

## SOMMAIRE

- A4.1 Théorie des atomes
- A4.2 Semi-conducteur pur
- A4.3 Dopage d'un semi-conducteur
- A4.4 Effet diode, la jonction P - N
- A4.5 Mécanisme de conduction d'une diode
  - A4.5.1 Le plus à la zone P
  - A4.5.2 Le plus à la zone N
- A4.6 Effet Zener, une jonction fortement dopée
- A4.7 Effet transistor, du microscope à l'ohmmètre
- A4.8 Effet transistor, du microscope à l'ampèremètre
- A4.9 Effet transistor, du microscope à l'effet transistor
- A4.10 Effet de champ
- A4.11 Bibliographie  
(Les renvois entre crochets [\*] y font référence)

### A4.1 Théorie des atomes

Pour comprendre quelque peu le fonctionnement des composants électroniques réalisés à l'aide des matériaux ou alliages semi-conducteurs, il nous faut avoir en tête la théorie des atomes. L'explication actuelle que nous donne les physiciens sur la matière met en jeu la composition de celle-ci.

La matière serait composée d'atomes d'un diamètre d'environ  $1 \cdot 10^{-10}$  à  $1 \cdot 10^{-12}$  mètre de diamètre, distincts entre eux par leur nombre de particules dont ils sont eux-mêmes composés. Ces atomes sont classés précisément par l'évolution du nombre de ces particules, le premier atome n'en contenant que deux jusqu'aux derniers qui en contiennent plus de cent. C'est le tableau périodique des éléments créé par Dmitri Mendeleïev (1834 - 1907).

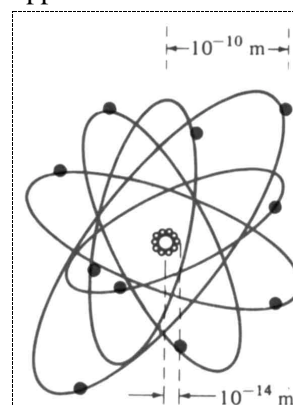
Il est admis que les particules qui composent l'atome sont organisées avec un noyau, dont le diamètre est d'environ  $1 \cdot 10^{-14}$  mètre, qui contient des protons et des neutrons accompagné autour d'un nuage de petits électrons qui gravitent au loin, à des distances bien définies appelées couches électroniques. Chaque proton ou neutron, appelés tous deux nucléons, est d'un diamètre et d'une masse environ 2000x supérieure à un électron.

Les forces qui interagissent entre toutes ces particules ainsi que celles qui interviennent entre les différents atomes d'un objet vont fortement influencer le comportement d'un matériau en fonction des contraintes qu'il subit.

En ce qui concerne l'électricité et ces effets, ce sont essentiellement les électrons qui gravitent sur la dernière couche électronique qui sont impliqués.

La nature à fabriqué des atomes ne possédant jamais plus de 8 électrons périphériques (pour un état stable). Le tableau périodique des éléments nous le confirme.

La représentation la plus usuelle d'un atome est celle proposée par le physicien Niels Bohr (1885-1962) qui est une représentation très pratique pour un électronicien qui va encore le simplifier.



**Figure 5.21.** Modèle simple d'un atome. Sous l'influence de forces électriques, les électrons chargés négativement sont en orbite autour d'un noyau de petite taille mais de masse importante. Le noyau, qui n'est pas représenté à l'échelle, comprend deux types de nucléons: des protons chargés positivement et des neutrons sans charge.

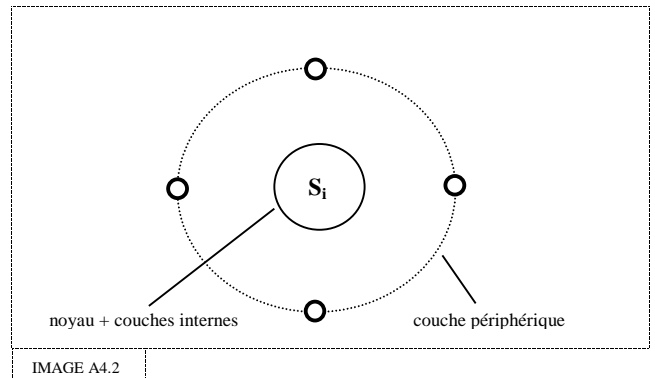
IMAGE A4.1, J.KANE, *PHYSIQUE*, 1994, INTEREDITIONS, PARIS

## A4.2 Semi-conducteur pur

Il est facile de simplifier au maximum la représentation de Niels Bohr en ne laissant apparaître que le noyau avec les couches électronique interne et la dernière couche électronique, appelée couche périphérique ou couche de valence.

Un matériaux semi-conducteur à la particularité de posséder 4 électrons périphériques, soit exactement la moitié d'une couche complètement saturée.

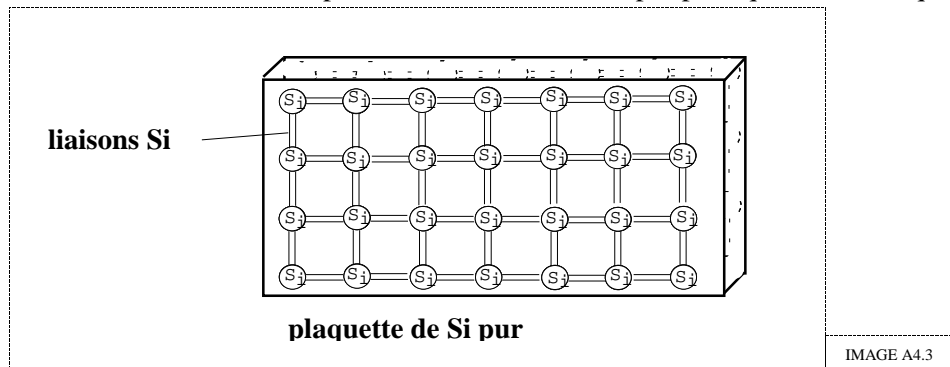
Cette particularité va lui donner un comportement particulier en ce qui concerne les phénomènes électriques, entre autres.



Le matériaux semi-conducteur actuellement le plus utilisé est le **SILICIUM**.

Toutefois, pour utiliser du silicium en électronique, il faut obtenir des plaquettes d'une pureté extraordinaire. La pureté est de l'ordre de un atome impur pour un million d'atomes de silicium. Le tout reste totalement stable si la température est très basse.

Pour illustrer non seulement un seul atome de silicium mais une plaquette entière, nous simplifions la représentation en ne faisant apparaître que les noyaux avec les couches atomiques intérieures par les cercles comme ci-dessus et avec des traits doubles pour illustrer les électrons périphériques entre chaque atomes.



De plus, les atomes du silicium purifié s'organisent entre eux de manière très régulière, suite aux traitements subis, ce qui nous amène à parler d'un cristal semi-conducteur, ou d'une structure cristalline du silicium. Cette organisation atomique donne des propriétés électriques particulières au silicium électronique.

Grâce à l'organisation cristalline, chaque atome est entouré de quatre atomes voisins qui vont combiner ensemble leurs électrons de valence de fait que chaque atome se trouve entourer de huit électrons périphériques. Ce qui donne la propriété d'un isolant parfait:

**A TRES BASSE TEMPERATURE, AU VOISINAGE DU ZERO ABSOLU (0 KELVIN) LE SILICIUM PUR EST UN ISOLANT PARFAIT.**

Dès que la température augmente, l'agitation des atomes entre eux va va bousculer cet ordre établi et des électrons périphériques peuvent se retrouver arrachés à la liaison cristalline des atomes. Ces électrons se retrouvent à une distance des noyaux qui leur permet de se déplacer dans la plaquette de silicium.

Les électrons ainsi libérés ont chacun rompu une liaison cristalline du silicium. Ils ont donc laissé derrière eux un emplacement vide, nous parlons d'un "trou".

Ces électrons vont se déplacer librement dans la plaquette jusqu'au moment où ils rencontre un "trou" et se fixer à nouveau dans le réseau.

Ce déplacement aléatoire d'électrons (dans n'importe quel sens) correspond à un courant électrique aléatoire qui représente ce que nous appelons du souffle électronique.

