

**ELEMENTS DE TECHNOLOGIE**  
**DES**  
**COMPOSANTS ELECTRONIQUES**

## Sommaire

<b>1</b>	<b>COMPOSANTS RESISTIFS.....</b>	<b>3</b>
1.1	Résistance d'un composant résistif .....	3
1.2	Composants résistifs bobinés de puissance .....	3
1.3	Composants résistifs bobinés de précision .....	3
1.4	Composants résistifs à film métallique.....	4
1.5	Enduits résistifs .....	4
1.6	Composants résistifs au carbone aggloméré.....	4
1.7	Composants résistifs à couche de carbone .....	4
1.8	Composants résistifs à couche d'oxydes .....	4
1.9	Thermistances .....	4
1.10	Varistances .....	4
1.11	Tableau comparatif des différentes technologies .....	5
1.12	Cellules photoconductrices .....	5
<b>2</b>	<b>CONDENSATEURS .....</b>	<b>6</b>
2.1	Capacité d'un condensateur .....	6
2.2	Modèle du condensateur .....	6
2.3	Condensateurs à diélectrique verre.....	6
2.4	Condensateurs à diélectrique mica .....	6
2.5	Condensateurs à diélectrique céramique groupe 1 .....	7
2.6	Condensateurs à diélectrique céramique groupe 2 .....	7
2.7	Condensateurs à diélectrique plastique.....	7
2.8	Condensateurs électrolytiques ou électrochimiques.....	7
2.9	Tableau comparatif des différentes technologies .....	8
<b>3</b>	<b>SEMI-CONDUCTEURS.....</b>	<b>9</b>
3.1	Raffinage.....	9
3.2	Production du cristal .....	9
3.3	Semi-conducteurs dopés .....	9
3.4	Porteurs majoritaires .....	9
<b>4</b>	<b>DIODES.....</b>	<b>10</b>
4.1	Jonction PN.....	10
4.2	Modèles de la diode à jonction PN.....	10
4.3	Eléments capacitifs.....	11
4.4	Temps de recouvrement .....	11
4.5	Diodes de redressement.....	11
4.6	Diodes de commutation .....	11
4.7	Diodes régulatrices de tension (diodes Zener) .....	11
4.8	Diodes "tunnel" .....	12
4.9	Diodes "schottky" .....	12

# ELEMENTS DE TECHNOLOGIE DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES

---

4.10	Diodes électroluminescentes .....	12
4.11	Photodiodes .....	12
<b>5</b>	<b>TRANSISTORS BIPOLAIRES.....</b>	<b>13</b>
5.1	Effet transistor .....	13
<b>6</b>	<b>TRANSISTORS UNIPOLAIRES .....</b>	<b>14</b>
6.1	Transistors à effet de champ (TEC ou FET).....	14
6.1.1	TEC à appauvrissement (depletion) .....	14
6.1.2	TEC à enrichissement (enhancement).....	14
6.2	Transistors à effet de champs à jonction (JFET) .....	15
6.3	Transistors à effet de champs MOS (métal oxyde silicium). ....	16
<b>7</b>	<b>FAMILLES TECHNOLOGIQUES.....</b>	<b>18</b>
7.1	Technologies bipolaires .....	18
7.2	Technologie I <sup>2</sup> L (Integrate Injection Logic).....	18
7.3	Technologies unipolaires .....	18
<b>8</b>	<b>FAMILLES D'OPERATEURS LOGIQUES .....</b>	<b>20</b>
8.1	Bipolaires TTL.....	20
8.2	Bipolaires ECL (Emitter Coupled Logic) .....	20
8.3	Unipolaires CMOS.....	21
8.4	Tableau comparatif .....	21

# 1 COMPOSANTS RESISTIFS

## 1.1 Résistance d'un composant résistif

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

R : résistance ( $\Omega$ )  
 $\rho$  : résistivité ( $\Omega/m$ )  
 $l$  : longueur du conducteur (m)  
 $s$  : surface de la section du conducteur ( $m^2$ )

$$\rho\theta = \rho_0 (1 + \alpha\theta)$$

$\rho\theta$  : résistivité à la température  $\theta$   
 $\rho_0$  : résistivité à  $0^\circ C$   
 $\alpha$  : coefficient de température  
 $\theta$  : température

$\alpha$  est positif pour les métaux et négatif pour le carbone.

Le modèle équivalent en haute fréquence comporte des éléments capacitifs et inductifs, les matériaux et la technologie employés conduisent à une fréquence maximale d'utilisation.

La valeur de la résistance des composants résistifs évolue aussi en fonction de la tension et du vieillissement.

Un coefficient de tension peut être calculé :

$$\frac{\Delta_R}{R \cdot \Delta_V}$$

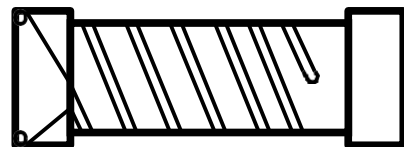
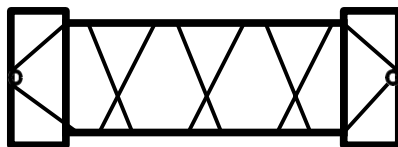
Les composants résistifs ajoutent à la différence de potentiels à ses bornes un niveau de bruit de fond (souffle).

## 1.2 Composants résistifs bobinés de puissance

Un fil résistif est bobiné autour d'un support isolant puis protégé par un enrobage pour le garantir des poussières, humidité et attaques chimiques. Le matériau utilisé pour l'enrobage dépend de la température maximale admissible ( du composant en tenant compte de la température ambiante et de la puissance dissipée) que doit pouvoir atteindre le corps du composant: laque ( $125^\circ$ ), émail ( $125^\circ$ ), ciment ( $260^\circ$ ), vitrification ( $400^\circ$ ) ou porcelaine.

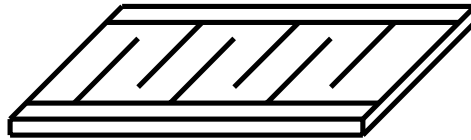
## 1.3 Composants résistifs bobinés de précision

Le principe est le même que pour les composants résistifs de puissance. Pour minimiser l'inductance créée par le bobinage, soit le fil est dédoublé et chaque brin est enroulé en sens inverse, soit le fil est doublé avant d'être bobiné ( c'est une boucle du fil qui est bobinée ).



### 1.4 Composants résistifs à film métallique

Une couche de métal ou d'alliage de métaux est déposée par évaporation sous vide sur un tube ou une plaquette isolante. Dans le cas de la plaquette, un dessin permettant d'allonger la longueur de conducteur peut être photo gravé ou un ajustage au laser peut être opéré pour obtenir des valeurs de résistance très précises.



### 1.5 Enduits résistifs

Produits à base de verre fritté et de poudres métalliques déposés sur support isolant : cela permet de créer des composants résistifs dans les composants hybrides (support céramique) ou entre deux couches de carte imprimée multicouches (haute densité d'implantation).

### 1.6 Composants résistifs au carbone aggloméré.

Une poudre de carbone et de matériaux isolants est mélangée et agglomérée avec un liant. Ces composants ne sont plus utilisés: leur résistance électrique dérive de façon non négligeable en fonction de la fréquence, de la tension, et surtout du vieillissement (jusqu'à 100%! ), ils introduisent également un bruit de fond (souffle) assez important, enfin le prix des composants résistifs à couche de carbone est devenu concurrentiel.

