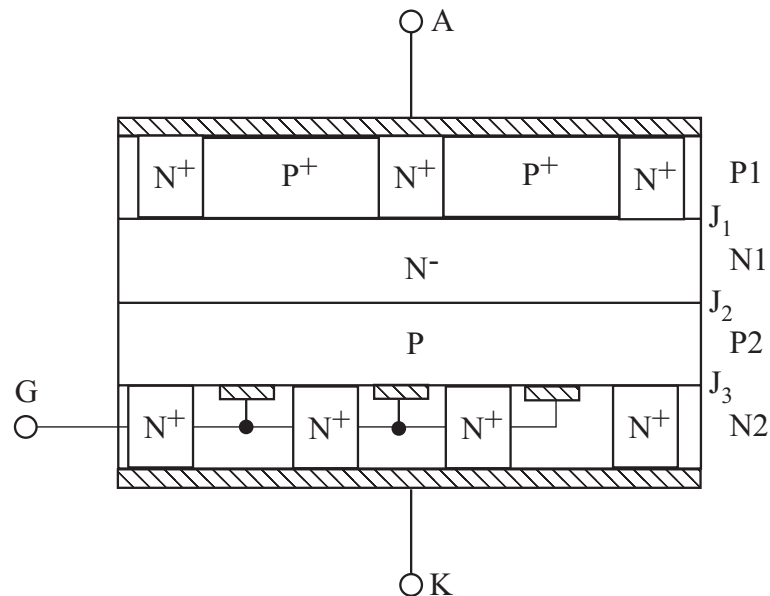
Exemple :



4.5 Le thyristor GTO

GTO = **G**ate **T**urn **O**ff. C'est un composant semblable au thyristor sauf qu'il peut être bloqué par inversion du courant de gâchette.

4.5.1 Constitution

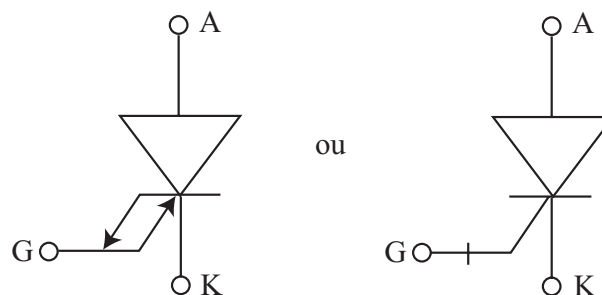


Différences par rapport au thyristor :

- couche P1 court-circuitée par des blocs N⁺ en contact avec l'anode et la couche N1 ;
- cathode morcelée en un grand nombre d'îlots indépendants.

Cette géométrie particulière permet d'obtenir le blocage par inversion du courant de gâchette.

Symbole :



4.5.2 Avantage essentiel du GTO

Il ne nécessite pas de circuit de blocage, mais pour le blocage, il faut un courant inverse $I \approx \frac{I_A}{2} \rightarrow$ problème pour la réalisation du circuit de gâchette.

4.5.3 Utilisations

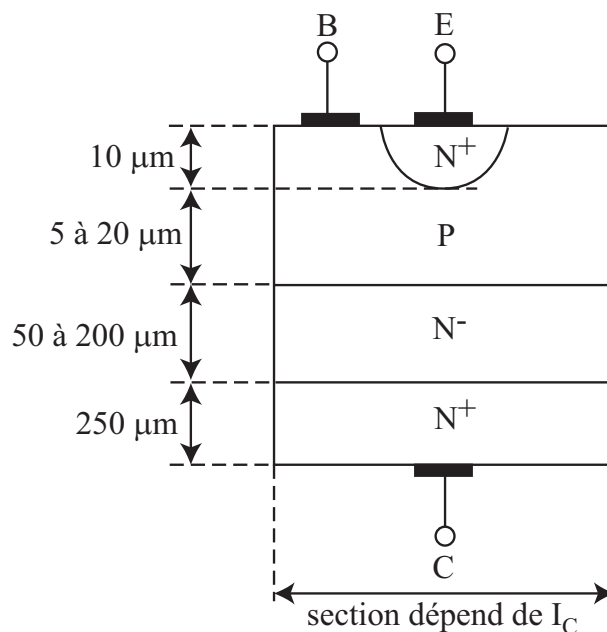
Le GTO est utilisé pour les fortes puissances ($> 100 \text{ kW}$) :

- traction électrique;
- variation de vitesse des moteurs à courant continu (hacheurs);
- alimentations sans coupure (onduleurs);
- systèmes d'allumage automobile;
- modulateurs radar.

4.6 Le transistor bipolaire de puissance

4.6.1 Structure

Structure modifiée par rapport au transistor bipolaire faible puissance pour supporter des tensions V_{CE} élevées à l'état bloqué :



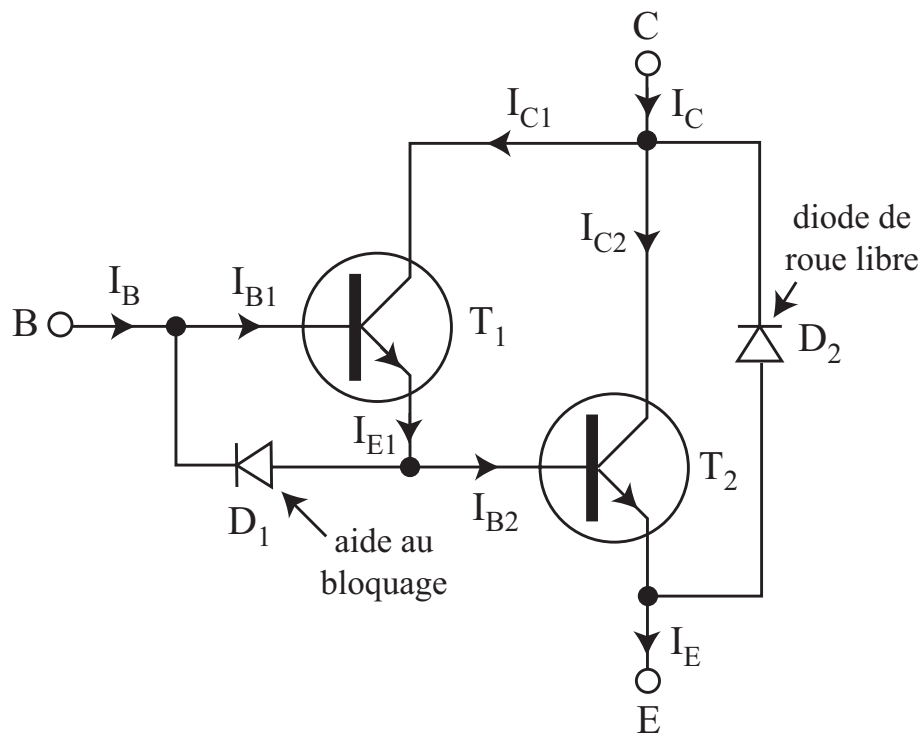
La zone N^- entre base et collecteur permet à la jonction base-collecteur, polarisée en inverse, de supporter une tension inverse importante sans claquage, en absorbant la zone de transition.

L'épaisseur de la base doit être très faible ($< 1 \mu\text{m}$) pour les transistors de faible puissance (\rightarrow fort gain en courant), mais pour les transistors de puissance, elle doit être plus importante pour supporter des tensions élevées \rightarrow diminution du gain en courant : $\beta \approx 5$ à 10 pour les transistors de puissance.

4.6.2 Transistor Darlington monolithique

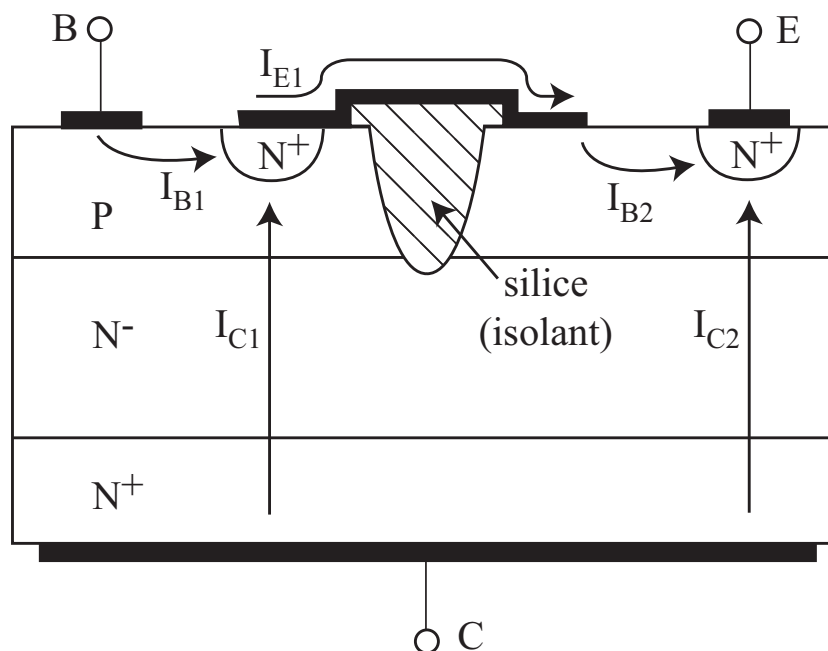
\rightarrow permet d'augmenter le gain en courant des transistors de puissance.