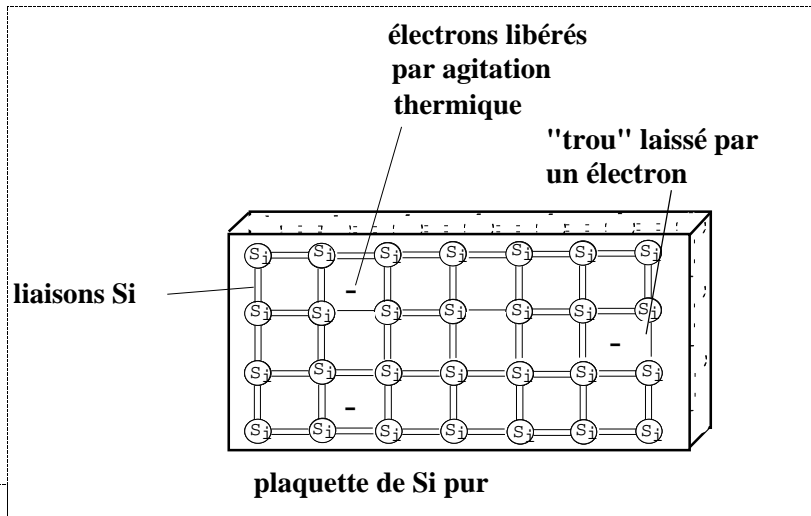


IMAGE A4.4

Toutefois, ce courant est très, très faible et nous parlons de conduction intrinsèque. Cette conduction intrinsèque est pratiquement non mesurable pour un technicien de maintenance. Ces courants, souvent indésirables, sont de l'ordre du nanoampère et appelés courants de fuites.

Même non mesurable, ces courants de fuites existent néanmoins et deviennent trop important si la température n'est pas contrôlée.

UN SEMI-CONDUCTEUR EST DONC TRES SENSIBLE A LA TEMPERATURE ET NECESSITERA DES MOYENS EXTERNES DE STABILISATION. SANS QUOI UN EMBALLEMENT THERMIQUE ENTRAÎNE TRES VITE LA DESTRUCTION DU SEMI-CONDUCTEUR.

### A4.3 Dopage d'un semi-conducteur

Afin d'améliorer la conduction d'un semi-conducteur, les fabricants injectent dans une plaquette semi-conductrice des matériaux étrangers, ou impuretés, qui possèdent un nombre d'électrons périphériques juste inférieur ou juste supérieur aux 4 électrons du semi-conducteur.

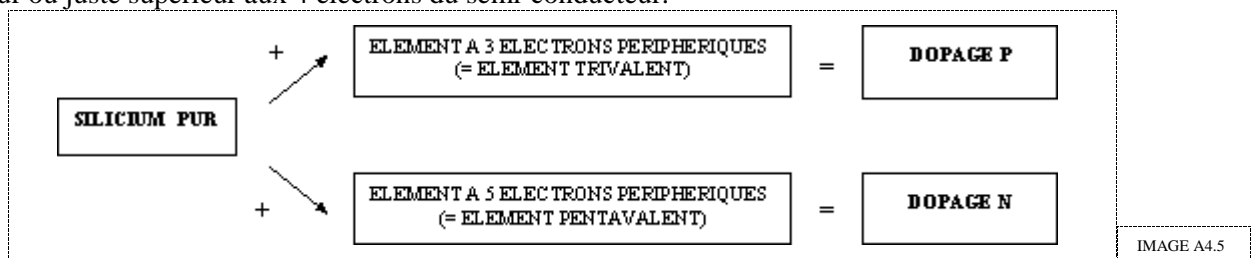


IMAGE A4.5

Le dopage N consiste à ajouter au semi-conducteur des atomes possédants 5 électrons périphériques. Quatre de ces électrons vont participer à la structure cristalline, et un électron supplémentaire va se retrouver libre et pouvoir se déplacer dans le cristal. Nous parlons de porteurs de charges mobiles.

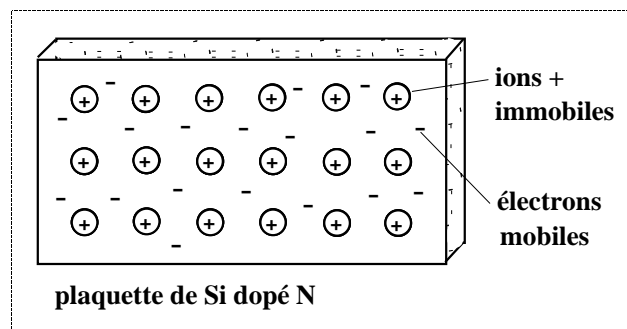


IMAGE A4.6

Les ions + sont fixes car ils font partie de la structure atomique cristalline de la plaquette de silicium.

Rappelons que les ions comprennent le noyau des atomes et qu'ils sont gros, lourds et solides par rapports aux porteurs de charges mobiles. Un électron est environ 2000x plus petit qu'un seul proton.

Le dopage P consiste à ajouter au semi-conducteur des atomes possédants 3 électrons périphériques. Ces trois électrons participent à la structure cristalline, mais un "trou" est créé par chaque atome étranger puisqu'il lui manque un électron périphérique.

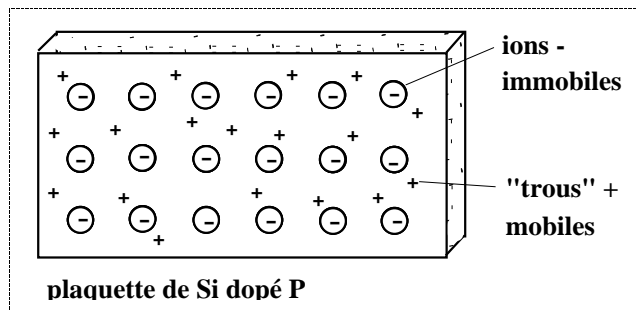


IMAGE A4.7

Les "porteurs de charges électriques" mobiles sont responsables de la conduction d'une plaquette de silicium dopée.

Si la proportion de dopage est de l'ordre de dix atomes de dopant P pour 100 atomes de silicium, la conductibilité du semi-conducteur est améliorée dans la même proportion, soit de 10%.

Il est donc possible de "régler" la conduction d'un semi-conducteur en choisissant la quantité de dopage. A l'intérieur d'un circuit intégré, il est aisé d'imaginer des zones plus ou moins dopées de manière à obtenir des résistances électriques.

#### A4.4 Effet diode, la jonction P - N

Il est aisé de s'imaginer ce qui se passe lorsque deux zones de dopage P et N sont réalisées sur une même plaquette. A la jonction (réunion) des deux zones, les porteurs de charges mobiles se combinent et il apparaît une zone d'espace vide de porteurs de charges mobiles, donc une zone isolante.

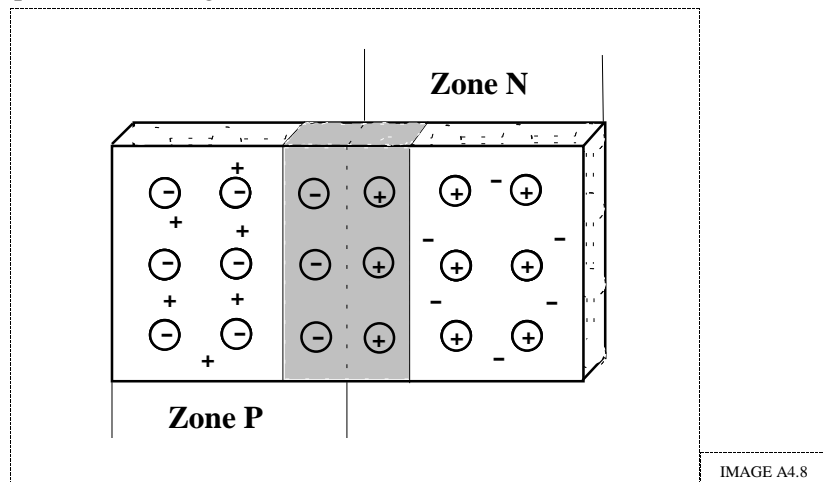


IMAGE A4.8

En observant attentivement la polarité résultante des charges électriques de la zone isolante, on s'aperçoit qu'elle est inverse à la polarité de la région de dopage: charge positive dans la zone N et charge négative dans la zone P.

Cela signifie qu'une jonction PN non alimentée est à l'image d'un condensateur, à savoir deux zones conductrices séparées par une zone isolante.

Le symbole de la diode représente directement ces deux zones:

L'anode représente la zone P

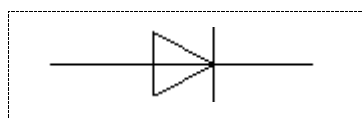


IMAGE A4.9

La cathode représente la zone N

## A4.5 Mécanisme de conduction d'une diode

Lorsque l'on alimente une diode, donc une jonction PN, l'effet change selon la polarité de la tension appliquée. Une diode ne laisse passer le courant que dans un seul sens.

Essayons de comprendre ce phénomène particulier :

### A4.5.1 Le PLUS à la zone P

Si l'alimentation ( $U_g$ ) est supérieure à 0,6 - 0,7 volts, les porteurs de charges mobiles ont suffisamment d'énergie pour "traverser" la zone isolante.