### 1.7 Composants résistifs à couche de carbone

Une couche de carbone est déposée sur un tube isolant. Cette couche peut être entaillée par une rainure hélicoïdale pour augmenter la longueur du conducteur.

### 1.8 Composants résistifs à couche d'oxydes

Les propriétés de ces composants dépendent des mélanges d'oxydes utilisés. Ces matériaux permettent de réaliser des composants de haute stabilité ou de forte valeur de résistance (jusqu'à 200 GΩ).

### 1.9 Thermistances

Ce sont des composants formés d'une agglomération d'une poudre de semi-conducteur que l'on obtient par frittage d'oxydes métalliques. Elles peuvent être utilisées comme capteur de température avec de faibles intensités, en régulation en température, en protection contre les surintensités. Le coefficient de température peut être négatif (CTN) ou positif (CTP) selon les matériaux utilisés.

### 1.10 Varistances

Ce sont des composants constitués de cristaux de carbures de silicium agglomérés par un liant céramique. Leur résistance varie en fonction de la différence de potentiels à leur bornes: ce sont des composants non linéaires. Leur caractéristique intensité - valeur de différence de potentiels peut s'écrire:

$$i = Kv^n$$

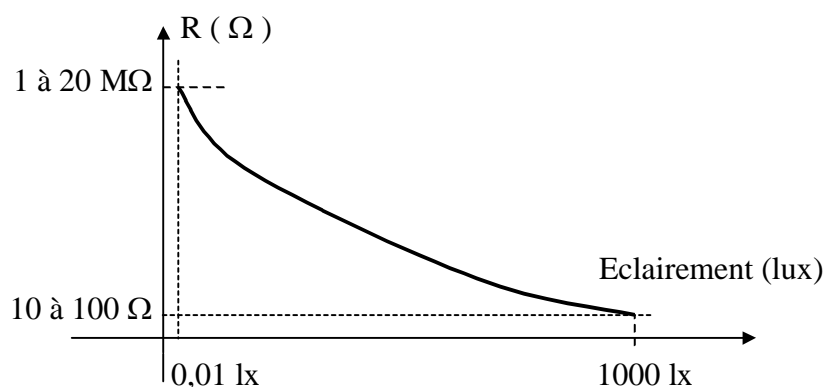
K et n sont des constantes avec  $2 < n < 7$  selon les différents types de varistances. Elles sont utilisées en régulation de tension et en protection contre les surtensions.

### 1.11 Tableau comparatif des différentes technologies

	bobinés de puissance	bobinés de précision	à film métallique	enduits résistifs	à couche de carbone	à couche d'oxydes
Résistance ( $\phi$ )	0.01 à $10^5$	0.1 à $10^5$	1 à $10^5$		1 à $10^8$	1 à $10^7$
Puissance max. (W)	1000	8	2	0.5	6	4
Température max. (°C)	Suivant enrobage	105	155	125	125	200
Coefficient de température ( $10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )	120	15	20 à 200		- 500	$\pm 300$
Tension max. (kV)	20	2	5		1	0.75
Coefficient de tension ( $10^{-6} / \text{V}$ )						- 10
Gamme de fréquence (MHz)	Basses fréquences	30	100		100	100
Niveau de bruit ( $\mu\text{V/V}$ )	Négligeable	négligeable	0.02		0.04	négligeable
Stabilité en vieillissement	bonne	bonne	très bonne	excellente	bonne	excellente

### 1.12 Cellules photoconductrices

Lorsqu'un électron reçoit de l'énergie lumineuse : un photon, il passe sur une couche électronique supérieure. Ce phénomène diminue la résistivité des semi-conducteurs de façon sensible lorsqu'ils sont éclairés. Les cellules photoconductrices sont réalisées à partir de silicium, de sulfure de plomb, de sulfure de cadmium ou d'antimoniure d'indium selon la sensibilité spectrale désirée. Leur caractéristique courant - différence de potentiels n'est pas linéaire même avec un éclairage constant.



## 2 CONDENSATEURS

Un condensateur est constitué de deux surfaces conductrices (armatures) séparées par un isolant (diélectrique).

### 2.1 Capacité d'un condensateur

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

$$\epsilon_r \cdot \epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ F/m}$$

$\epsilon_r$  : permittivité relative du diélectrique

$\epsilon_0$  : permittivité du vide (F/m)

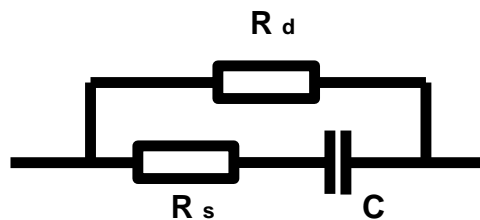
$\epsilon_r \cdot \epsilon_0$  : permittivité absolue du diélectrique

$S$  : surface d'une armature (m<sup>2</sup>)

$e$  : épaisseur du diélectrique (m)

L'épaisseur  $e$  est imposée par la rigidité diélectrique de l'isolant utilisé et la tension de service du composant (différence de potentiels maximale pour des différences de potentiels continues).

### 2.2 Modèle du condensateur



$R_d$  : élément résistif en dérivation. Il est dû à la résistivité du diélectrique qui n'est pas infinie. Il en résulte un courant de fuite.

$R_s$  : élément résistif série. Il est dû à l'absorption de charges dans le diélectrique. Il correspond au facteur de qualité du condensateur:

$$Q = \frac{1}{R_s C \omega} = \frac{1}{\text{tg} \varphi} = \frac{1}{\text{tg} \delta} \quad \left( \varphi + \delta = \frac{\pi}{2} \text{ rd} \right)$$

$Q = \frac{1}{\text{tg} \varphi}$  : facteur de qualité du condensateur

$\text{tg} \delta$  : facteur de perte

$\omega$  : pulsation de la différence de potentiels aux bornes du condensateur (rd / s)

### 2.3 Condensateurs à diélectrique verre

Ce sont des verres borosilicatés contenant des oxydes de plomb, potassium, baryum.

Condensateurs de petites valeurs de capacité, utilisés pour leur résistance de fuite élevée, leur tenue en haute fréquence, en tension, en température et leur stabilité dans le temps (vieillessement).

### 2.4 Condensateurs à diélectrique mica

Le mica est un double silicate d'aluminium et de potassium. Mêmes utilisations que pour les condensateurs à diélectrique verre.

### 2.5 Condensateurs à diélectrique céramique groupe 1

Ce sont des composants stables et précis de haute qualité. Leur coefficient de température est défini, il dépend des matériaux utilisés: de  $-3000.10^{-6}$  à  $+300.10^{-6}$ . En combinant ces matériaux, des condensateurs très stables en température sont obtenus. Dans ce groupe, des composants "haute puissance" ou "très haute tension" peuvent être réalisés.

### 2.6 Condensateurs à diélectrique céramique groupe 2

Leur permittivité très élevée permet des tailles miniatures (composants montés en surface). Les valeurs de capacité sont imprécises et le coefficient de température est instable. Ce sont des composants peu onéreux pour usage courant.