4.6.2.1 Principe

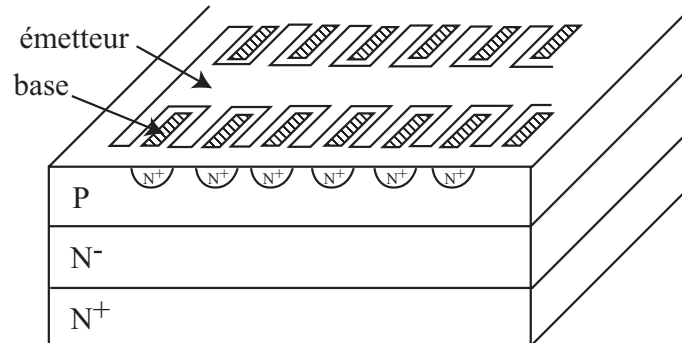


Gain du transistor Darlington : $\beta = \beta_1\beta_2 + \beta_1 + \beta_2 \rightarrow$ gain élevé même si β_1 et β_2 sont faibles.

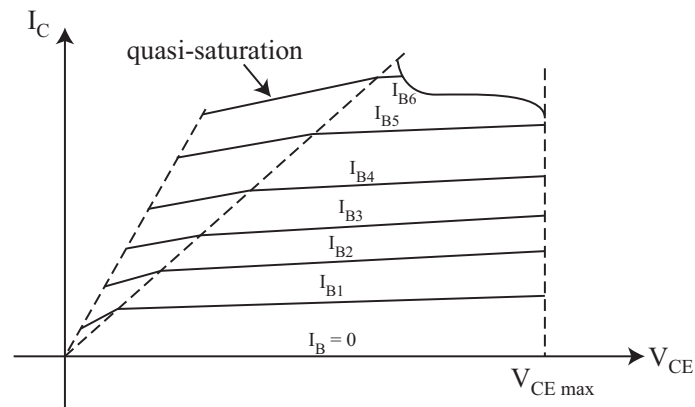
4.6.2.2 Structure



En pratique, dans les transistors de puissance, la base et l'émetteur sont entrelacés (structure interdigitée) → répartition homogène des courants :



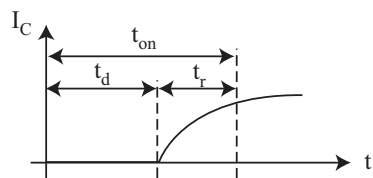
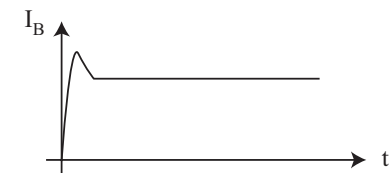
4.6.2.3 Caractéristique $I_C - V_{CE}$



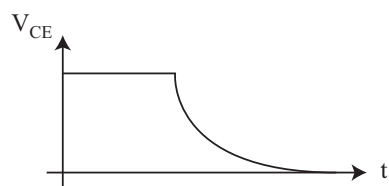
4.6.2.4 Caractéristiques en commutation

Cas d'une charge résistive :

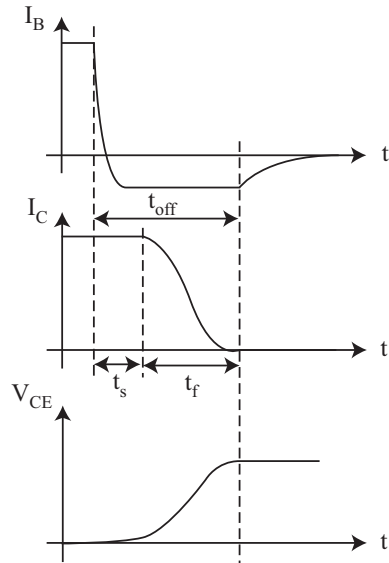
fermeture :



durée de fermeture : $t_{on} = t_d + t_r$
 = retard + temps de croissance
 \approx quelques μs
 (t_r diminue quand I_B augmente)



ouverture :



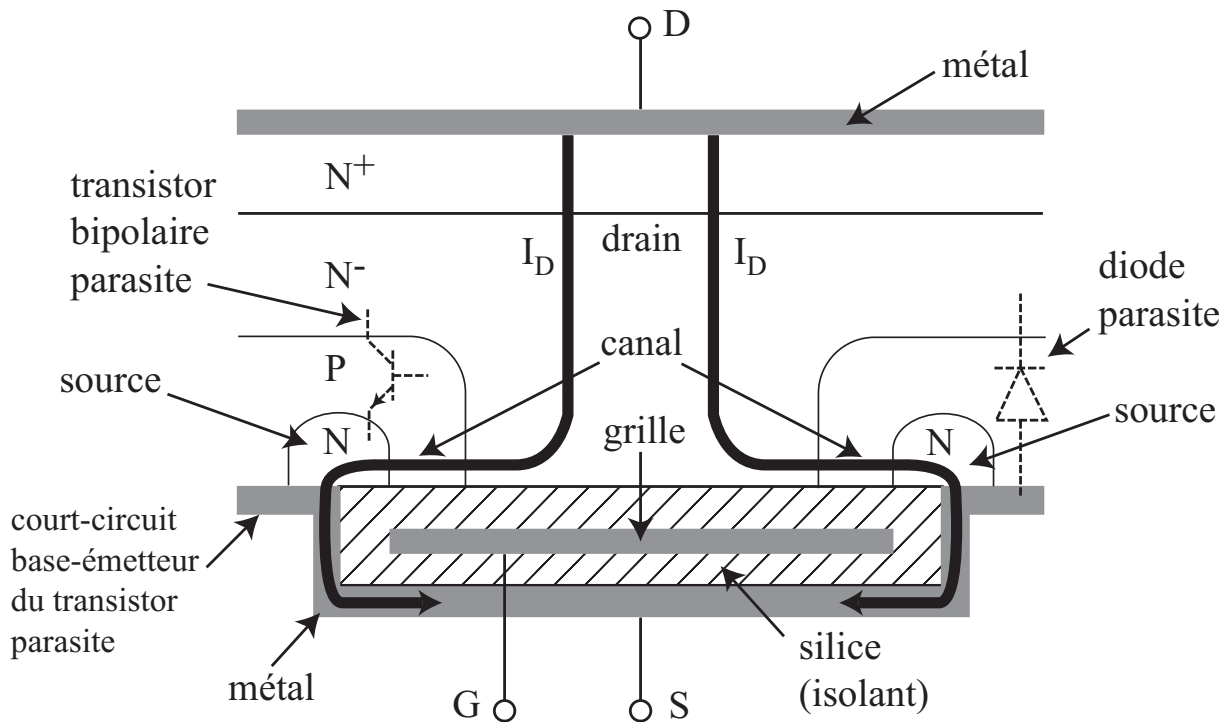
durée d'ouverture : $t_{off} = t_s + t_f$
 = temps de stockage + temps de décroissance
 (t_s augmente quand I_B augmente)

Si la charge est inductive, à l'ouverture, la décroissance de V_{CE} est plus lente → augmentation des pertes en commutation.

4.7 Le MOSFET de puissance

MOSFET = transistor à effet de champ métal – oxyde – semiconducteur.

4.7.1 Constitution

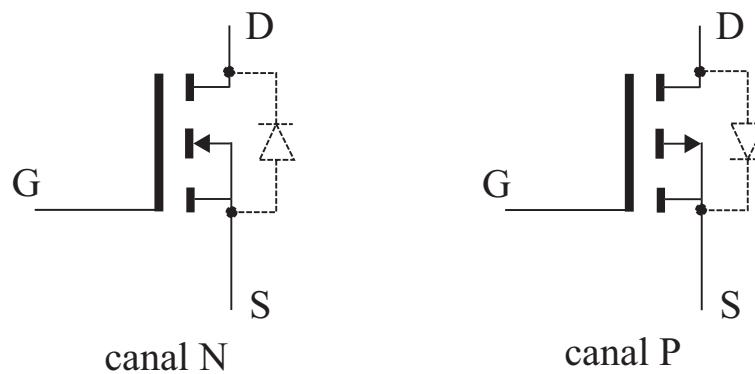


C'est un transistor à structure verticale : **VDMOS** (Vertically Diffused MOS), différent du MOSFET faible puissance (structure latérale) → permet d'obtenir une répartition homogène du courant de drain.

Cette structure crée un transistor bipolaire parasite entre source et drain. Pour éviter que ce transistor ne soit mis accidentellement en conduction, sa base et son émetteur sont court-circuités → création d'une diode entre drain et source, qui peut être utilisée comme diode de roue libre intégrée.

Dans un même cristal, on associe un grand nombre de structures MOS de façon à obtenir le courant I_D désiré.

Symboles :



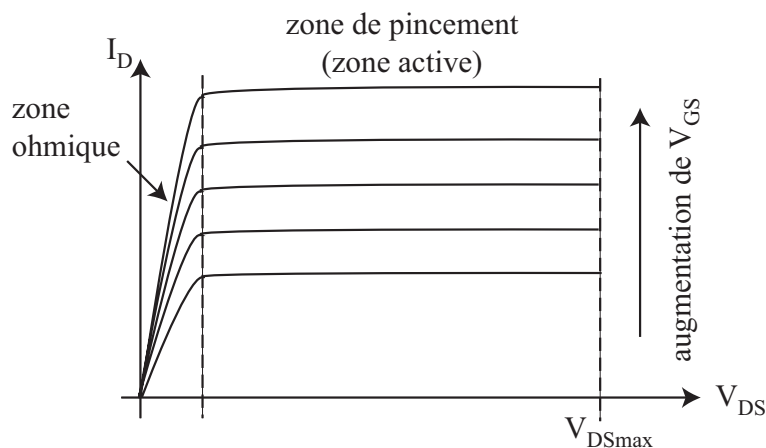
4.7.2 Principe de fonctionnement

Identique à celui du transistor MOS de faible puissance.