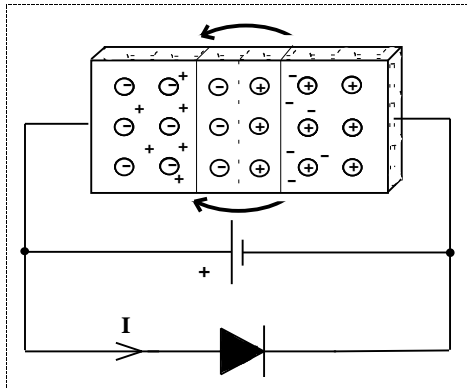
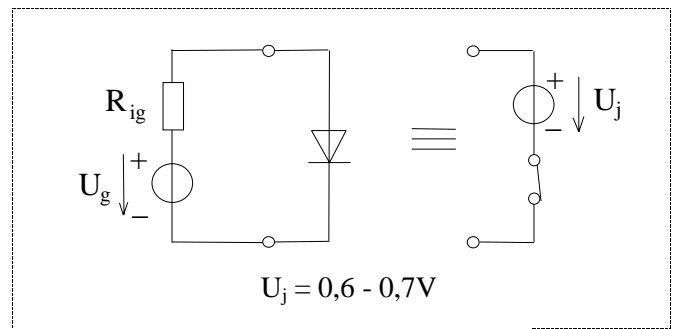


IMAGE A4.10



$$U_j = 0,6 - 0,7V$$

IMAGE A4.11

Nous constatons la circulation du courant électrique. La jonction est conductrice en présentant une différence de potentiel de 0,6 - 0,7 volts à ses bornes.

La diode conduit et nous pouvons idéaliser ce fonctionnement en remplaçant la diode par un générateur DC et un interrupteur fermé.

Nous parlons de: polarisation dans le sens passant, ou sens direct; courant direct; en anglais "forward".

### A4.5.2 Le PLUS à la zone N

Les porteurs de charges mobiles sont attirés vers les connexions extérieures par la présence des charges électriques de l'alimentation.

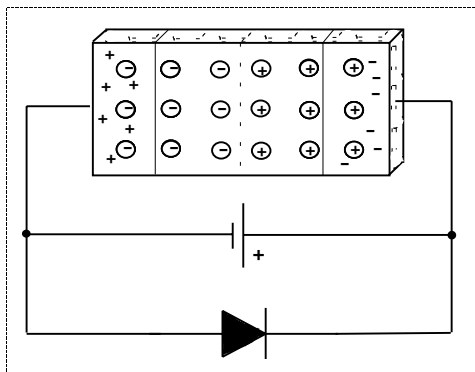
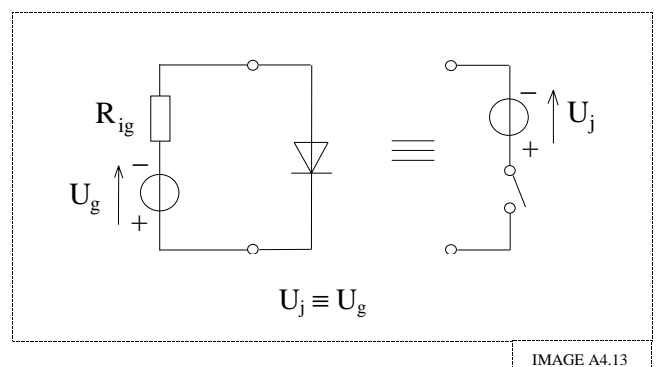


IMAGE A4.12



$$U_j \equiv U_g$$

IMAGE A4.13

Nous constatons l'élargissement de la zone vide de porteurs de charges. La jonction reste isolante.

La diode est bloquée et nous pouvons représenter cet état par un interrupteur ouvert.

Nous parlons ici de: polarisation dans le sens bloquant, ou dans le sens inverse; en anglais "reverse"

### A4.6 Effet Zener, une jonction fortement dopée

Nous savons qu'une jonction P-N ne laisse passer le courant que dans un seul sens, en polarisation directe. Par contre, en polarisation inverse, il ne circule pratiquement aucun courant tant que la tension inverse ne dépasse pas une valeur limite, limite appelée tension de claquage  $U_{INV MAX}$ .

La tension inverse donne naissance à un champ électrique à l'intérieur de la plaquette de silicium, et plus précisément dans la zone isolante de la jonction.

La quantité faible des éléments de dopage fait que la jonction PN d'une diode conventionnelle supporte des champs électriques intenses correspondant à des tensions inverses allant de plusieurs centaines de volts à plusieurs milliers de volts.

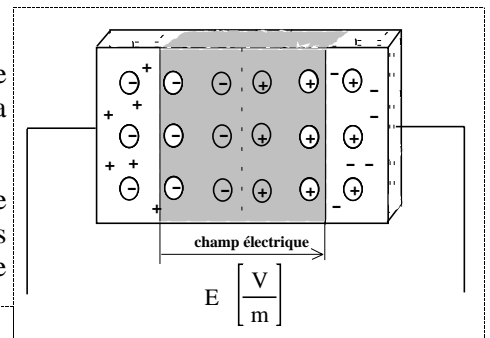


IMAGE A4.14

Si cette tension  $U_{INV MAX}$  est dépassée, l'emballement thermique détruit la diode dans la plupart des cas. C'est ce qui est appelé la zone de claquage.

Par contre, les diodes Zener ont été spécialement conçues et fabriquées de manière à pouvoir être utilisées en polarisation inverse, dans la zone de claquage, notamment en modifiant les dimensions de la jonction et surtout la quantité de dopage des zones P et N.

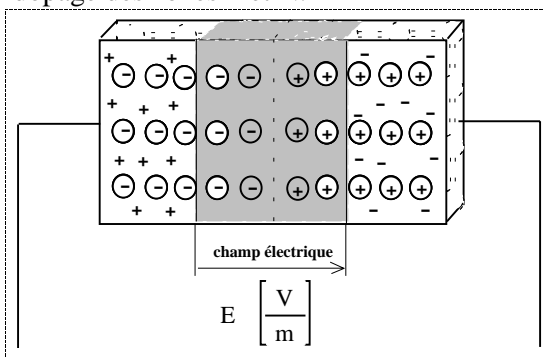


IMAGE A4.15

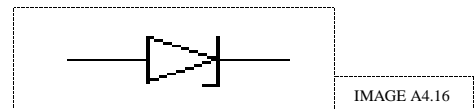


IMAGE A4.16

Plus fortement dopée que les diodes conventionnelles, un champ électrique relativement faible devient déjà suffisamment intense pour que les liaisons de covalence s'affaiblissent et se rompent.

Les porteurs de charges (des éléments de dopage) ainsi libérés sont assez nombreux pour que le courant augmente brutalement et pour que la tension aux bornes de la diode ne varie pratiquement plus. C'est ce qui est appelé l'effet Zener.

Pour d'autres diodes Zener, il est possible que sous l'action du champ électrique interne, les porteurs de charges minoritaires (du silicium) de la zone isolante acquièrent une énergie telle qu'il puisse y avoir ionisation par choc, et, par effet d'avalanche, le courant croît extrêmement vite et la tension aux bornes de la diode ne varie pratiquement plus. C'est ce qui est appelé effet d'avalanche.

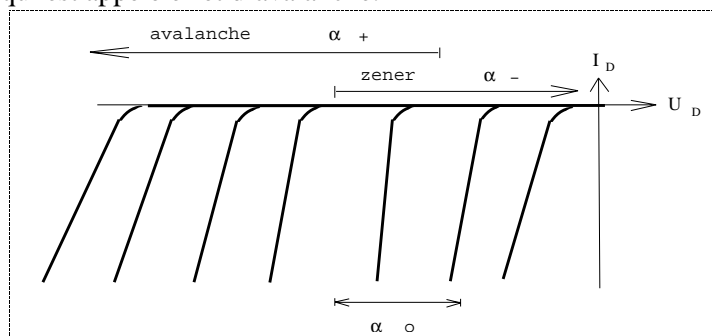


IMAGE A4.17

En pratique, pour les diodes dont la tension zener dépasse 10V, seul l'effet d'avalanche est possible. Ce qui à pour conséquence que la caractéristique de la diode est moins franche (la pente est plus grande), et le coefficient de température est positif.

Les diodes dont la tension Zener est inférieure à 5V ont une jonction très mince et seul l'effet Zener peut avoir lieu, ce qui entraîne que la caractéristique de la diode est très raide et, de plus, ces diodes ont un coefficient de température négatif.

Entre 5V et 10V, les deux effets peuvent se combiner, et la caractéristique est la plus raide ainsi que le coefficient de température qui peut être proche de zéro. Ce qui signifie que les diodes Zener prévues pour un fonctionnement inverse compris entre 5V et 10V seront utilisées pour un fonctionnement très stable.

### A4.7 Effet transistor, du microscope à l'ohmmètre

Avant 1950, tout équipement électronique comportait des tubes à vide. Ces "lampes" lumineuses, dont le filament à lui seul consommait déjà quelques watts, nécessitaient une alimentation volumineuse et un dispositif de circulation d'air afin de dissiper la chaleur émise.