### 2.7 Condensateurs à diélectrique plastique

Polystyrène : utilisés pour conserver des charges électriques sur de longues durées car leur résistivité est extrêmement élevée, plus encore que celle des condensateurs à diélectrique verre. Ils ont aussi d'excellentes performances aux fréquences élevées et en régime impulsionnel dues à leur faible absorption diélectrique.

Polytétrafluoréthylène ou téflon : Mêmes performances que le polystyrène mais plus stables en vieillissement et avec une très bonne tenue en température.

Polypropylène : stables en température et bonne tenue aux températures élevées.

Polyester: leur rigidité diélectrique et leur propriété "d'autocicatrisation" permettent de produire des composants d'encombrement réduit.  
Très bonne tenue aux températures élevées.

Polysulfone : très stables en température avec la propriété "d'autocicatrisation".  
Bonnes performances aux fréquences élevées.

Polycarbonate : Condensateurs de qualité, stables, fiables et avec un encombrement réduit.

### 2.8 Condensateurs électrolytiques ou électrochimiques

Lors de l'électrolyse d'une solution, des ions d'oxygène se dégagent de l'anode, le métal qui la constitue se couvre alors d'une couche d'oxyde ( $1\mu\text{m}$ ). Les oxydes de métaux sont d'excellents isolants. Il est ainsi réalisé un condensateur dont le diélectrique est un oxyde de métal, une armature est l'anode et l'autre est l'électrolyte. Les condensateurs électrolytiques sont polarisés, dans le cas accidentel où cette polarité n'est pas respectée, il y a destruction de la couche d'oxyde. Un courant de forte intensité peut alors circuler et produire un effet Joule : dégagements gazeux qui peuvent conduire à l'explosion du composant.

Les condensateurs électrolytiques permettent d'obtenir de très grandes valeurs de capacité dans un volume restreint grâce à la faible épaisseur de la couche de diélectrique, la permittivité et la rigidité diélectrique de cette dernière. Du fait de leur nature chimique, ces composants sont peu précis, peu stables en température, en tension, en vieillissement. Leur courant de fuite relativement élevé et leur médiocre coefficient de qualité les limitent à des utilisations pour des fréquences basses.

Electrodes d'aluminium : le diélectrique est de l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Electrodes de tantale : le diélectrique est de l'oxyde de tantale ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ). Ces condensateurs sont plus stables que ceux avec des électrodes en aluminium et leur encombrement moins grand. Le volume est encore réduit lorsque l'anode est frittée.



## 2.9 Tableau comparatif des différentes technologies

Type	Résistivité ( $\Omega/m$ )	rigidité diélec- trique (kV/m)	permi- tivité relative	facteur de perte	gamme de capacités (F)	tension max. (V)	gamme de température (° C)	coeff. tempér. ( $10^{-6}/^{\circ}C$ )	f max. (MHz)
verre	$10^{15}$ à $10^{18}$	10 000	9	$5 \cdot 10^{-4}$ à 1MHz	1pF à 10nF	jusqu'à 10kV.	- 55 à +125 (+300)	+120	100 000
mica	$10^{15}$ à $10^{17}$	70 000	6.5 à 9	$10^{-3}$ à 1MHz	1pF à 100nF	jusqu'à 10kV	- 55 à +125 (+600)	-20 à +30	100 000
céramique gr. 1	$10^{15}$ à $10^{17}$	3 000 à 9 000	6.5 à 200	$5 \cdot 10^{-4}$ à 1MHz	jusqu'à 1nF	...1kV (T.H.T)	- 55 à +150	-3000 à +300	50
céramique gr. 2	$10^{14}$ à $10^{15}$	3 000 à 6000	1000 à 10000	$25 \cdot 10^{-3}$ à 1MHz	jusqu'à 220nF		- 55 à +85	instable	50
poly- styrène	$3 \cdot 10^{19}$	10 000 à 100 000	2.5	$2 \cdot 10^{-4}$ à 1MHz	10pF à 1 $\mu$ F	jusqu'à 2kV	- 40 à +80	-100 à -200	1
téflon	$10^{18}$	10 000 à 100 000	2	$2 \cdot 10^{-4}$ à 1MHz	10pF à 1 $\mu$ F	jusqu'à 2kV	- 55 à +250	-100 à -200	1
poly- propylène		500 000		$2 \cdot 10^{-4}$ à 1kHz		jusqu'à 1kV	- 55 à +170		0.1
polyester (mylar)	$>10^{15}$	10 000	2.5	$2 \cdot 10^{-2}$ à 1MHz	220pF à 22 $\mu$ F	jusqu'à 1kV	- 40 à +125	+200 à +900	1
poly- sulfone				$10^{-3}$ à 1MHz	jusqu'à 10 $\mu$ F	jusqu'à 400V	-55 à +150		10
poly- carbonate		10 000		$10^{-3}$ à 1kHz	1nF à 10 $\mu$ F	jusqu'à 200V	- 55 à +125	-20 à -100	0.1

Electro- lytiques	courant de fuite ( $\mu A/\mu F/V$ )	rigidité diélec- trique (kV/m)	permi- tivité relative	facteur de perte	gamme de capacités (F)	tension max. (V)	gamme de température (° C)	coeff. tempér. ( $10^{-6}/^{\circ}C$ )	f max. (MHz)
Oxyde d'aluminium		1000	9	$2 \cdot 10^{-2}$ à $25 \cdot 10^{-2}$ (à 50Hz)	1 $\mu$ F à 150000 $\mu$ F	jusqu'à 1kV.	- 40 à +85	+1000 à +4000	0.1
oxyde de tantale	0.025		26	$3 \cdot 10^{-2}$ à $10 \cdot 10^{-2}$ (à 50Hz)	1 $\mu$ F à 1 F (!)	jusqu'à 100V	- 55 à +85 (+600)		0.1

## 3 SEMI-CONDUCTEURS

Les semi-conducteurs sont des conducteurs non métalliques ayant une résistivité intermédiaire entre celles des conducteurs et celles des isolants.

$$1 \text{ à } 2 < \rho < 10^{+10} \Omega.m$$

Ils ont un coefficient de température négatif. Ils sont utilisés sous forme cristalline et chacun de leur atomes est lié par des liaisons de covalence avec les atomes voisins. Des corps composés d'éléments de groupes périodiques 3-5 2-6 4-4 ou 3-6 ont eux aussi des propriétés semi-conductrices: arséniure de gallium (GaAs), phosphure de gallium (GaP), sulfure de cadmium (CdS), antimoniure d'indium (InSb), carbure de silicium, certains sulfures, certains oxydes.

### 3.1 Raffinage

Par des procédés chimiques, le taux d'impuretés du matériau est amené à  $10^{-8}$ , puis les lingots sont passés dans un four à induction où seul une petite zone du lingot fond. Cette zone fondue progresse d'un bout à l'autre du lingot drainant les impuretés; l'opération est recommencée autant de fois que nécessaire. Le taux d'impuretés doit alors atteindre  $10^{-12}$ .

### 3.2 Production du cristal

Le semi-conducteur est porté juste à sa température de fusion. Une amorce de cristal est posée sur la surface semi-liquide. Le semi-conducteur en contact avec l'amorce va se solidifier et chacun des atomes va s'organiser en liaison de covalence avec les atomes de l'amorce recopiant ainsi la structure cristalline de celle-ci. Le barreau est alors tiré très lentement de la surface en fusion avec un mouvement de rotation très lent lui aussi.