Pour $V_{DS} \geq 0$:

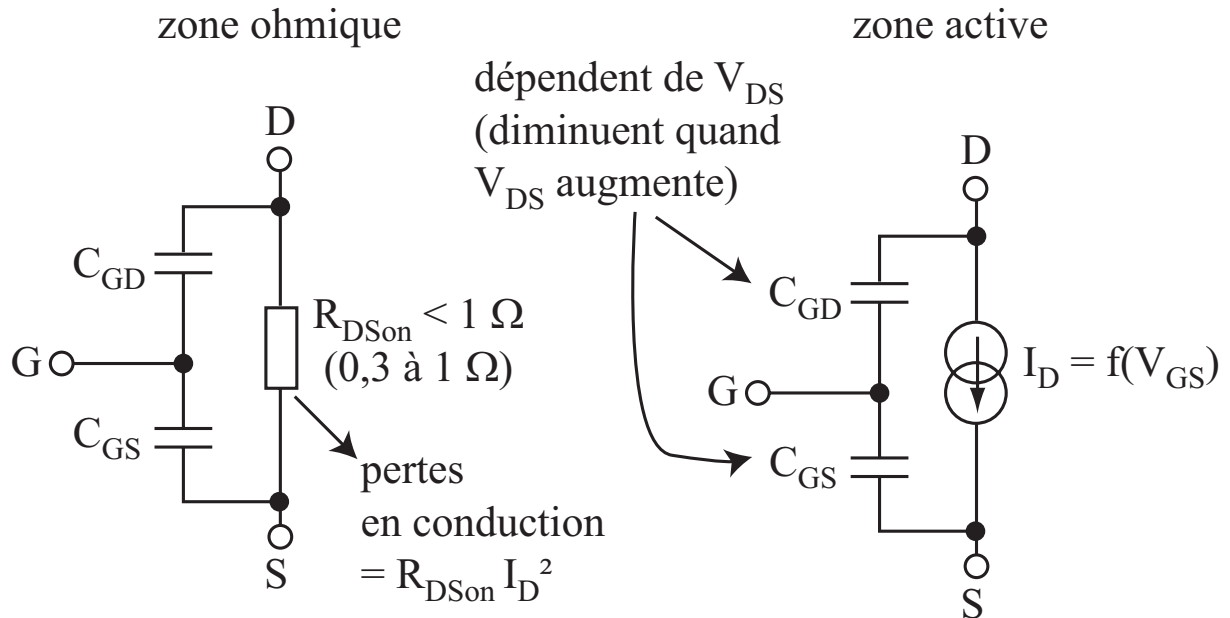
- si $V_{GS} \leq 0$, pas de courant qui circule entre drain et source car la jonction PN entre la zone N de drain et la zone P est polarisée en inverse $\Rightarrow I_D = 0$;
- si $V_{GS} > 0$, création du canal N induit à la surface de la zone P, ce canal relie le drain à la source $\Rightarrow I_D > 0$.

4.7.3 Caractéristique statique



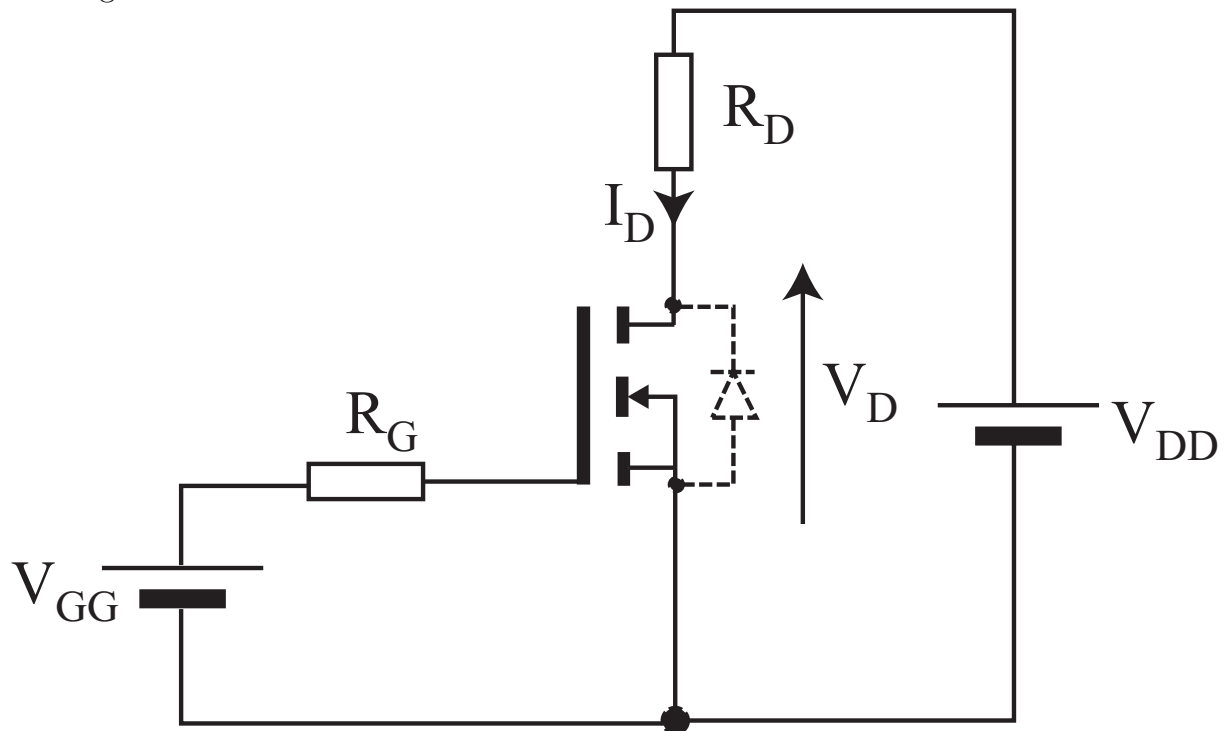
A l'état passant, le MOSFET est en régime ohmique. Il se comporte comme une résistance R_{DS} qui diminue lorsque V_{GS} augmente.

4.7.4 Circuit équivalent

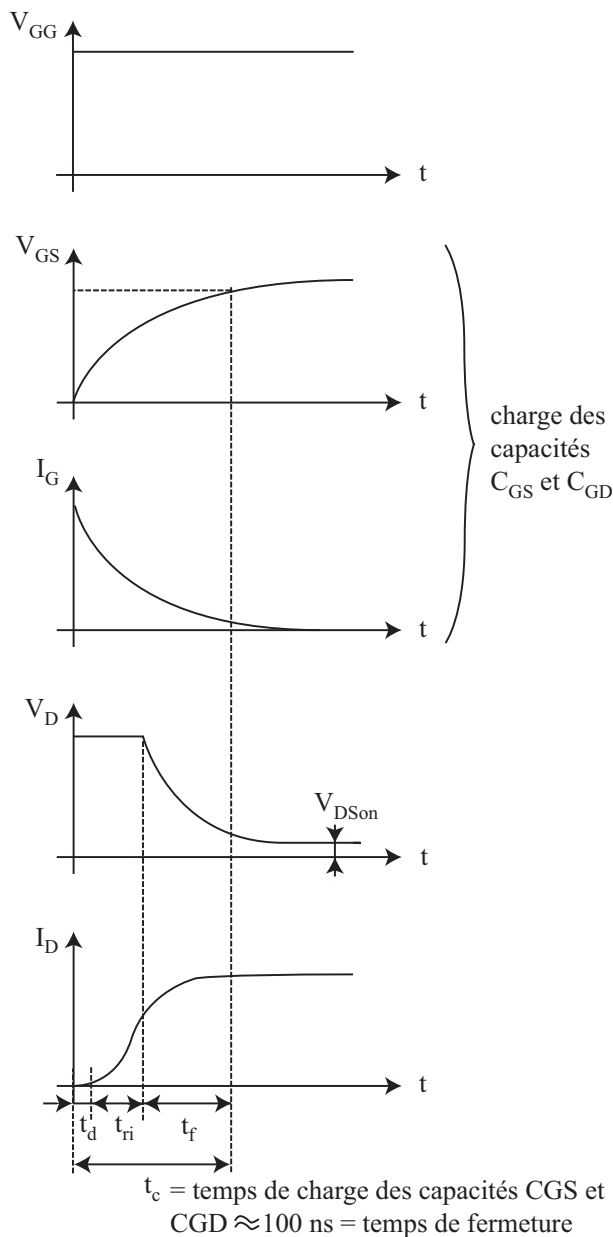


4.7.5 Caractéristique dynamique

Montage :



Fermeture du MOSFET :



De même, l'ouverture du MOSFET consiste à décharger les capacités C_{GS} et C_{GD} .

4.7.6 Utilisation du MOSFET de puissance

Le MOSFET est plus rapide que le transistor bipolaire \rightarrow utilisable en haute fréquence. Son impédance d'entrée est très élevée \rightarrow il peut être commandé par des circuits intégrés de faible puissance. Il est très stable thermiquement. Inconvénient : obtention de I_D et V_{DS} élevés : $I_D = 5 \text{ A} \rightarrow V_{DS} = 1000 \text{ V}$, $I_D = 45 \text{ A} \rightarrow V_{DS} = 50 \text{ V}$.