Effectuant des recherches depuis 1948 aux Bells Telephone Laboratories, trois chercheurs mirent au point, vers 1951, un dispositif à semi-conducteur à deux jonctions appelé transistor (de l'expression anglaise TRANSfer resISTOR). Ces trois physiciens et techniciens américains, JOHN BARDEEN, WALTER BRATTAIN et WILLIAM SCHOCKLEY obtinrent d'ailleurs le prix Nobel de physique en 1956 pour leur invention.

L'impact de cette découverte sur l'électronique fut considérable et donna naissance à toute une industrie ainsi qu'au développement de composants électroniques allant jusqu'au microprocesseur actuel présent dans tout micro-ordinateur.

Un transistor est réalisé à partir d'une plaquette semi-conductrice, germanium ou silicium, dans laquelle trois zones de dopage P ou N, telles que nous l'avons déjà décrit pour les diodes, sont créées, ce qui représente la réalisation de deux jonctions P-N.

Il est donc possible d'obtenir des transistors PNP ou NPN qui sont complémentaires. Les courants et les tensions d'un transistor PNP sont opposés aux courants et tensions d'un transistor NPN, mais le principe de fonctionnement est exactement le même pour les deux types.

Vu à l'aide d'un microscope, l'intérieur d'un transistor peut se visualiser (en simplifié, bien sûr) selon le dessin ci-dessous.

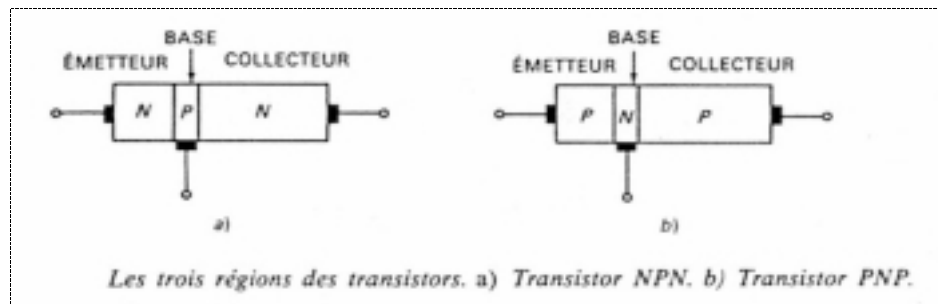


IMAGE A4.18 [2]

Il est utile de savoir que la zone d'émetteur est fortement dopée, la zone de base est très étroite (de l'ordre du  $\mu\text{m}$ ) et faiblement dopée, alors que la zone collecteur, dopée moyennement, est par contre la plus large des trois zones et dissipe le plus de chaleur.

Le transistor ressemble donc à deux diodes, l'une pouvant être appelée diode collecteur pour la jonction base-collecteur, et l'autre diode émetteur pour la jonction base-émetteur. Le transistor peut se comparer au schéma de deux diodes dont soit les anodes (cas du NPN) ou les cathodes (cas du PNP) sont reliées et symbolisent la base.

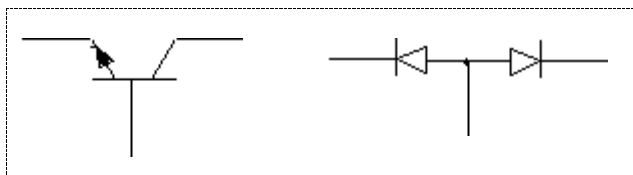


IMAGE A4.19

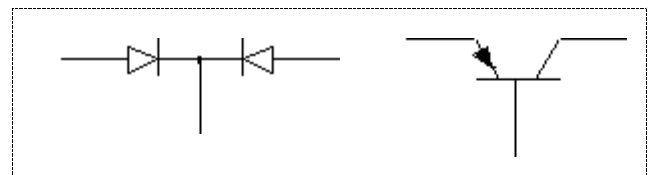


IMAGE A4.20

Ce schéma équivalent des deux diodes représente bien ce que nous pouvons mesurer à l'aide d'un ohmmètre, mais la comparaison s'arrête là car pour que l'effet transistor existe, il faut bien que la base soit très mince et faiblement dopée, le tout sur la même plaquette semi-conductrice.

### A4.8 Effet transistor, du microscope à l'ampèremètre

Si nous alimentons le transistor de telle manière à polariser les diodes collecteur et émetteur dans le sens direct, nous constatons un grand courant du aux porteurs de charges majoritaires amenés par les atomes du dopage.

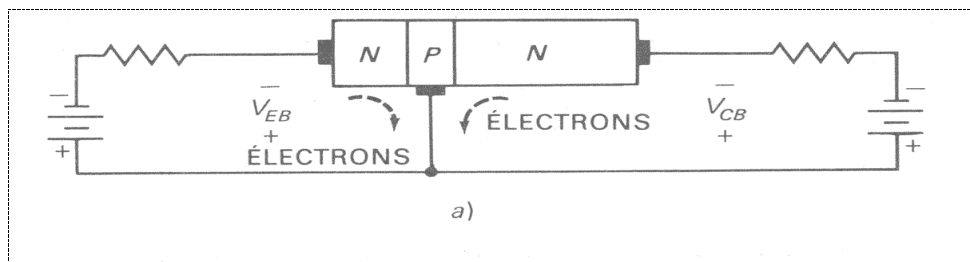


IMAGE A4.21 [2]

Si au contraire nous alimentons le transistor de manière à polariser les diodes collecteur et émetteur dans le sens inverse, nous constaterons un très faible courant, dû aux porteurs de charges minoritaires amenés par l'agitation thermique. Ce courant est souvent négligeable, mais il existe néanmoins.

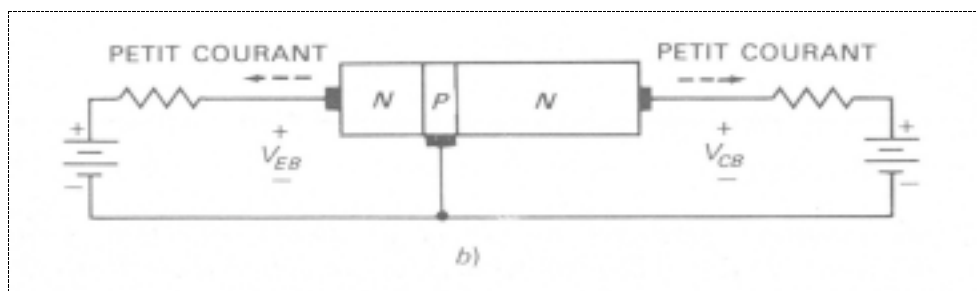


IMAGE A4.22 [2]

Chacun des courants ci-dessus est dépendant de la température et augmente avec celle-ci. En effet, la résistivité des semi-conducteurs diminue avec l'augmentation de la température (le coefficient  $\alpha$  est négatif). Cette dépendance physique sera lourde de conséquence lorsqu'il faudra obtenir des montages électroniques stables quelque soit la température de fonctionnement.

### A4.9 Effet transistor, du microscope à l'effet transistor

Rien d'inhabituel ne s'est produit lors de la polarisation directe ou inverse des deux jonctions. Ce que nous pouvons appeler l'effet transistor se produit lorsque le transistor est alimenté de manière à polariser la diode émetteur dans le sens direct et la diode collecteur dans le sens inverse:

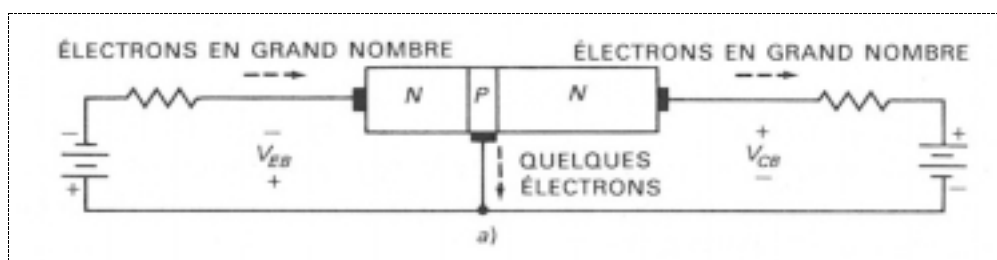


IMAGE A4.23 [2]

Nous pouvons nous attendre à un courant d'émetteur provenant de la base, puisque la jonction base-émetteur est polarisée dans le sens direct, et à aucun courant de collecteur, car la jonction base-collecteur est polarisée en inverse. Mais ce serait oublier que la base est très mince et faiblement dopée.



L'effet transistor peut se résumer (et se simplifier) de la manière suivante: Les électrons venant de l'émetteur (cas du NPN) arrivent dans la région de la base. Deux trajets sont offerts, l'un vers la zone de la base, et l'autre à travers la jonction collecteur et ensuite dans la région du collecteur.