Un autre moyen appelé croissance épitaxiale (du grec: "épi": sur et "teinen": arranger) consiste à mettre en contact une surface cristalline avec des vapeurs du même matériau. Les atomes se déposent sur la surface recopiant là encore la structure. Ce procédé est utilisé dans certaines phases de la réalisation des circuits intégrés pour faire croître le semi-conducteur de quelques couches d'atomes.

### 3.3 Semi-conducteurs dopés

Des impuretés choisies parmi les corps d'éléments périodiques voisins dans la classification périodique (tableau de Mendeleïev) sont ajoutées à un taux de l'ordre de  $10^{-8}$  au semi-conducteur. Les atomes des impuretés s'organisent en liaison de covalence avec les atomes voisins, mais ils ont un électron surnuméraire (semi-conducteur dopé N) ou manquant (dopé P). Cet électron ou cette absence d'électron (appelée parfois lacune ou trou) dispose d'une très grande mobilité du fait de sa non participation aux liaisons inter atomiques. A la conductibilité intrinsèque du semi-conducteur pur ( $\rho \approx 5000 \Omega.m$ ) s'ajoute alors la conductibilité extrinsèque qui dépend du taux de dopage ( $\rho \approx 10 \Omega.m$ ). Un premier dopage peut être opéré avant l'étirage du barreau, autrement les dopages sont obtenus par diffusion des impuretés sous forme gazeuse à l'intérieur du semi-conducteur.

### 3.4 Porteurs majoritaires

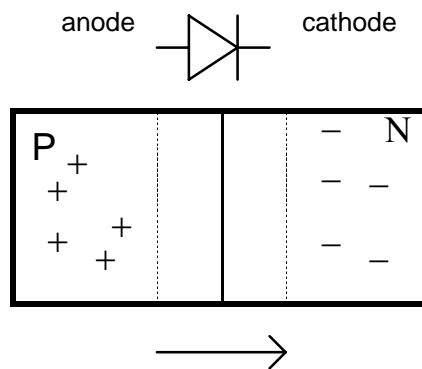
Ce sont les électrons dans les semi-conducteurs N et les trous dans les semi-conducteurs P.

Porteurs minoritaires : ce sont les trous dans les semi-conducteurs P et les électrons dans les semi-conducteurs N. Ce sont les rares porteurs qui n'ont pas été recombinaisonnés c'est à dire annulés, par un porteur majoritaire et qui sont dus à la conductivité intrinsèque.

## 4 DIODES

### 4.1 Jonction PN

Lorsque qu'est réalisée une jonction entre un semi-conducteur dopé N et un semi-conducteur dopé P, les électrons du côté N sont attirés par les trous et diffusent du côté P pour se recombiner avec; à l'inverse, les trous du côté P diffusent du côté N. Les 2 types de semi-conducteur étant à l'origine électriquement neutre, la diffusion produit un déséquilibre et donc l'apparition d'un champ électrique  $E$  au niveau de la jonction. Ce champ a pour effet que la diffusion s'arrête d'elle-même: chaque électron possède une charge  $q=1.6 \times 10^{-19}$  Cb et subi une force  $F= q \times E$  à l'intérieur du champ. Le champ électrique produit une différence de potentiels appelée barrière de potentiel de part et d'autre de l'épaisseur de la jonction.

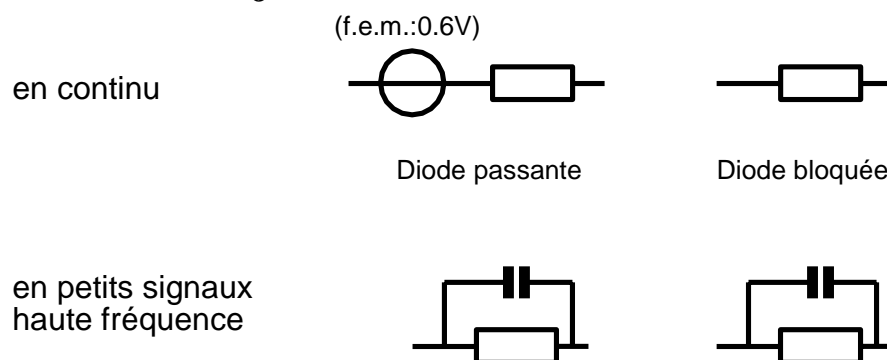


Une différence de potentiels étant appliquée à la jonction de telle sorte qu'elle soit positive du côté dopé P au côté dopé N, les électrons peuvent circuler du côté N vers le côté P si cette différence de potentiels est supérieure à la barrière de potentiel (0.5 à 0.6V); la diode est alors passante.

Une différence de potentiels appliquée en sens opposé renforce le champ électrique de la jonction et il ne peut circuler qu'un très faible courant de fuite dû aux porteurs minoritaires; la diode est bloquée.

Si la différence de potentiels prend une valeur importante, la jonction peut "claquer", un courant inverse très important peut alors circuler. La différence de potentiels de claquage est appelée aussi différence de potentiels de Zener. Le claquage en lui-même n'est pas destructif par contre la puissance absorbée alors par la diode peut l'être.

### 4.2 Modèles de la diode à jonction PN



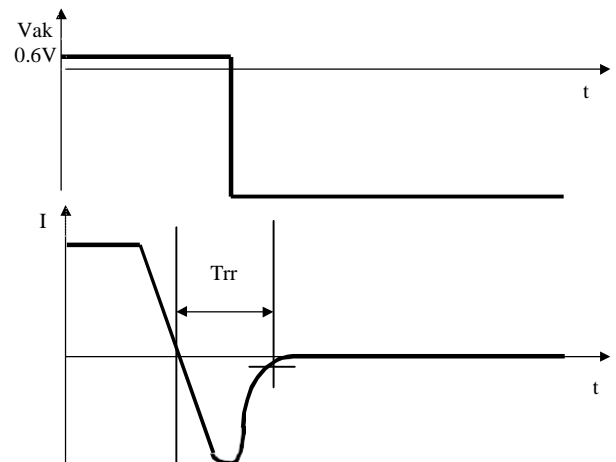
## 4.3 Eléments capacitifs

Diode passante: Les recombinaisons électrons-trous ne se font pas instantanément, ce délai est représenté par un élément capacitif dont la capacité (capacité de diffusion) est d'environ 1000pF.

Diode bloquée: Elle peut être considérée comme un isolant (laissant passer un courant de fuite) entre deux armatures, donc comme un condensateur d'une capacité de 10pF environ (capacité de transition).

## 4.4 Temps de recouvrement

C'est le temps que met la diode à passer de l'état passant à l'état bloqué. L'intensité du courant décroît et passe dans les valeurs négatives durant le délai dû aux recombinaisons, ensuite le courant de fuite s'établit en un temps dépendant de la capacité de transition.



## 4.5 Diodes de redressement

La surface de la jonction est importante pour permettre le passage d'intensités importantes. La différence de potentiels de claquage est élevée.