4.8 L'IGBT

IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolaire à grille isolée), également connu sous le nom de :

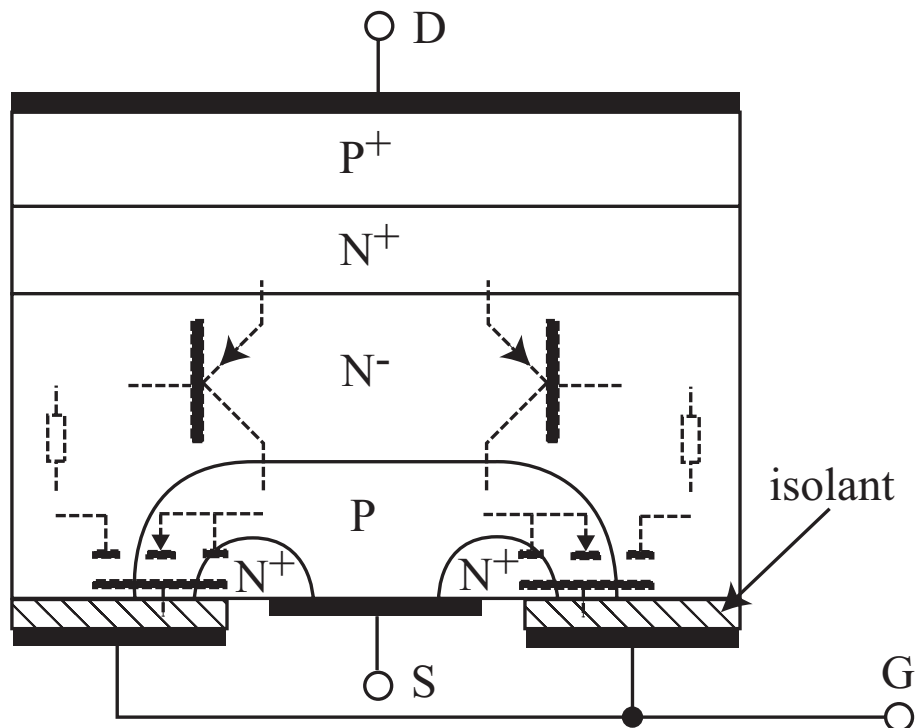
- IGT (General Electric);
- COMFET (Conductivity Modulated FET, RCA);
- GEMFET (Gain Enhanced Modulated FET, Motorola).

4.8.1 Principe

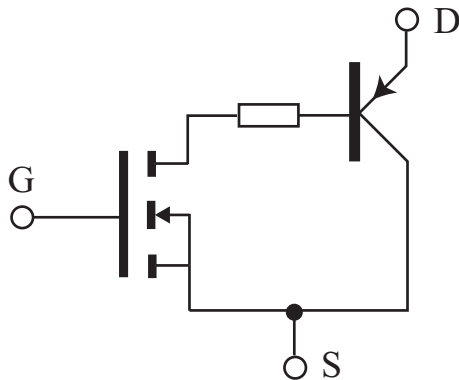
L'IGBT combine les avantages du transistor bipolaire et du MOSFET :

- bipolaire → faibles pertes en conduction mais temps de commutation élevé;
- MOSFET → temps de commutation faible mais pertes en conduction plus élevées, augmentant avec V_{DS} .

4.8.2 Structure

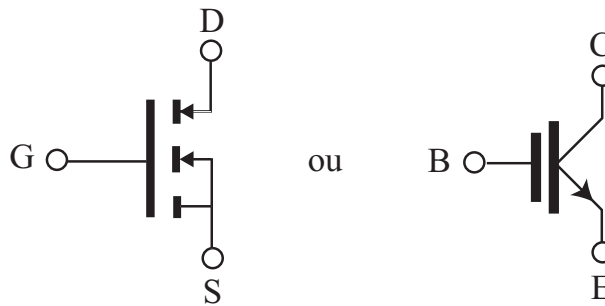


4.8.3 Circuit équivalent

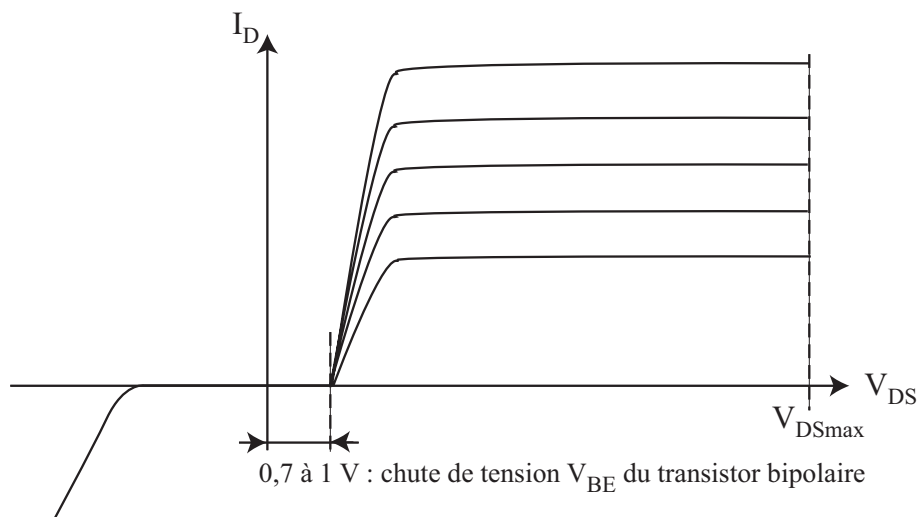


- Darlington hybride MOSFET-bipolaire :
- commutations → rapidité du MOSFET ;
 - résistance en conduction du transistor bipolaire → faibles pertes.

4.8.4 Symboles



4.8.5 Caractéristique statique



4.8.6 Caractéristiques dynamiques

Semblables à celles du MOSFET.

4.8.7 Utilisation de l'IGBT

- V_{DS} jusqu'à 1700 V ;
- I_D jusqu'à 200 à 400 A ;
- possibilité de mise en parallèle de plusieurs IGBT $\rightarrow I_D \approx 1000$ à 1500 A.

4.9 Technologies émergentes

Actuellement, deux orientations dans la technologie des semiconducteurs de puissance :

- amélioration des performances des composants existants : augmentation de leurs capacités de blocage en tension, diminution des pertes à l'état passant, augmentation de la vitesse de commutations ;
- apparition de nouveaux composants et circuits intégrés de l'électronique de puissance :
 - . JFET de puissance ;
 - . thyristor à effet de champ ;
 - . thyristor MOS (MCT : MOS Controlled Thyristor) ;
 - . circuits intégrés haute tension (HVIC) \rightarrow puissance intelligente (smart power) : intégration composants de puissance + logique de commande.

Ces composants constituent l'objet de la recherche actuelle dans le domaine des composants de l'électronique de puissance. Ils sont encore peu commercialisés mais représentent l'avenir de l'électronique de puissance.

4.10 Montage et refroidissement des composants de puissance

4.10.1 Rôle du boîtier du semiconducteur de puissance

- protection de la partie active (puce) contre les agressions mécaniques et chimiques ;
- échange d'énergie : évacuation de la chaleur vers l'extérieur ;
- assemblage mécanique : insertion dans un équipement, montage et raccordement.

4.10.2 Environnement d'un semiconducteur de puissance

- tensions \rightarrow plusieurs kilovolts ;
- courants \rightarrow plusieurs centaines d'ampères ;
- puissances dissipées $\rightarrow \approx$ centaine de kilowatts ;
- commutations rapides \rightarrow phénomènes électromagnétiques : rayonnements perturbateurs.

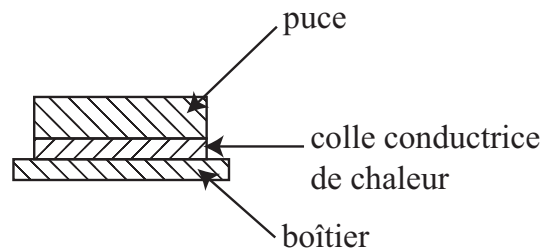
\Rightarrow nécessité d'une **isolation électrique**, de **refroidisseurs**, de **filtres anti-parasites** et/ou de **blindage**.

4.10.3 Isolement électrique

Hautes tensions → isolement entre les parties actives et la masse, conservant une chaîne thermique continue entre la puce et l'atmosphère extérieure.

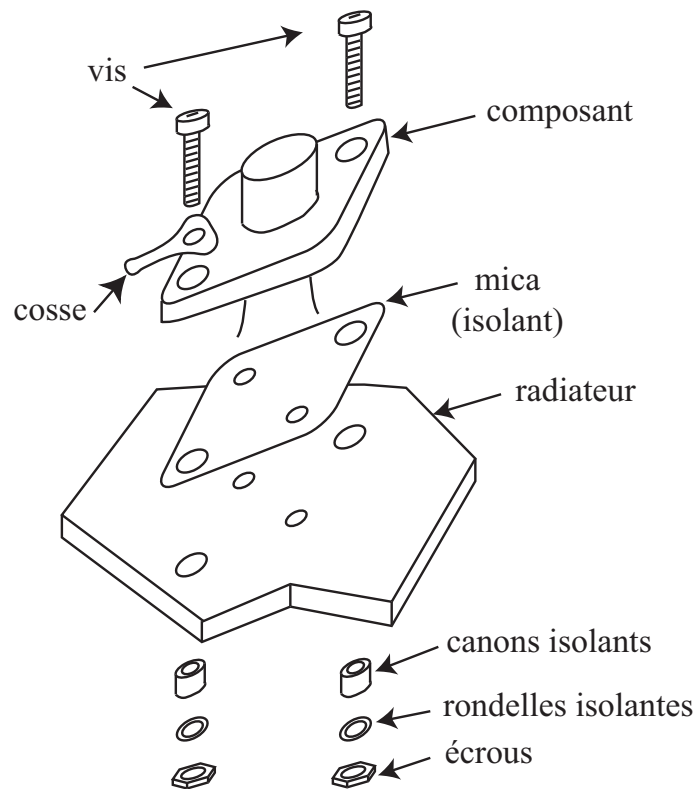
Trois types d'isolement électrique :

- isolement interne entre la puce et le boîtier :



→ solution performante et économique : nombre de pièces de montage réduit.