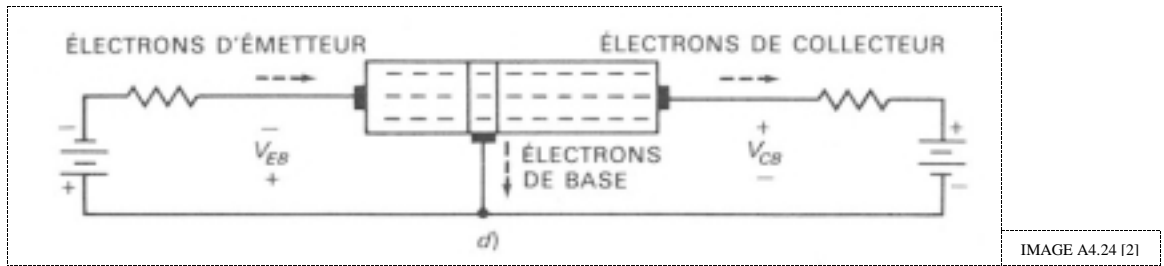


IMAGE A4.24 [2]

La base étant très mince et remplie d'électrons provenant de l'alimentation de l'émetteur, ceux-ci provoquent un champ électrique sur la jonction collecteur, renforcé par la polarisation inverse de l'alimentation de collecteur, qui entraîne une conduction par effet d'avalanche, à l'image d'une diode Zener.

En fait, dans la plupart des transistors, plus du 95% des électrons vont dans la région du collecteur, et moins de 5% des électrons vont dans la région de la base et passent au conducteur externe de la base.

L'effet transistor n'existe donc que si la diode émetteur est polarisée dans le sens direct et la diode collecteur dans le sens inverse. Si ces conditions sont remplies, nous constatons deux évènements essentiels pour l'utilisation du transistor, à savoir :

- 1 - Le courant de collecteur est à peu près égal au courant d'émetteur. ( $I_E = I_C$  à 5% près)
- 2 - Le courant de collecteur n'est existant que si la jonction base-émetteur est polarisée dans le sens direct ( $U_{BE} = 0,6V$ ) ce qui implique un courant de base  $I_B$ .

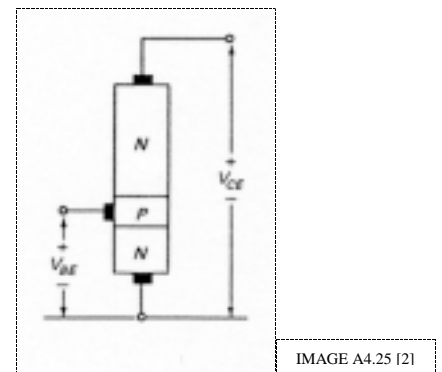


IMAGE A4.25 [2]

En résumé, pour que l'effet transistor existe, il faut : - que la diode collecteur soit polarisée en inverse - que la diode émetteur soit polarisée dans le sens direct

et dans ce cas le transistor devient une source de courant commandée :

Le faible courant de base commande un fort courant d'émetteur ( et donc de collecteur )

Le transistor peut se représenter à l'aide d'un schéma équivalent composé d'une source de courant (commandée) et d'une diode.

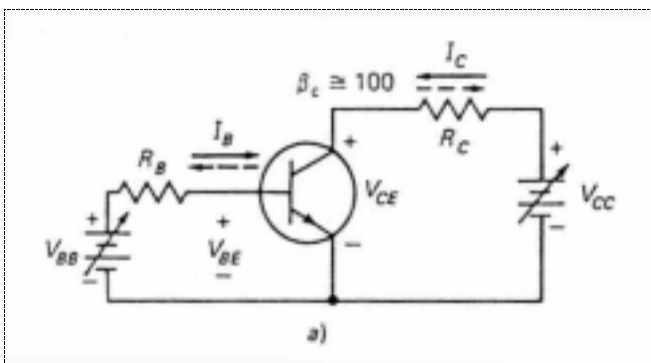


IMAGE A4.26 [2]

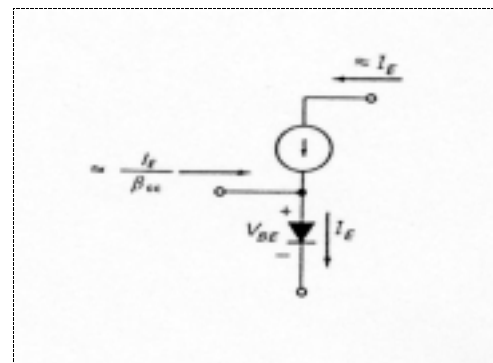
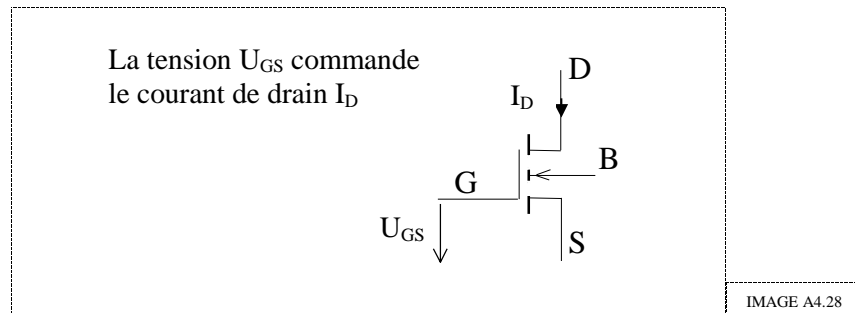


IMAGE A4.27 [2]

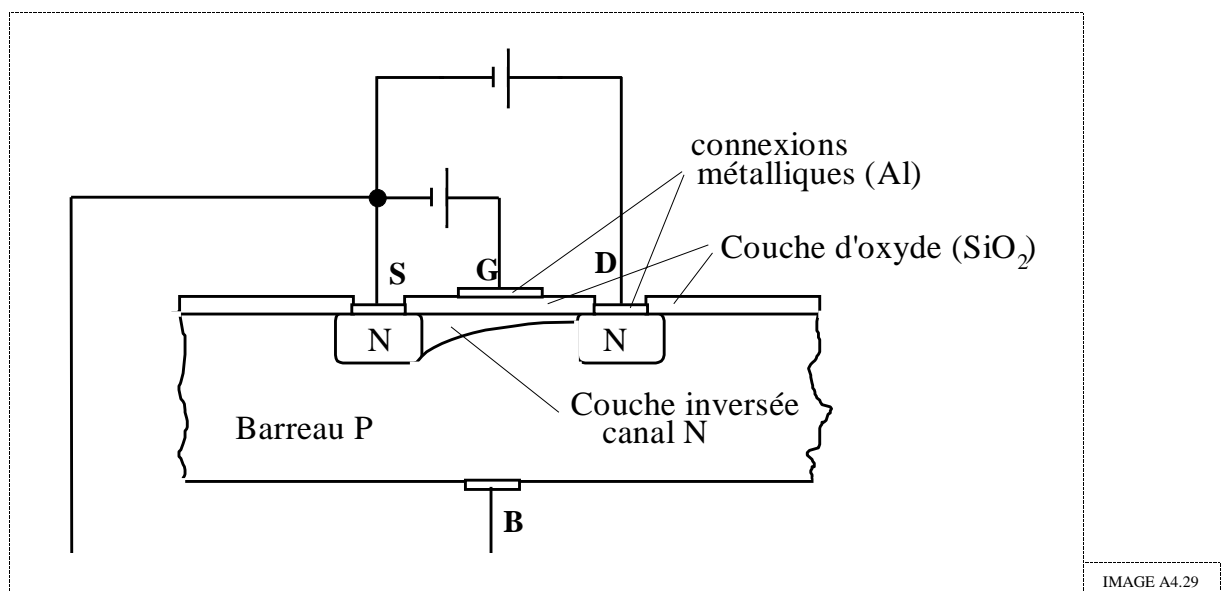
### A4.10 Effet de champ

Au paragraphe 4.6 sur l'effet Zener, nous avons remarqué que les porteurs de charges mobiles de l'élément de dopage pouvaient se déplacer sous l'influence d'un champ électrique. Par exemple, une jonction PN se vide lors d'une polarisation inverse, ce qui amène l'existence d'un champ à l'intérieur même de la jonction.

Ce phénomène est utilisé par les transistors à effet de champ que nous pouvons résumer de la manière suivante, un canal conducteur (P ou N) est rendu plus ou moins conducteur grâce à une tension de commande qui le vide tout ou en partie de ses porteurs de charges mobiles.



Sur un barreau de silicium P, deux zones N sont diffusées pour former le drain et la source. Le barreau P forme également un condensateur avec la grille dont le diélectrique est la couche d'oxyde.