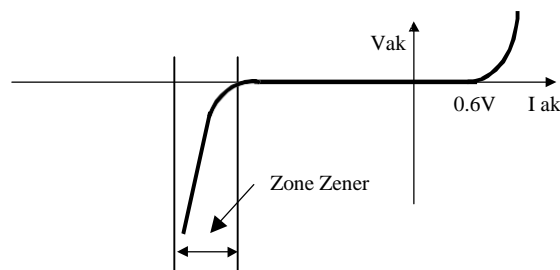
## 4.6 Diodes de commutation

Les éléments capacitifs sont réduits. Les intensités admissibles sont faibles.

Temps de recouvrement pour les diodes Si  $\approx 4\text{ns}$ , GaAs  $\approx 0.5\text{ns}$ .

## 4.7 Diodes régulatrices de tension (diodes Zener)

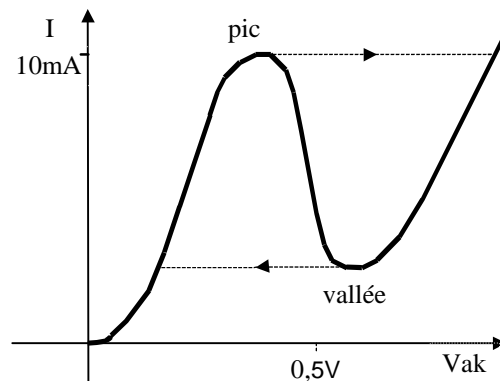
La caractéristique de la diode lorsque la différence de potentiels de claquage est atteinte présente une pente particulièrement élevée: la différence de potentiels ne varie pratiquement pas quand l'intensité évolue; c'est cette zone de la caractéristique qui est utilisée. Un taux de dopage élevé permet d'abaisser la différence de potentiels de claquage à la valeur désirée. Ces diodes produisent un bruit blanc lorsqu'elles sont utilisées avec une faible intensité (dans le coude de la caractéristique). Il existe des modèles particulièrement stables en température utilisés dans les références de tension (Zener buried diode).



### 4.8 Diodes "tunnel"

Le taux d'impuretés est particulièrement élevé ( $10^{-3}$ ) dans les semi-conducteurs utilisés, il en résulte une épaisseur de jonction très faible. Certains électrons ont alors assez de vitesse pour passer à travers la jonction, un courant peut circuler dans le sens passant alors que la barrière de potentiel est en place.

La courbe caractéristique présente un pic et une vallée séparés par une zone où l'intensité diminue quand la valeur de la différence de potentiels croît. Cette pente négative permet de réaliser des *oscillateurs haute fréquence*. La diode tunnel permet de réaliser aussi des commutateurs bistables extrêmement rapides: lorsque l'intensité de courant dépasse la valeur du pic, la différence de potentiels augmente brutalement pour changer de portion de courbe et inversement lorsque l'intensité passe au dessous de la valeur de la vallée.



### 4.9 Diodes "schottky"

Il s'agit d'une jonction métal-silicium fortement dopé N. La différence de potentiels dans le sens passant est plus faible que celle de la jonction PN (0.2 à 0.4 volts) et le temps de recouvrement est très bref. Cette diode est placée entre la base et le collecteur d'un transistor pour accélérer la sortie de l'état saturé. Ainsi est réalisé le "transistor Schottky" utilisé dans les familles d'opérateurs logiques bipolaires.

### 4.10 Diodes électroluminescentes

Elles sont réalisées à partir de phosphure de gallium. Le courant direct provoque des collisions entre les électrons dans le semi-conducteur, certains quittent leur couche électronique et y reviennent en émettant un photon.

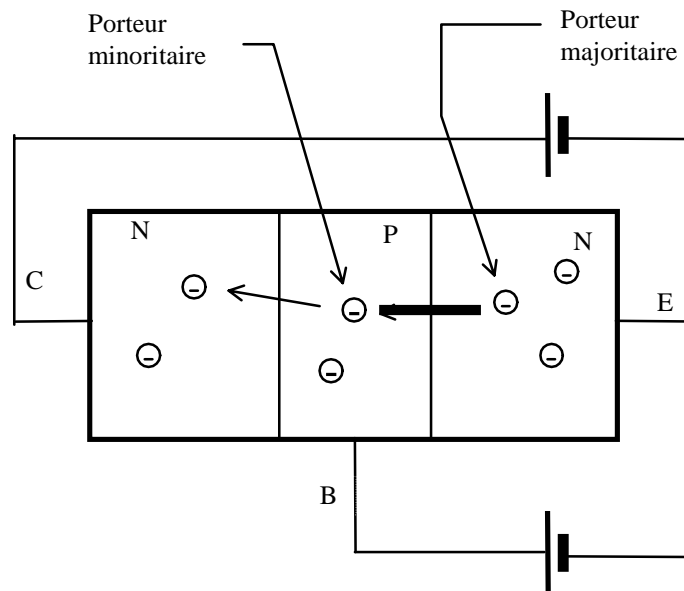
### 4.11 Photodiodes

Elles sont utilisées bloquées, polarisées par une différence de potentiels négative. L'éclairement augmente de façon significative le nombre de porteurs minoritaires responsables du courant en sens bloqué dans la diode.

## 5 TRANSISTORS BIPOLAIRES

Les technologies bipolaires sont appelées ainsi car leur fonctionnement fait appel aux deux types de porteurs: majoritaires et minoritaires.

Un transistor est constitué d'un empilement de trois couches de semi-conducteurs dopés (P-N-P ou N-P-N), séparées donc par deux jonctions. Ces trois couches sont appelées collecteur, base et émetteur.



### 5.1 Effet transistor

Une différence de potentiels est appliquée à un transistor NPN entre le collecteur et l'émetteur, le collecteur étant au potentiel le plus positif. La jonction base-collecteur est bloquée. Si une différence de potentiels suffisante est appliquée entre base et émetteur, la jonction base-émetteur devient passante. Les porteurs majoritaires peuvent alors franchir cette jonction. En particulier, un courant d'électrons passe de l'émetteur à la base. Dans la base dopée P, ces électrons viennent s'ajouter aux porteurs minoritaires qui eux sont dans le bon sens pour passer la jonction base-collecteur: le courant de collecteur est établi.

Pour éviter que ces porteurs minoritaires puissent se recombiner dans la base, celle-ci doit être de faible épaisseur.

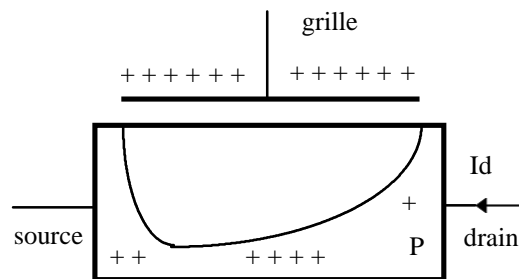
## 6 TRANSISTORS UNIPOLAIRES

### 6.1 Transistors à effet de champ (TEC ou FET)

Un transistor à effet de champ permet de commander l'intensité d'un courant à l'intérieur d'un semi-conducteur à l'aide d'un champ électrique qui est appliqué transversalement au courant, et qui repousse les porteurs majoritaires et attire les porteurs minoritaires.