- isolement entre boîtier et radiateur :



→ problèmes :

- . augmentation de la résistance thermique ;
 - . capacité parasite importante ;
 - . coût plus élevé (nombre de pièces de montage).
- isolement entre radiateur et châssis (masse) de l'équipement → nécessite autant de radiateurs que de potentiels différents.

4.10.4 Câblage

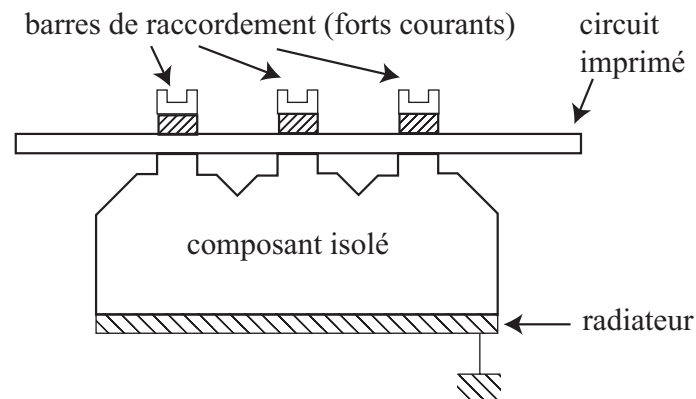
Courants intenses → conducteurs présentant une section suffisante pour limiter les échauffements.

Câblage → introduction d'inductances parasites →

- dissipation de l'énergie stockée dans ces inductances lors de l'ouverture d'interrupteurs ;
- surtensions.

⇒ réduire au maximum les câblages, toutes les connexions doivent être ramenées sur la même face du composant de puissance → câblage compact.

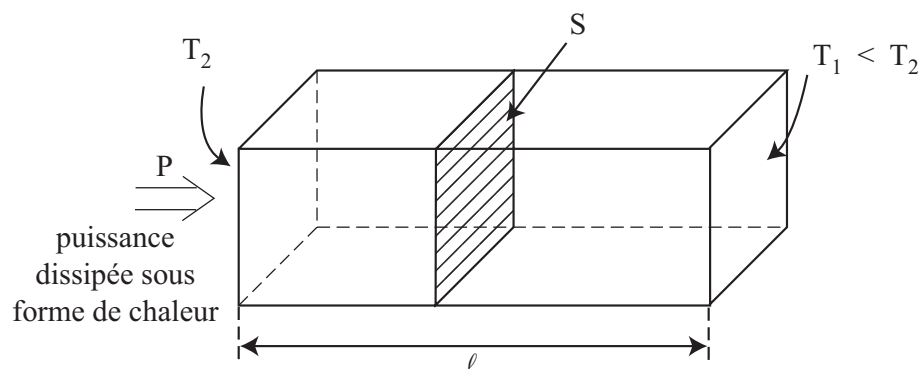
Utilisation de montages simples et rapides par barres et circuits imprimés préfabriqués :



4.10.5 Radiateurs

Evacuation de la puissance dissipée → circulation d'un fluide caloporteur qui joue le rôle d'échangeur thermique : air ou liquide avec, éventuellement, circulation forcée.

4.10.5.1 Notion de résistance thermique



Loi d'Ohm thermique :

$$T_2 - T_1 = R_{Th} \cdot P$$

où R_{Th} est la résistance thermique (en $^{\circ}\text{C}/\text{W}$).

$$R_{Th} = \frac{l}{\lambda S}$$

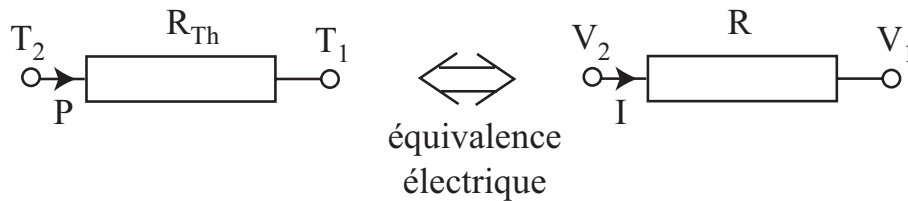
avec :

- l : longueur ;
- S : section ;
- λ : conductivité thermique (W/m/°C).

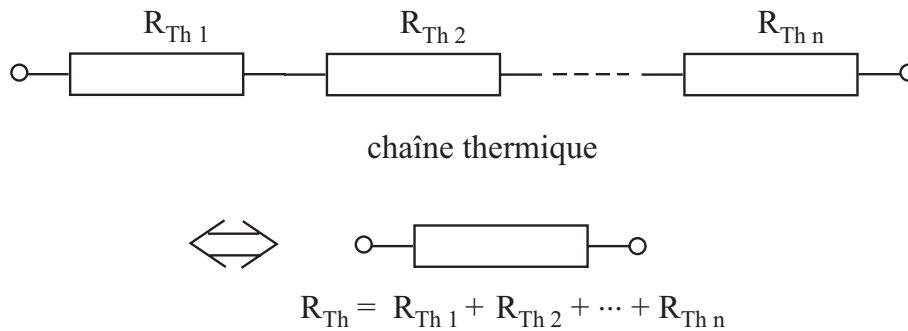
Exemple : aluminium pur à 90 % (utilisé pour les radiateurs), $\lambda = 220$ W/m/°C.

Remarque : la loi d'Ohm thermique est valable seulement en régime permanent.

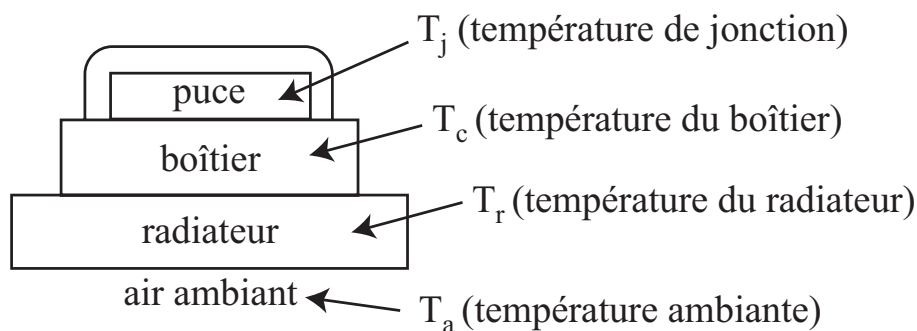
Représentation :



Résistance thermique équivalente :



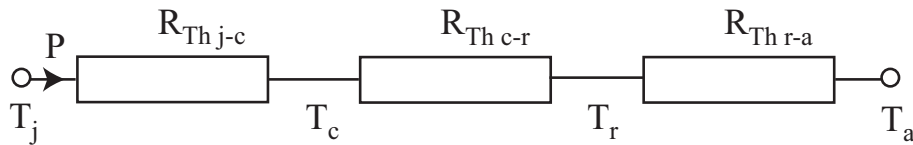
4.10.5.2 Application aux radiateurs



Trois résistances thermiques :

- $R_{Th\ j-c}$: résistance thermique jonction-boîtier \rightarrow ne dépend que du composant ;
- $R_{Th\ c-r}$: résistance thermique boîtier-radiateur \rightarrow dépend de la qualité du contact boîtier-radiateur, amélioré avec de la graisse de silicone ;
- $R_{Th\ r-a}$: résistance thermique radiateur-air ambiant \rightarrow dépend de la surface du radiateur et du coefficient de transfert de chaleur en convection.

Schéma équivalent :



$$T_j = T_a + R_{Th \text{ totale}} \cdot P$$

avec :

$$R_{Th \text{ totale}} = R_{Th \ j-c} + R_{Th \ c-r} + R_{Th \ r-a}$$

La température T_j ne doit pas dépasser $T_{j \ max}$ (spécifiée par le constructeur) → détermination d'un radiateur permettant de vérifier cette condition.

Méthode de calcul :

- $R_{Th \ j-c}$: déterminée par le constructeur, exemple : transistor de puissance en boîtier TO3 : $R_{Th \ j-c} = 0,9 \text{ °C/W}$;
- $R_{Th \ c-r}$: dépend du contact boîtier-radiateur, exemple : transistor en boîtier TO3 :
 $R_{Th \ c-r} = \begin{cases} 1,3 \text{ °C/W à sec} \\ 0,4 \text{ °C/W avec graisse} \end{cases}$
- $R_{Th \ r-a}$: dépend du radiateur → choix du radiateur, à déterminer.

Application numérique :

- Puissance dissipée = 26 W ;
- $T_{j \ max} = 125 \text{ °C}$;
- $T_a = 55 \text{ °C}$;
- radiateur avec graisse.