Lorsque la grille est rendue positive par rapport à la source, les électrons du barreau sont attirés dans la zone située entre le drain et la source. Par cet artifice, un canal de type N est créé entre la source et le drain. Si une tension est appliquée entre le drain et la source, un courant de drain  $I_D$  circulera.

En variant la tension de commande  $U_{GS}$ , la densité des électrons dans le canal change. Ce qui signifie que le courant de drain varie ou que la résistance de passage du drain est modifiée, ce qui revient au même.

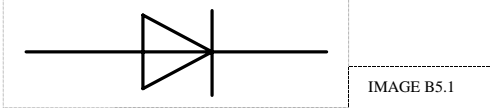
L'avantage de cette commande, dite en tension, est qu'il n'y a aucun courant de grille, donc aucun courant de commande, ce qui diminue d'autant la puissance de commande nécessaire. De plus, comme il n'y a pas d'électrons à déplacer dans la grille, la rapidité de commande est accrue ce qui permet à ces transistors de "travailler" plus haut en fréquence.

En technique audio, ils sont parfois préférés aux transistors bipolaires (PNP ou NPN) car le résultat de cette commande en tension est d'obtenir un son plus "chaud", à l'image des tubes électroniques sous vide.

## SOMMAIRE

- B5.1 Première approche**
- B5.2 De la jonction PN à la diode**
- B5.3 Caractéristique d'une diode**
- B5.4 Mécanisme de conduction d'une diode**
- B5.5 Approximation d'une diode**
- B5.6 Principales utilisations**
- B5.7 Bibliographie**

### B5.1 Première approche

Selon la Méthode d'analyse, M. J. Neuenschwander	
<b>SYMBOLE*</b>	<p style="text-align: center;">Anode <span style="margin-left: 150px;">Cathode</span></p> <div style="text-align: center;">  </div>
<b>FONCTION*</b>	La fonction "générique" d'une diode est d'une part, elle laisse passer le courant dans un sens, nous disons qu'elle est conductrice (dans le sens passant ou sens direct) et d'autre part, elle bloque le courant dans l'autre sens. Nous disons alors qu'elle est bloquée (dans le sens bloquant ou inverse).
<b>SPECIFICATIONS* TYPES*</b>	Puissance nominale $P_{NOM}$ . [W], Tension inverse $U_{INV}$ . [V] et Courant direct $I_{DIR}$ . [A].
<b>TECHNOLOGIE</b>	Actuellement pratiquement toutes les diodes sont réalisées à l'aide de silicium. Leur aspect diffère essentiellement en fonction des limites qu'elles peuvent supporter, à savoir le courant direct maximal et la tension inverse maximale.
<b>UTILISATIONS</b>	<u>Petits signaux</u> : Commutations de commandes, petites protections, limitation, démodulation. <u>Grands signaux</u> : Redressements, protections d'électroaimants.
<b>METHODE DE CONTRÔLE*</b>	Ohmiquement, il n'y a généralement aucune disposition particulière. Pour mesurer les valeurs principales de sa caractéristique tension - courant, il faut veiller à limiter les courants maximum admissibles

\* Il n'est peut-être pas inutile de préciser ici qu'un bon praticien a besoin de connaître "par coeur" les indications suivies de l'astérisque \* pour une pratique efficace du dépannage des circuits électroniques..

## B5.2 De la jonction PN à la diode

Une diode est un élément en silicium formé de deux régions de dopage différent, à savoir dopage P et dopage N. La réunion des deux zones de dopage, sur une même plaquette de silicium, s'appelle une jonction PN.

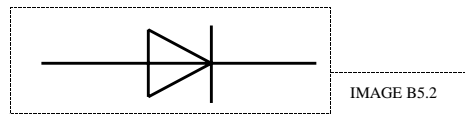


IMAGE B5.2

A la jonction (réunion) des deux zones P et N, les porteurs de charges mobiles se combinent et il apparaît une zone d'espace vide de porteurs de charges mobiles, donc isolante. Les propriétés physiques qui résultent de cet espace donnent naissance aux phénomènes de conduction électrique particulière, comme la conduction dans un seul sens du courant électrique.

Une forte majorité d'éléments électroniques, du transistor aux circuits intégrés, sont composés de jonctions PN.

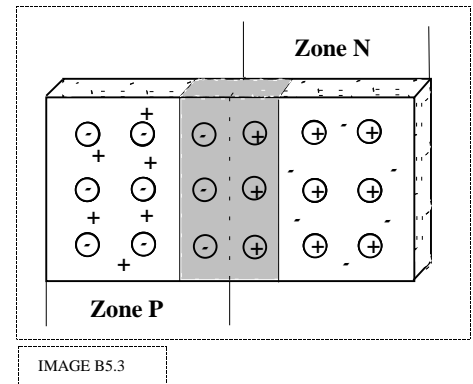


IMAGE B5.3

Pour cette raison qu'il est utile de comprendre le mécanisme physique qui se déroule dans une jonction PN. Une brève introduction aux semi-conducteurs est présentée sur les pages *Introduction à l'électronique / théorie des semiconducteurs* de ce site et donne une explication succincte sur le fonctionnement d'une jonction P-N.

## B5.3 Caractéristique d'une diode

Le comportement d'une diode peut se déduire de sa caractéristique courant - tension :

$$I_D = f(U_D).$$

La courbe obtenue n'étant pas une droite, nous parlons d'un élément non-linéaire. Ce qui signifie que le courant qui circule dans l'élément n'est pas proportionnel à la tension appliquée, donc ne dépend pas uniquement de la loi d'ohm.

Dans le sens direct, la tension de seuil est la tension nécessaire à appliquer à la diode pour qu'elle devienne conductrice.  $U_{SEUIL} \cong 0,6V$  pour le Si (  $0,3V$  pour le Ge).

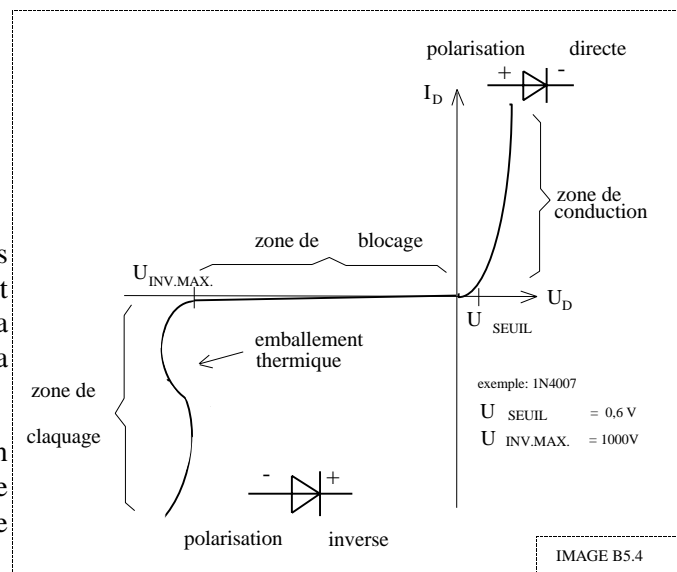


IMAGE B5.4

Au delà de la tension de seuil, le courant ne dépend pratiquement plus que de la résistance totale du circuit. La tension aux bornes de la diode est comprise entre 0,6V et 0,8V.

Le courant inverse est très faible (de l'ordre du nanoampère). Il augmente très fortement au delà d'une certaine tension inverse, appelée tension de claquage. La tension inverse de claquage varie entre 10 et 1000 Volts suivant le type de diode. Dans la plupart des cas, l'emballement thermique entraîné par la tension de claquage détruit la diode.

Les caractéristiques varient considérablement avec la température et les concepteurs de circuits doivent en tenir compte. Nous n'entrerons pas ici dans plus de précisions concernant ces caractéristiques, car pour le dépanneur, de plus amples détails sont fournis dans les livres de correspondances (data-book) auxquels nous pouvons ici qu'encourager la lecture. Par contre, et avant d'analyser les divers circuits d'utilisations des diodes, voici quelques grandeurs que nous pouvons considérer comme importantes et qu'il faut garder en mémoire :

**Courant direct maximum :**  $I_F$   
**Courant direct maximum de crête :**  $I_{FM}$   
**Tension inverse maximum :**  $U_R$   
**Tension inverse maximum de crête :**  $U_{RM}$

### B5.4 Mécanisme de conduction d'une diode

Lorsque l'on alimente une diode, donc une jonction PN, l'effet change selon la polarité de la tension appliquée. Une diode ne laisse passer le courant que dans un seul sens.