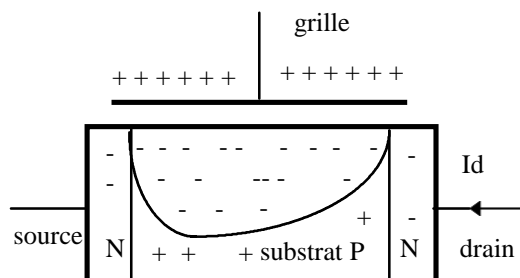
#### 6.1.1 TEC à appauvrissement (depletion)

Le canal conducteur entre le drain et la source existe en l'absence du champ électrique. Plus la différence de potentiels entre la grille et le semi-conducteur augmente plus le champ augmente, moins il y a de porteurs majoritaires, moins le transistor conduit.



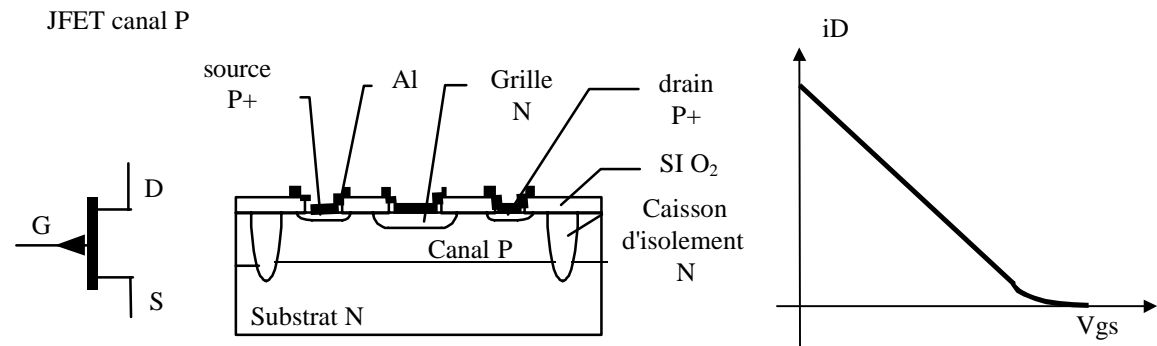
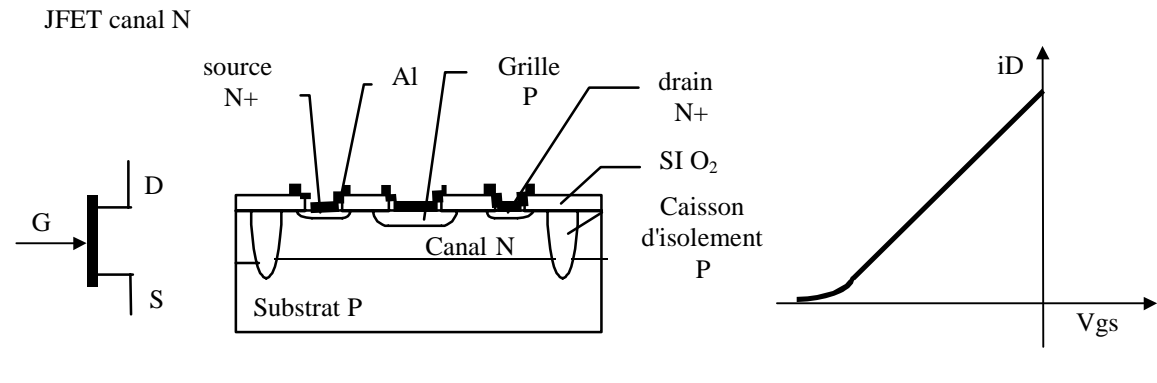
#### 6.1.2 TEC à enrichissement (enhancement)

Le canal conducteur entre le drain et la source est créé par le champ électrique. Plus la différence de potentiels entre la grille et le semi-conducteur augmente, plus le champ augmente, plus la taille du canal, composé des porteurs minoritaires du substrat, augmente, plus le transistor conduit.

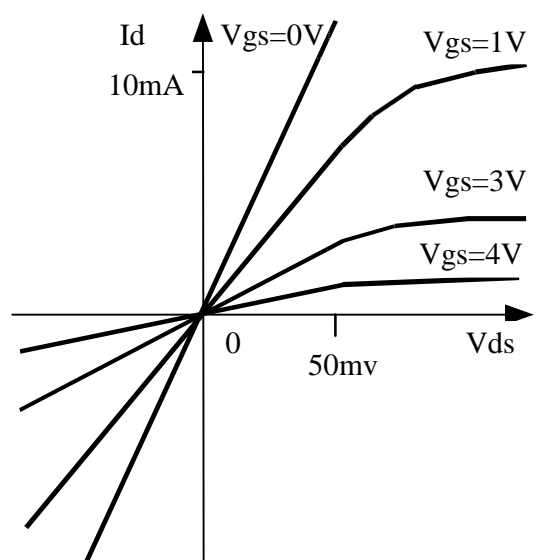


## 6.2 Transistors à effet de champs à jonction (JFET)

Dans une diode bloquée, la différence de potentiels à ses bornes s'ajoute à la barrière de potentiel et repousse les porteurs majoritaires; il s'agit forcément de TEC à appauvrissement.



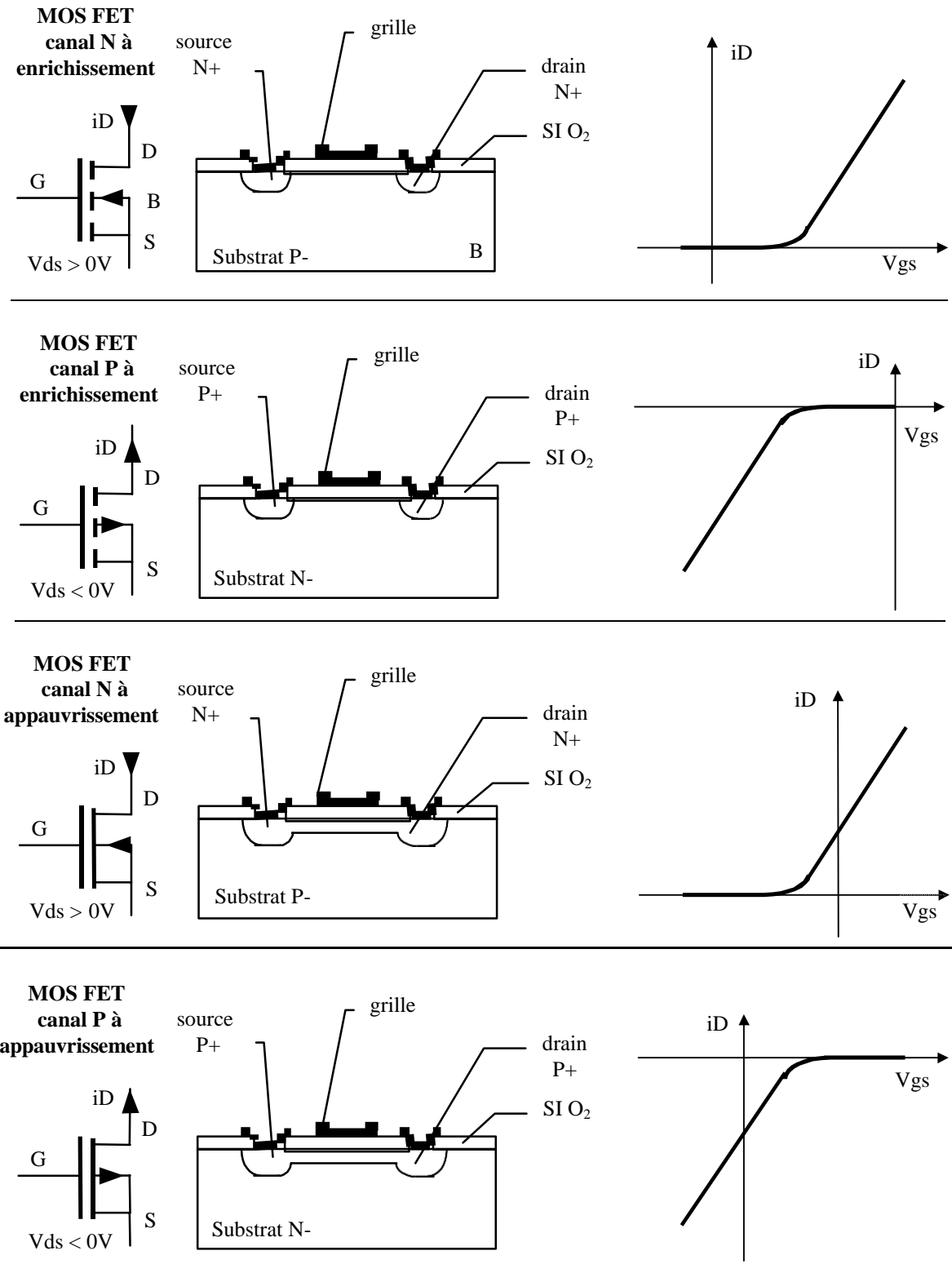
Une utilisation possible des transistors à effet de champs à jonction est d'ajuster une résistance à l'aide d'une différence de potentiels. Lorsque la différence de potentiels  $V_{DS}$  est comprise entre -50mV et 50mV la caractéristique  $V_{DS} = f(i_D)$  est linéaire et la pente dépend de la valeur de  $V_{GS}$ .