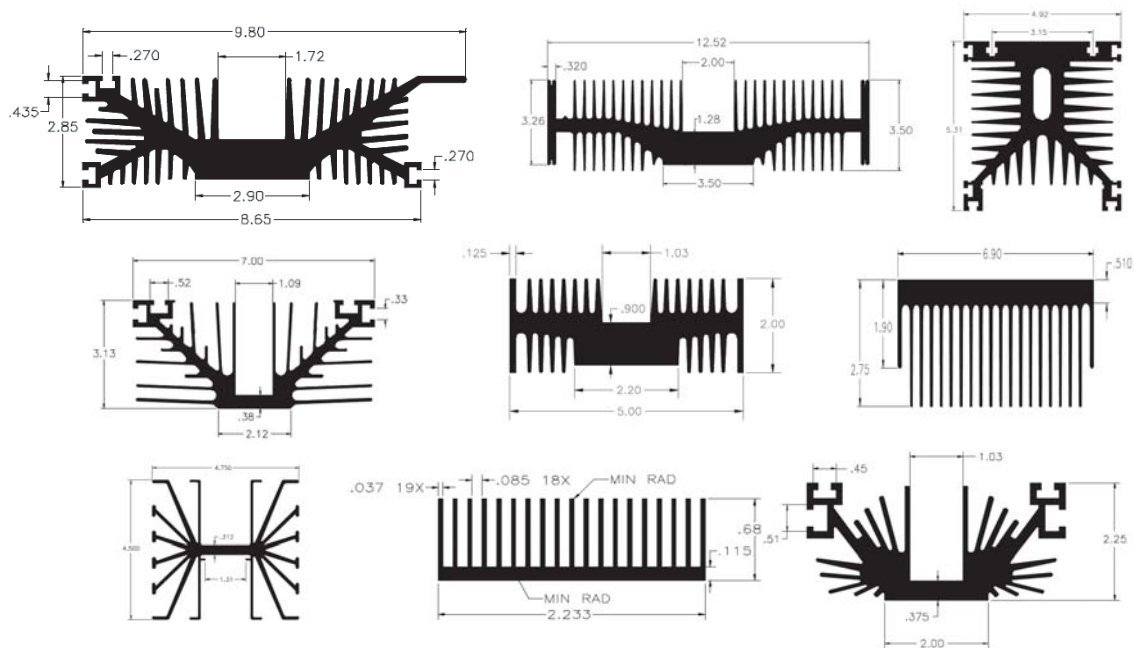
$$\Rightarrow T_j - T_a = (R_{Th \ j-c} + R_{Th \ c-r} + R_{Th \ r-a}) \cdot P$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow R_{Th \ r-a} &= \frac{T_j - T_a}{P} - R_{Th \ j-c} - R_{Th \ c-r} \\ &= \frac{125 - 55}{26} - 0,9 - 0,4 \\ &= 1,39 \text{ °C/W} \end{aligned}$$

4.10.5.3 Réalisation des radiateurs

Profils d'aluminium ou tôles pliées et peintes en noir (rayonnement maximal).

Profils aux formes variées → transfert thermique maximal dans le minimum de volume :



4.10.5.4 Différents types de boîtiers

Normalisation des boîtiers :

- faibles et moyennes puissances :
 - . boîtiers plastiques moulés ;
 - . bornes de sorties à raccordement par vis ou par fils ;
 - . boîtiers métalliques à fils ou à vis.
- fortes et très fortes puissances : boîtiers « press-pack » à refroidissement double face, résistent à des forces d'arrachement de plusieurs kN.



Chapitre 5

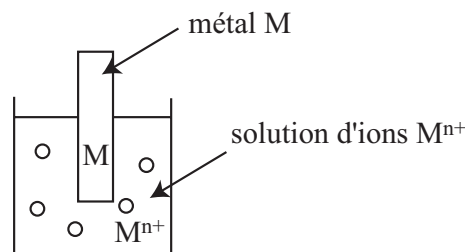
Piles et accumulateurs

5.1 Introduction

Les piles et les accumulateurs sont des générateurs électrochimiques. Ils sont utilisés pour l'alimentation d'appareils destinés à être transportés : appareils de mesure, de télécommunications, ordinateurs portables, véhicules électriques autonomes ... Ils servent de source d'alimentation électrique lorsque le réseau électrique n'est pas disponible.

5.2 Principe d'un générateur électrochimique

Basé sur la **tension d'électrode** :



→ équilibre métal/ion :



→ différence de potentiel E_M entre le métal et la solution : la **tension absolue d'électrode**, donnée par la loi de Nernst (1890) :

$$E_M = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln a_{M^{n+}}$$

avec :

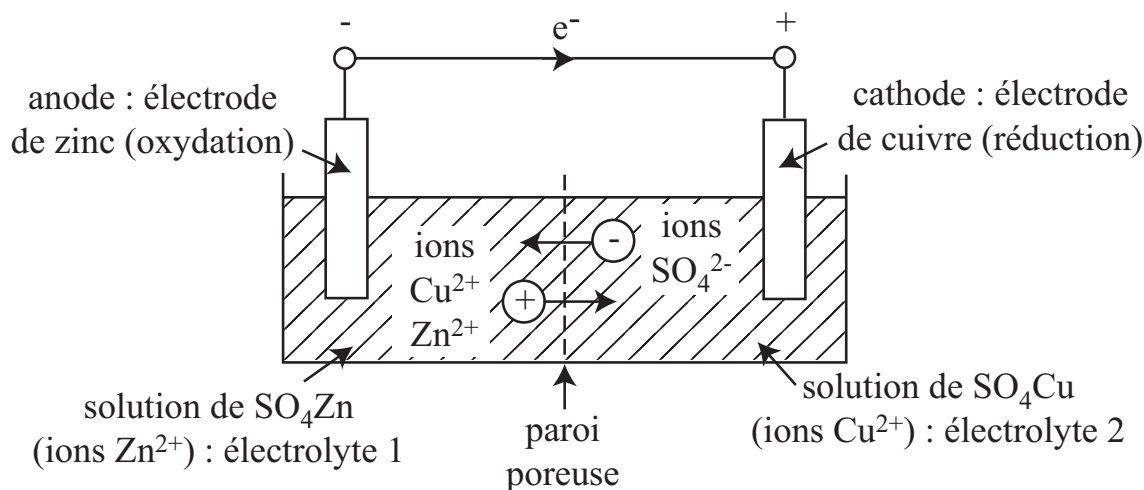
- E_0 : constante (tension normale du métal) ;
- R : constante des gaz parfaits ;
- T : température absolue ;
- F : 1 faraday = 96500 C ;
- $a_{M^{n+}}$: activité des ions M^{n+} dans la solution (= concentration des ions M^{n+} pour les solutions diluées).

5.3 Piles

5.3.1 Principe

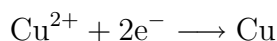
Une pile est constituée par l'association de deux électrodes dissemblables plongeant dans un ou plusieurs électrolytes.

Exemple : **pile Daniell** :



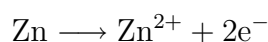
5.3.2 Fonctionnement

- réduction des ions Cu^{2+} sur l'électrode de cuivre :



⇒ dépôt de cuivre sur l'électrode de cuivre (cathode) ;

- oxydation de l'électrode de zinc :



⇒ dissolution de l'électrode de zinc (anode) ;

- circulation des électrons dans le circuit extérieur ⇒ courant électrique ;
- déplacement des ions dans l'électrolyte sous l'effet du champ électrique produit par les électrodes ;
- réaction globale :



5.3.3 Force électromotrice

F.é.m d'une pile = différence de potentiel entre les tensions absolues d'électrodes. Exemple : pile Daniell :

$$E = E_{\text{Cu}} - E_{\text{Zn}}$$

5.3.4 Représentation d'une pile

Exemples :

- pile Daniell : $\underbrace{\overset{\oplus}{\text{Cu}}}_{\text{cathode}} \mid \underbrace{\text{CuSO}_4 \mid \text{ZnSO}_4}_{\text{électrolytes}} \mid \underbrace{\overset{\ominus}{\text{Zn}}}_{\text{anode}}$
- pile Volta : $\text{Cu} \mid \text{H}_2\text{SO}_4 \mid \text{Zn}$

5.3.5 Energie d'une pile

Réactions chimiques \rightarrow énergie chimiques transformée en énergie électrique.

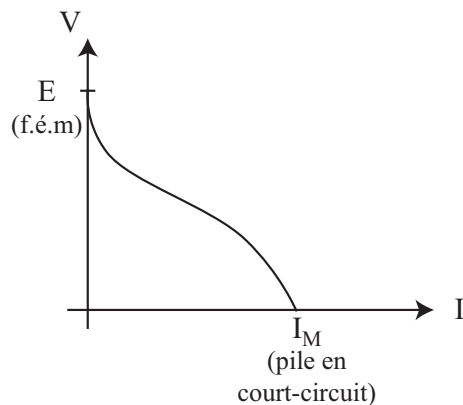
$$\text{Energie produite} = nFE$$

avec :

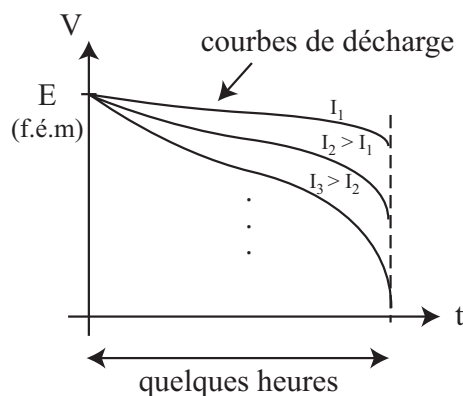
- n : nombre d'électrons échangés dans une réaction élémentaire ($\text{M} \rightleftharpoons \text{M}^{n+} + n\text{e}^-$);
- F : 1 faraday = 96500 C;
- E : f.é.m de la pile.

5.3.6 Caractéristiques d'une pile

Variation de la tension entre les électrodes en fonction du courant débité :



Variation de la tension au cours du temps lorsque la pile alimente un récepteur :



Remarque : la pile fournit de l'énergie jusqu'à épuisement des réactifs. Dans le cas des accumulateurs, on peut régénérer ces réactifs : accumulateurs = générateurs électrochimiques réversibles.

5.3.7 Polarisation des piles

Soit la pile Volta : $\overset{\oplus}{\text{Cu}}|\text{H}_2\text{SO}_4|\overset{\ominus}{\text{Zn}}$.