Essayons de comprendre ce phénomène particulier :

Le PLUS à la zone P

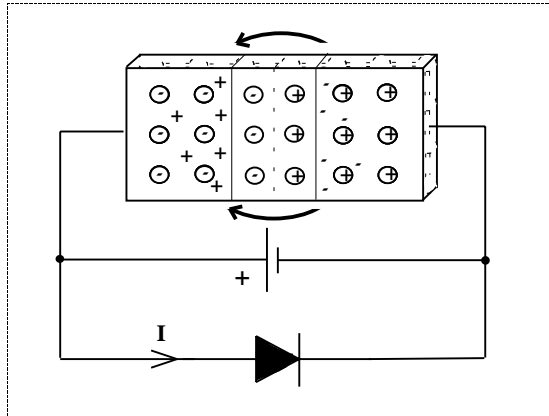


IMAGE B5.5

Si l'alimentation ( $V^+$ ) est supérieure à 0,6 - 0,8 volts, les porteurs de charges mobiles ont suffisamment d'énergie pour "traverser" la zone isolante.

Le PLUS à la zone N

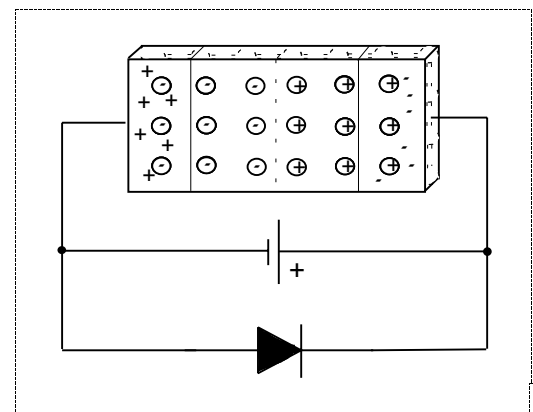


IMAGE B5.6

Les porteurs de charges mobiles sont attirés vers les connexions extérieures par la présence des charges électriques de l'alimentation.

Le PLUS à la zone P

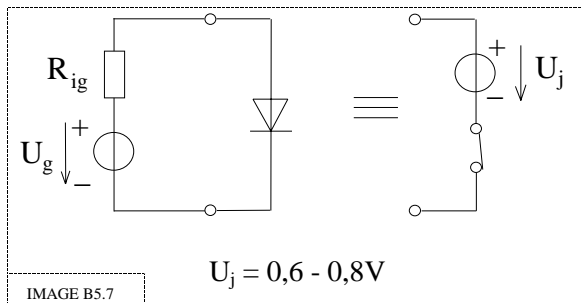


IMAGE B5.7

$$U_j = 0,6 - 0,8V$$

Nous constatons qu'un courant électrique circule. La jonction est conductrice en présentant une différence de potentiel de 0,6 - 0,8 volts à ses bornes.

La diode conduit et nous pouvons idéaliser ce fonctionnement en la remplaçant par un générateur DC (0,6 - 0,8V) et un interrupteur fermé.

Nous parlons de: polarisation dans le sens passant, ou sens direct; courant direct; en anglais "forward".

Le PLUS à la zone N

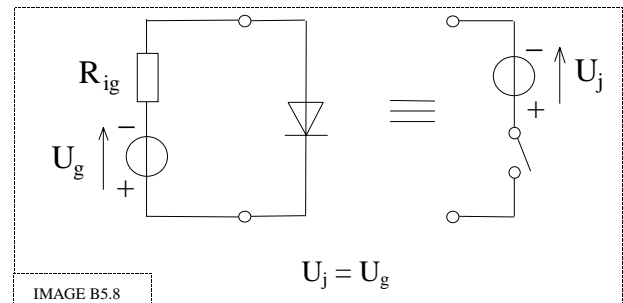


IMAGE B5.8

$$U_j = U_g$$

Nous constatons que la zone vide de porteurs de charges s'élargit. La jonction est isolante.

La diode est bloquée et nous pouvons représenter cet état par un interrupteur ouvert.

Nous parlons ici de: polarisation dans le sens bloquant, ou dans le sens inverse; en anglais "reverse".

## B5.5 Approximation d'une diode

En technique de maintenance ou de dépannage, si nous désirons comprendre le fonctionnement d'un montage comprenant des diodes, il est souvent plus simple de considérer la diode de manière approximative. Pour illustrer ces approximations, nous utilisons une technique dite de schémas équivalents.

Selon le besoin, nous pouvons avoir en tête, l'un ou l'autre des schémas équivalents ci-dessous. Le choix de l'approximation dépend de la valeur des tensions présentes dans le circuit, de l'utilité du circuit à diode (développé dans les pages suivantes) ou encore des courants circulant dans le montage.

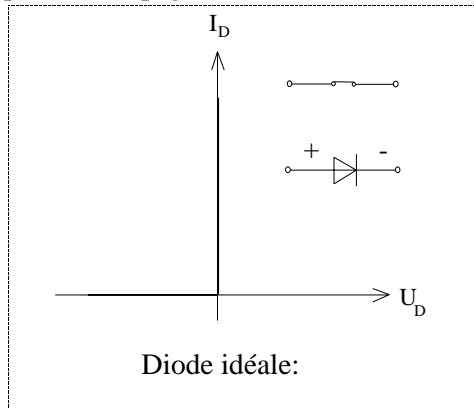


IMAGE B5.9

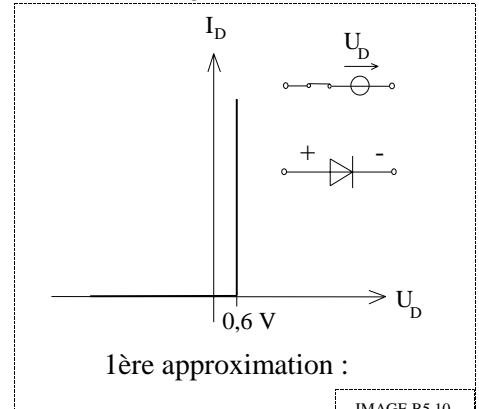


IMAGE B5.10

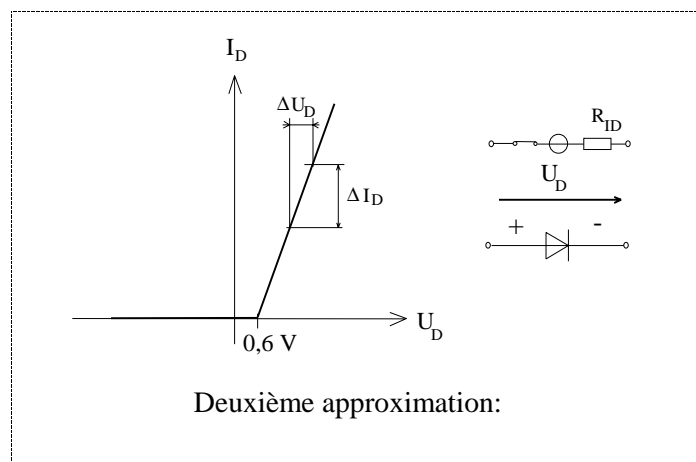


IMAGE B5.11

$$R_{ID} = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D}$$

## B5.6 Principales utilisations

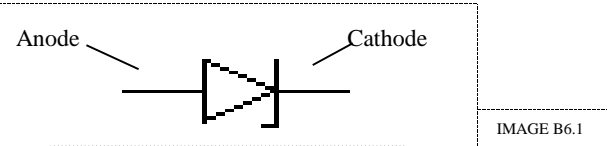
Les diodes sont utilisées principalement dans les circuits selon trois groupes de fonction différents:

- Les circuits de redressement** qui permettent la conversion d'une tension alternative en une tension continue.
- Les circuits d'écrêtage, ou circuits de limitation** qui permettent d'empêcher un signal dépasser une valeur (amplitude) choisie.
- Les circuits de commutation** qui permettent la commande ou le changement de normes, ou encore pour circuits logiques.

## SOMMAIRE

- B6.1 Première approche**
- B6.2 De la diode conventionnelle à la diode Zener**
- B6.3 Caractéristique tension - courant d'une diode Zener**
- B6.4 Valeurs pratiques des tensions Zener**
- B6.5 Principales caractéristiques des diodes Zener**
- B6.6 Principales utilisations**
- B6.7 Bibliographie**

### B6.1 Première approche

Selon la Méthode d'analyse, M. J. Neuschwander	
<b>SYMBOLE*</b>	
<b>FONCTION*</b>	La fonction principale d'une diode Zener est de maintenir une tension constante à ses bornes. Ce sont des diodes stabilisatrices de tension.
<b>SPECIFICATIONS*</b> <b>TYPES*</b>	Puissance nominale $P_{Z\text{NOM}}$ [W], Tension inverse (ou Zener) nominale $U_Z$ [V] et Courant Zener maximal $I_{Z\text{MAX}}$ [A].
<b>TECHNOLOGIE</b>	Toutes les diodes Zener sont réalisées à l'aide de silicium. Les Zener les plus courantes ont une $P_{Z\text{NOM}} = 450\text{mW}$
<b>UTILISATIONS</b>	La grosse majorité des diodes Zener sont utilisées dans des circuits de commande faible consommation. Egalement comme circuit de limitation ou écrêtage.
<b>METHODE DE CONTRÔLE*</b>	Ohmiquement, on mesure uniquement l'état de la jonction PN (ouvert ou court-circuit).  Pour mesurer les valeurs de sa caractéristique tension - courant, il faut veiller à limiter le courant maximal admissible.