## 6.3 Transistors à effet de champs MOS (métal oxyde silicium).

Le champ électrique est appliqué par l'intermédiaire d'une électrode métallique (grille) au travers d'une couche très isolante d'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ).



Les transistors MOS ont des applications de plus en plus nombreuses. Ils sont utilisés pour réaliser des montages présentant des résistances d'entrées très élevées ( $10^{12}\Omega$ ) ou pour faire des interrupteurs analogiques avec des courants de fuites très faibles. A l'état passant, le transistor présente une résistance ( $R_{ON}$ ) non négligeable ( $\approx 100\Omega$ ).

Une technologie (VMOS) permet d'obtenir des transistors de puissance capables de remplacer des thyristors dans de nombreuses applications. Les transistors MOS, du fait que le bruit qu'ils engendrent n'augmente pas avec la fréquence, sont aussi utilisés dans l'étage de sortie des émetteurs VHF-UHF.

L'isolation parfaite de la grille permet aux charges électrostatiques de s'accumuler dans celle-ci. Il peut alors être produite une différence de potentiels suffisante pour qu'un arc électrique traverse la couche d'oxyde. Les dommages se traduisent par une fragilisation du composant, une altération des performances ou le non fonctionnement.

Il est indispensable de prendre toutes les précautions pour éviter l'apparition de charges électrostatiques lors de la manipulation des composants (matériaux antistatiques, mise à la terre des postes de travail et des personnes, ionisation de l'air...).

Ces précautions peuvent être étendues à toutes les technologies car les transistors bipolaires lorsqu'ils sont fortement intégrés (VLSI : very large scale integration) deviennent sensibles à l'électricité statique et l'apparition de composants avec des technologies mélangées (bipolaire - unipolaire) rend le tri difficile.

## 7 FAMILLES TECHNOLOGIQUES

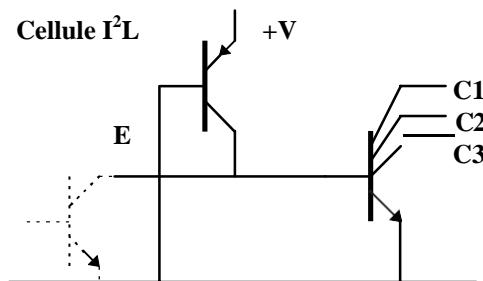
Les progrès réalisés dans la fabrication des composants estompent les avantages et les inconvénients que les technologies bipolaires avaient par rapport aux technologies unipolaires.

### 7.1 Technologies bipolaires

Rapides et robustes (insensibles à l'électricité statique, pas de "latch up") permettent de réaliser des composants analogiques (A.I.L...), les opérateurs logiques TTL et ECL, des microcontrôleurs LSI, des ASIC, des mémoires RAM statiques rapides.

### 7.2 Technologie I<sup>2</sup>L (Integrate Injection Logic)

Logique à injection de courant : Cette technologie bipolaire permet un niveau d'intégration élevé dû à la simplicité de sa fabrication (5 masques), à l'absence d'élément résistif et à la faiblesse de sa consommation. Le temps de propagation par cellule est inférieur à 10ns et le produit du temps de propagation par la puissance consommée est de 1 picojoule. La tension d'alimentation peut être abaissée à 1V. Il n'y a pas de famille d'opérateurs logiques réalisée en I<sup>2</sup>L. Le principal inconvénient est la faiblesse de la sortance (nombre de cellules pouvant être connectées sur une sortie  $\approx 1$ ) d'où la sortie multicollecteur qui réduit le niveau d'intégration. La I<sup>2</sup>L est sensible à l'électricité statique du fait du haut niveau d'intégration.



### 7.3 Technologies unipolaires

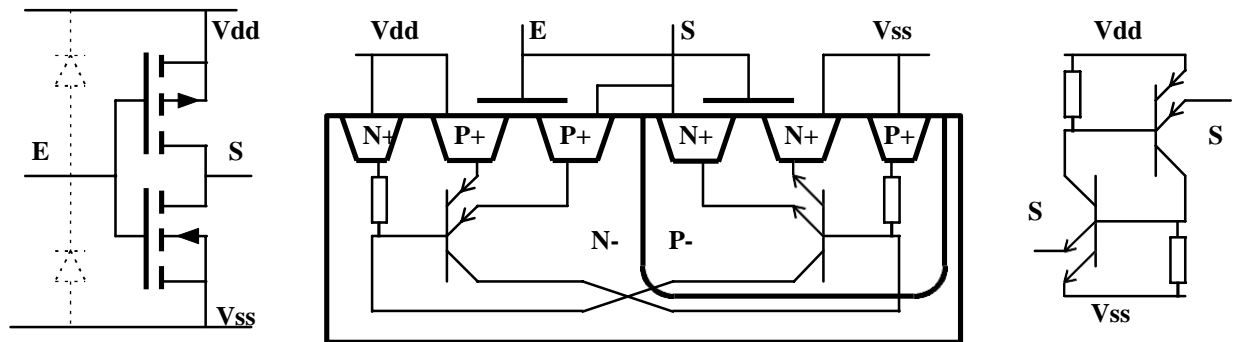
Autorisant des niveaux d'intégration élevés et consommant très peu, elles permettent de réaliser des composants analogiques (interrupteurs analogiques...) les opérateurs logiques CMOS, des microcontrôleurs LSI et VLSI, des ASIC, des mémoires PROM effaçables, des mémoires RAM statiques et dynamiques.