Réactions aux électrodes :

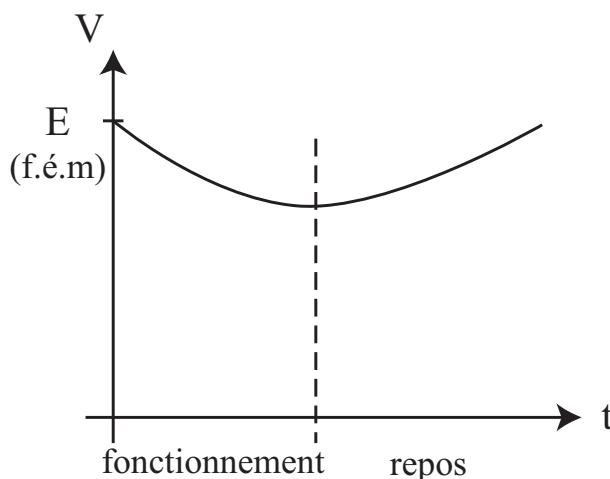
- anode Zn : $\text{Zn} \longrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$
- cathode Cu : $2\text{H}_3\text{O}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \overset{\nearrow}{\text{H}_2} + 2\text{H}_2\text{O}$

Dégagement d'hydrogène sur la lame de cuivre \rightarrow naissance d'une force contre-électromotrice (f.c.é.m) \Leftrightarrow pile locale $\overset{\oplus}{\text{H}_2}|\overset{\ominus}{\text{Cu}} \rightarrow$ diminution de la f.é.m de la pile : **phénomène de polarisation**.

La polarisation est due à l'accumulation sur l'une ou les deux électrodes des produits engendrés par les réactions électrochimiques qui ont lieu au cours du fonctionnement de la pile (généralement de l'hydrogène sur le pôle positif).

En pratique, on élimine ces produits de manière continue en ajoutant des substances appelées **dépolarisants**.

Remarque : la f.é.m revient à sa valeur initiale lorsque la pile est au repos (disparition de l'hydrogène par diffusion).

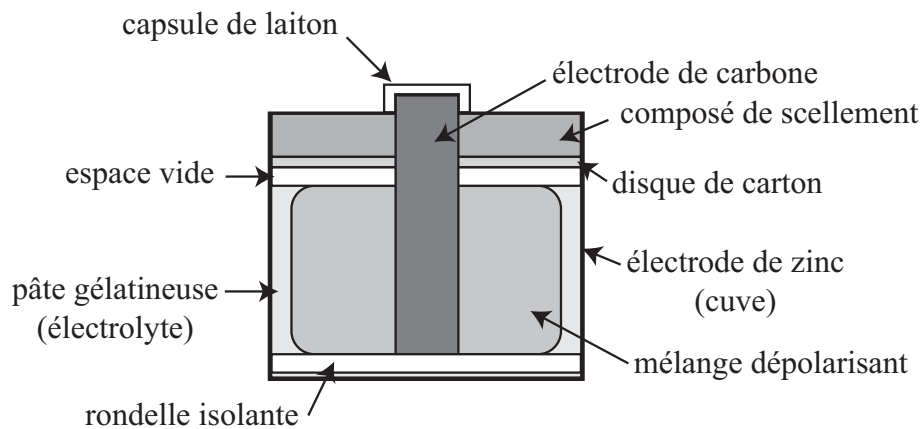


5.4 Quelques types de piles

5.4.1 Piles sèches

La plus utilisée : la pile à couple Zn-C (zinc-carbone) appelée **pile Leclanché** (1868).

5.4.1.1 Constitution d'un élément Leclanché

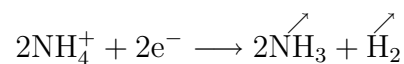


→ pile $C|NH_4Cl_2|Zn$:

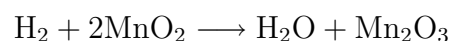
- électrode positive : bâton de charbon (C) ;
- dépolarisant : bioxyde de manganèse (MnO_2) ;
- électrolyte : chlorure d'ammonium gélifié (NH_4Cl) ;
- électrode négative : cuve de zinc (Zn).

5.4.1.2 Fonctionnement

Au voisinage de l'électrode \oplus :



→ dégagement d'hydrogène qui provoque la polarisation de la pile \Rightarrow réaction de dépolarisation :



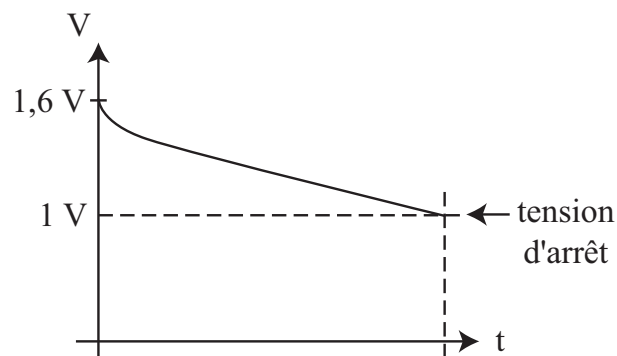
réaction lente, qui continue même lorsque la pile est à l'arrêt.

Sur l'électrode \ominus :



5.4.1.3 Caractéristiques

- f.é.m : 1,6 V en début d'utilisation, diminution lente et continue :



- résistance interne : entre 0,3 et 1 Ω ;
- énergie massique : 60 Wh/kg ;
- normalisation : piles « rondes » :

modèle	hauteur max. (mm)	diamètre min. (mm)	diamètre max. (mm)
R6	50,5	13,5	14,5
R14	50	24,7	26,2
R20	61,5	32,2	34,2

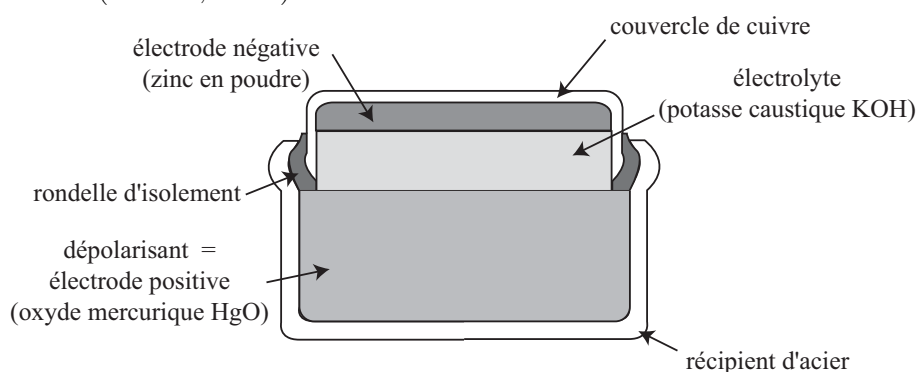
5.4.1.4 Différents modèles

- piles pour éclairage : bon marché, utilisation intermittente de courte durée ;
- piles pour moteurs (exemple : magnétophones) : faible résistance interne, intensité élevée, utilisation de longue durée unitaire.

5.4.2 Piles à l'oxyde mercurique

5.4.2.1 Constitution

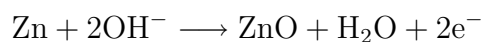
Piles « bouton » (Ruben, 1947) :



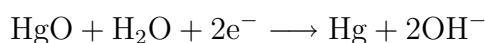
→ pile $\text{HgO}|\text{KOH}|\text{Zn}$.

5.4.2.2 Fonctionnement

Anode : oxydation du zinc :



Cathode : réduction de l'oxyde mercurique :



5.4.2.3 Caractéristiques

- f.é.m \approx 12 V ;
- énergie massique : 100 Wh/kg ;
- faible volume ;
- courants de décharge élevés.

5.5 Accumulateurs

Ce sont des générateurs chimiques réversibles. En charge, ils accumulent de l'énergie qu'ils restituent pendant la décharge.

5.5.1 Grandeurs caractéristiques

- capacité : quantité maximale d'électricité qu'un accumulateur peut fournir. Elle se mesure en ampère-heures (1 Ah = 3600 C). Elle est rapportée à 1 kg d'électrode contenu dans l'accumulateur → capacité massique (Ah/kg) ;
- rendements :

- . rendement énergétique :

$$r = \frac{\mathcal{E}_d}{\mathcal{E}_c}$$

avec :

\mathcal{E}_d : énergie libérée durant la décharge de l'accumulateur ;

\mathcal{E}_c : énergie fournie à l'accumulateur lors de la charge ;

- . rendement en quantité d'électricité :

$$q = \frac{Q_d}{Q_c}$$

avec :

Q_d : charge libérée par l'accumulateur ;

Q_c : charge fournie à l'accumulateur.

5.5.2 L'accumulateur au plomb

Inventé par Planté en 1860.



5.5.2.1 Constitution

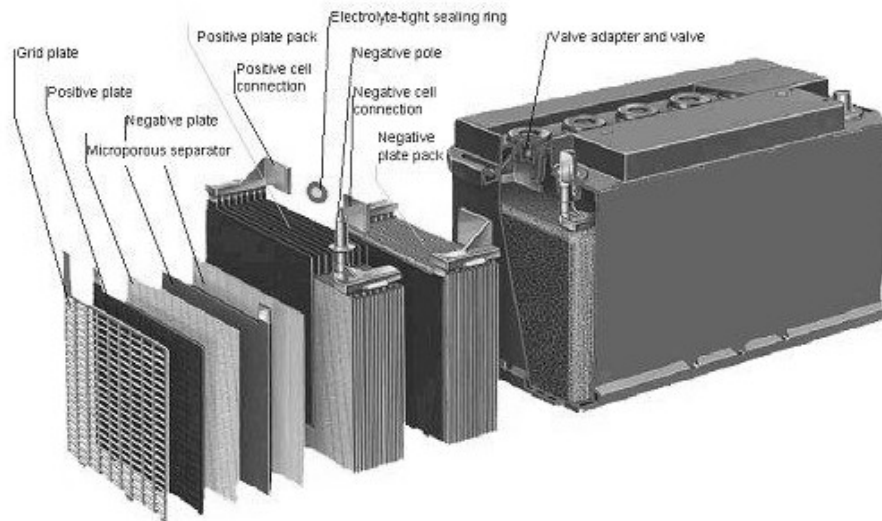
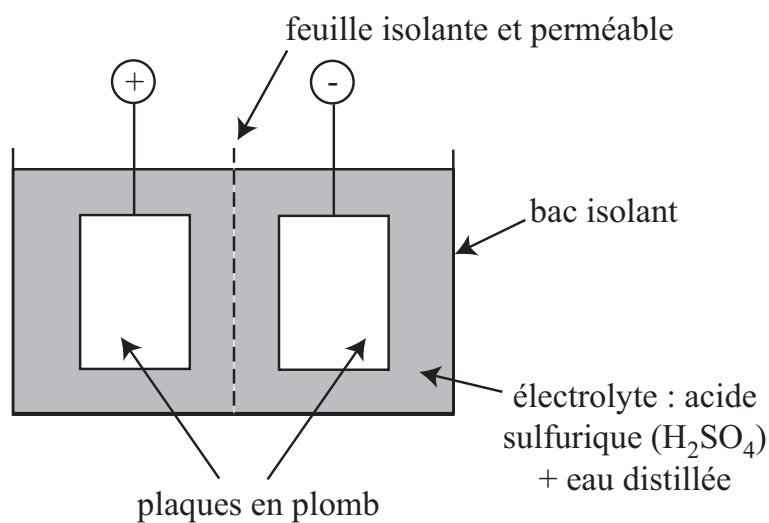


Schéma simplifié :



Plaque \oplus recouverte de **minium** (Pb_3O_4).

Plaque \ominus recouverte de **litharge** (PbO).

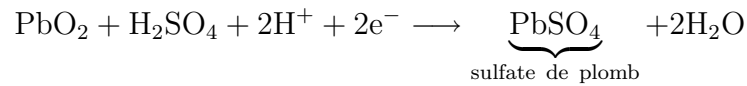
5.5.2.2 Fonctionnement

Charge de formation (première charge) :

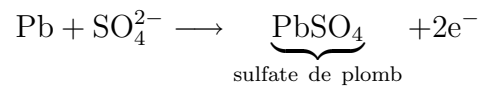
- la cathode \oplus est oxydée en **bioxyde de plomb** PbO_2 : matière active de l'accumulateur ;
- l'anode \ominus est réduite en **plomb spongieux** Pb .

Décharge :

- électrode \oplus :

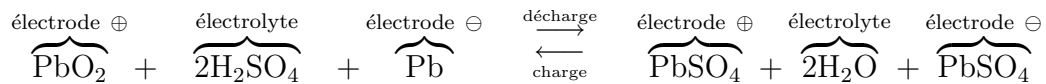


- électrode \ominus :

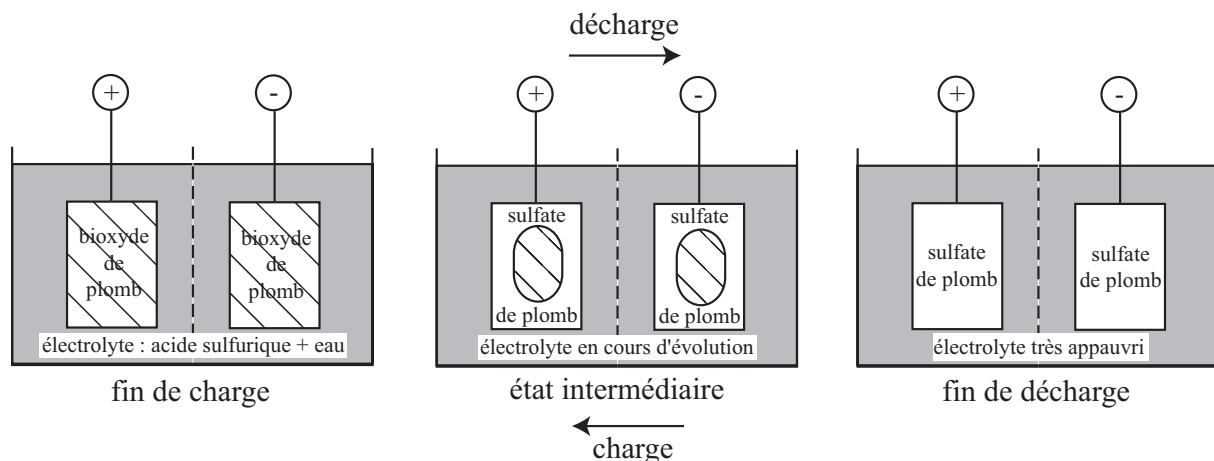


Charge : réactions inverses et électrode $\oplus \longleftrightarrow$ électrode \ominus .

Equation de fonctionnement : formule de la **double sulfatation** :



→ sulfatation des électrodes \oplus et \ominus .



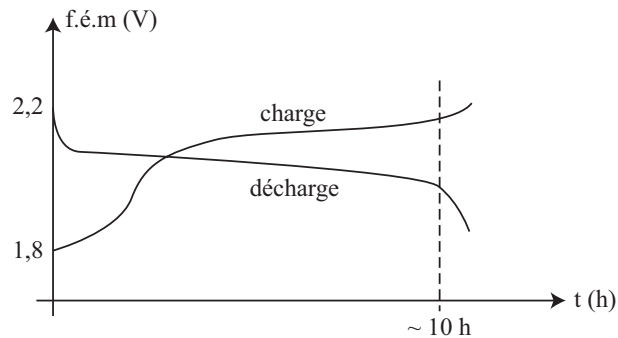
Remarques :

- la concentration de l'électrolyte diminue lors de la décharge (production d'eau) → indicateur de l'état de la charge de l'accumulateur ;
- l'accumulateur est déchargé lorsque les deux électrodes sont totalement sulfatées ;
- au cours de la charge, le sulfate de plomb est régénéré en PbO_2 et Pb .

5.5.2.3 Caractéristiques :

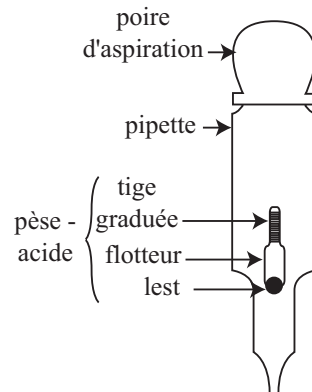
- capacité = 10 Ah/kg ;
- rendement en énergie : $r \approx 80\%$;
- rendement en quantité d'électricité : $q \approx 90\%$;
- résistance interne : quelques $\text{m}\Omega$;
- f.é.m d'un élément :
 - . au repos $\approx 2 \text{ V}$;

- . en fin de charge $\approx 2,2$ V ;
- . en fin de décharge $\approx 1,8$ V.



5.5.2.4 Mesure de la charge d'un accumulateur

Elle se fait en mesurant la densité de l'électrolyte au moyen d'un **pèse-acide** ou **densimètre** :



La densité de l'électrolyte se mesure en **degrés Baumé** ($^{\circ}\text{B}$) :

- à pleine charge $\rightarrow 32$ $^{\circ}\text{B}$;
- à mi-charge $\rightarrow 24$ $^{\circ}\text{B}$;
- accumulateur déchargé $\rightarrow 13$ $^{\circ}\text{B}$.

Formule de définition des degrés Baumé :

$$d = \frac{144,32}{144,32 - B}$$

avec :

- d : densité (sans unité) ;
- B : concentration en degrés Baumé.

5.5.2.5 Applications des accumulateurs

- générateurs dans la traction électrique ;
- réserves d'énergie dans les centrales électriques ;
- démarrage automobile.

Bibliographie

- [1] I. BERKES. *Les bases de l'électrotechnique*. Vuibert Technologie. Vuibert, Paris, 1998.
- [2] R. BESSON. *Aide-mémoire d'électronique pratique*. Dunod, Paris, 1998.
- [3] R. BESSON. *Composants électroniques - Technologie et utilisation*. Dunod, Paris, 1998.
- [4] A. BIANCIOTTO et P. BOYE. *La construction normalisée en électrotechnique*, volume 1. Delagrave, Paris, 1985.
- [5] A.S. BOUAZZI. *Les matériaux électriques*. Fondation Nationale de la Recherche Scientifique, Tunis, 1992.
- [6] J. CLADÉ. *Electrotechnique*. Collection de la direction des études et recherches d'Electricité de France. Eyrolles, Paris, 1989.
- [7] G. GORY. *Connaissance des accumulateurs au plomb et autres générateurs électrochimiques*. Autovolt. Semis, Paris, 1977.
- [8] J. HLADIK. *Les piles électriques*. Que sais-je ? Presses Universitaires de France, Paris, 1971.
- [9] R.V. HONORAT. *Thyristors, triacs et GTO*. Editions Radio, Paris, 1987.
- [10] F. LUCAS et P. CHARRUAULT. *L'électronique de l'électricien*. Librairie Delagrave, Paris, 1982.
- [11] N. MOHAN, T.M. UNDELAND, et W.P. ROBBIN. *Power Electronics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.