Certains composants sont réalisés en PMOS c'est à dire uniquement avec des transistors MOS canal P, d'autres en NMOS (transistors canal N), mais c'est la technologie CMOS (Complementary MOS) qui est la plus représentative.

La cellule de base CMOS est constituée d'un transistor canal N et d'un transistor canal P. Elle ne demande à la cellule précédente qu'un courant de fuite très faible. Il n'y a consommation que lorsque aucun des 2 transistors n'est bloqué. Ceci ne se produit, dans un composant logique, que lors d'un changement d'état. La consommation est donc proportionnelle à la fréquence d'utilisation. L'intensité du courant d'alimentation au repos d'un composant CMOS ne permet pas d'évaluer celle nécessaire à son fonctionnement.

'Latch up' (verrouillage): Une structure parasite PNPN, c'est à dire un thyristor, est créée lors de la réalisation de la cellule CMOS. Si la différence de potentiels sur une sortie du composant est forcée au delà de  $V_{dd}+0.5V$  ou en deçà de  $V_{ss}-0.5V$ , ce thyristor parasite peut s'amorcer, alors le composant ne remplit plus aucune fonction et toutes ses broches se trouvent en court-circuit jusqu'à l'arrêt de l'alimentation.

L'augmentation de l'intensité des courants dans le composant peut conduire à la destruction de celui-ci. Le phénomène peut se déclencher de la même façon avec les entrées du composant à cause des diodes de protection. Les technologies récentes (à partir de la HCMOS) ont été améliorées par rapport aux risques de départ en 'latch up', mais certaines fabrications y restent sensibles.



Les diodes de protection empêchent les charges électrostatiques de s'accumuler dans les entrées afin d'éviter le claquage de la couche d'oxyde de silicium, mais du fait de leurs temps de réaction, elles protègent imparfaitement des décharges électrostatiques extérieures.

⑩ Elle ne sont pas implantées pour faire circuler des courants d'intensités importantes, par exemple pour écrêter un signal (cela risquerait aussi de provoquer le départ en 'latch up').

Une diode extérieure est nécessaire pour réaliser un écrêtage.

## 8 FAMILLES D'OPERATEURS LOGIQUES

En dehors de la série CMOS 4000 et des séries ECL, la désignation des opérateurs logiques commence par (ou du moins comporte) 54xxXX pour la gamme de température militaire: -55 à +125°C ou 74xxXX pour la gamme civile à 0 à +70°C .

## 8.1 Bipolaires TTL

(Transistor Transistor Logic par opposition à une ancienne famille DTL Diodes Transistor Logic): A partir de la série normale (parfois repérée 'N'), il a été développée plusieurs séries visant à améliorer certains paramètres.

- Série "Low power" (L) : la consommation a été réduite en augmentant les valeurs de résistances des composants résistifs intégrés.
- Série "High speed" (H) : la vitesse a été augmentée en diminuant les valeurs de résistances.
- Série "Schottky" (S) : la vitesse a été améliorée en plaçant des diodes schottky entre la base et le collecteur de certains transistors afin d'en faciliter la dé-saturation.
- Série "Low power Schottky" (LS) : la consommation a été réduite (mais aussi la vitesse) par rapport à la 'S' en augmentant les valeurs de résistances.
- Série "Advanced Schottky" (AS ou FAST) : Optimisation de la 'S'.
- Série "Advanced Low power Schottky" (ALS) : Optimisation de la 'LS'.

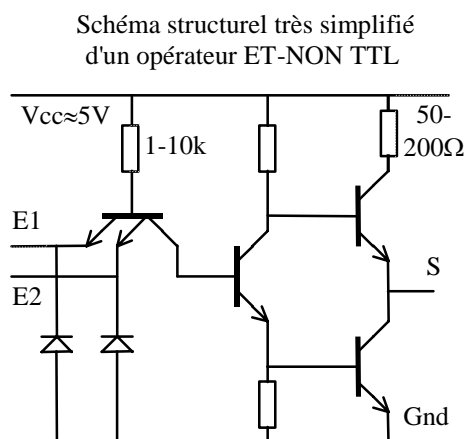
La série 'H' a disparue dès l'arrivée des technologies schottky.

La 'ALS' n'est pas très utilisée à cause des progrès des technologies CMOS.

La 'AS' demeure la famille d'opérateurs la plus rapide (après l'ECL III).

La 'LS' reste très utilisée car peu onéreuse.

Le schéma structurel permet de justifier facilement les valeurs des paramètres statiques tels que les intensités des courants d'entrées, les niveaux des tensions en entrée et en sortie. Le transistor multi-émetteurs fonctionne comme les 3 diodes correspondant à ses jonctions. La structure de l'étage de sortie a été baptisé "Totem pole" à cause de l'empilement des couches dopées différemment qui réalisent les transistors.



## 8.2 Bipolaires ECL (Emitter Coupled Logic)

La rapidité de ces familles est due au fait que les transistors fonctionnent en régime linéaire. Elles ont pour inconvénients de fonctionner avec une alimentation négative  $V_{ss} = -5.2V$ , et d'avoir des performances sensibles à la température.

## 8.3 Unipolaires CMOS

- Séries 4000 : La série 4000 B (Buffered) perdure car elle permet des tensions d'alimentation allant de 5 à 15V.
- Séries 54/74Cxx (C) : Cette famille a des performances équivalentes à la série 4000 mais offre l'intérêt (faible) d'avoir des désignations en correspondance avec les familles TTL. Elle a dû disparaître avec l'arrivée de la 'HCMOS'
- Série "High speed Cmos" (HC) : L'optimisation et la réduction de la taille de la gravure et l'utilisation de deux couches de métallisation ont permis d'améliorer la vitesse des composants CMOS dans des proportions importantes et de durcir les composants par rapport aux risques de 'latch up'. Tensions d'alimentation de 2 à 6V.
- Séries 'HCT' : Comme la 'HC' mais avec des niveaux d'entrées et de tension d'alimentation (4.5 à 5.5V) compatibles avec les séries TTL.
- Séries "Advanced Cmos" (AC ou ACL ou FACT) : Il s'agit d'une nouvelle optimisation de la CMOS : le procédé EPIC (Edvanced Performance Implant Cmos). L'intensité admissible du courant en sortie atteint 24mA.
- Séries 'ACT' : Comme la 'AC' mais avec des niveaux d'entrées et de tension d'alimentation compatibles avec les séries TTL.

## 8.4 Tableau comparatif

	Temps de propagation max. (ns)	Temps de propagation typ. (ns)	Puissance consommée max. (mW)	I min. pour latch up (mA)
LS	15	10	24	
S		3	60	
ALS	13	5	16	
AS	4	1.7	95	
FAST	5	3	51	
4000	250	100	0.001	0.001
HC	16	9	0.01	400
HCT	16	9	0.01	400
AC		3	0.01	650
MECL III		1	60	

Ce tableau convient à un opérateur logique simple. I min pour 'latch up' est l'intensité minimale du courant qui doit être forcé pour risquer un départ en 'latch up'.