Il n'est peut-être pas inutile de préciser ici qu'un bon praticien a besoin de connaître "par coeur" les indications suivies de l'astérisque \* pour une pratique efficace du dépannage des circuits électroniques.

## B6.2 De la diode conventionnelle à la diode Zener

Plus fortement dopée que les diodes conventionnelles, un champ électrique relativement faible devient déjà suffisamment intense pour que les liaisons de covalence s'affaiblissent et se rompent. Les porteurs de charges (des éléments de dopage) ainsi libérés sont assez nombreux pour que le courant augmente brutalement et que la tension aux bornes de la diode ne varie pratiquement plus. C'est ce qui est appelé l'effet Zener.

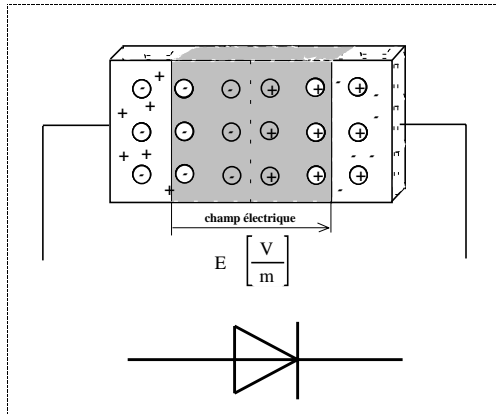


IMAGE B6.2

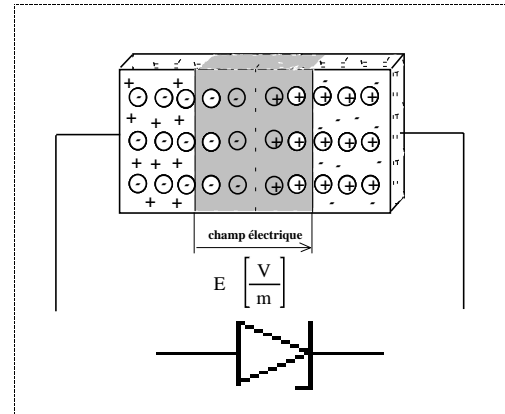


IMAGE B6.3

Pour d'autres diodes Zener, il est possible que sous l'action du champ électrique interne, les porteurs de charges minoritaires (du silicium) de la zone isolante acquièrent une énergie suffisante pour qu'il puisse y avoir ionisation par choc, et, par effet d'avalanche, le courant croît extrêmement vite. La tension aux bornes de la diode ne varie pratiquement plus. C'est ce qui est appelé effet d'avalanche.

IMAGE B6.4

## B6.3 Caractéristique tension - courant d'une diode Zener

La caractéristique tension - courant d'une diode Zener montre ces phénomènes.

$$I_Z = f(U_Z)$$

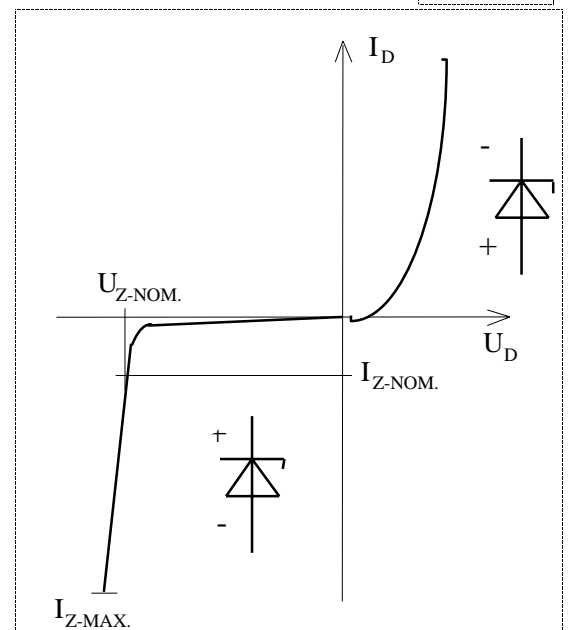
Dans le sens direct :

La diode Zener se comporte comme une diode conventionnelle.

$U_Z \cong 0,6V$  et le courant maximum direct dépend du circuit externe à la diode.

Dans le sens inverse :

La diode présente une résistance très petite dès que la tension de claquage, ou tension Zener, est atteinte.



La diode est dans ce cas en conduction inverse, et il est impératif de limiter le courant dans celle-ci, avec une résistance en série, par exemple.

$$\text{Dans ce cas, } U_Z \cong U_{Z-NOM} \quad (\text{si } I_{Z-MIN} < I_Z < I_{Z-MAX})$$

Nous pouvons également établir la valeur de la résistance interne que la diode présente au circuit. Nous parlons de résistance interne dynamique, qui se calcule selon la formule :

$$R_{IZ-DYN} = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

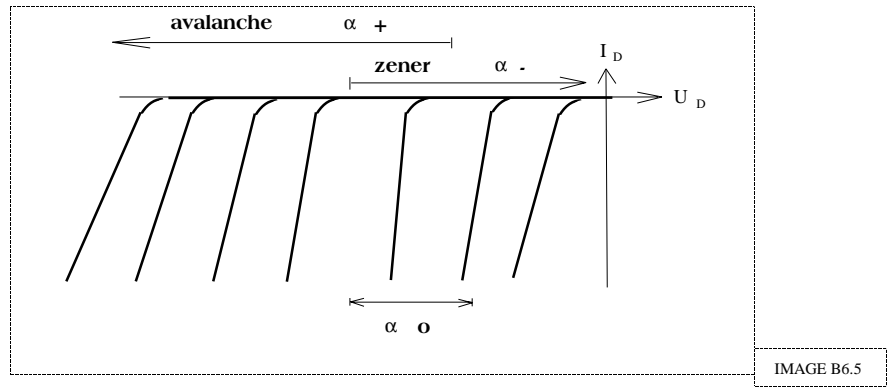
Si la tension inverse redescend en dessous de la valeur Zener, la diode se bloque à nouveau.



### B6.4 Valeurs pratiques des tensions Zener

En pratique seul l'effet d'avalanche est possible pour les diodes dont la tension Zener dépasse 10V. Ce qui à deux conséquences, la caractéristique de la diode est moins franche (la pente est plus grande) d'une part et le coefficient de température est positif d'autre part.

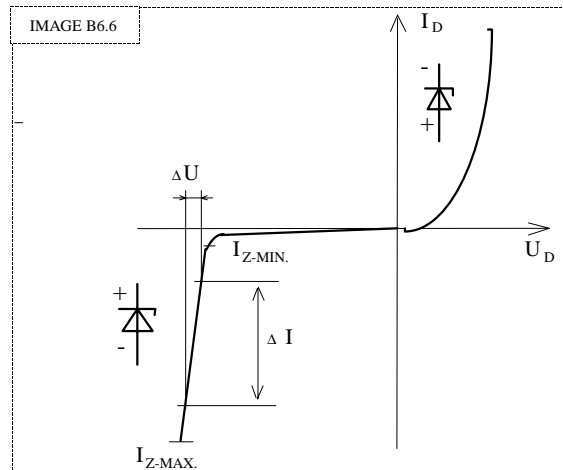
Les diodes dont la tension Zener est inférieure à 5V ont une jonction très mince et seul l'effet Zener peut avoir lieu, ce qui entraîne que la caractéristique de la diode est plus raide et, de plus, ces diodes ont un coefficient de température négatif.



Entre 5V et 10V, les deux effets se combinent. La caractéristique est la plus raide ainsi que le coefficient de température qui peut être proche de zéro. Les diodes Zener sont particulièrement indiquées pour les circuits dont la tension doit être très stable en température ( $V_{ref}$ , par exemple).

### B6.5 Principales caractéristiques des diodes Zener

Nous pouvons repérer le fonctionnement de la diode Zener, avec ses limites, sur la courbe caractéristique  $I_Z = f(U_Z)$  de la diode Zener.



Nous avons vu que la valeur Zener nominale  $U_{ZNOM}$  est donnée pour un courant Zener nominal  $I_{ZNOM}$ .

La diode Zener présente une valeur de résistance interne dynamique très faible dans la zone de fonctionnement. En d'autres termes, pour une petite variation de la tension  $U_Z$  ( $=\Delta U_Z$ ) la diode modifie fortement le courant  $I_Z$  ( $=\Delta I_Z$ ).

$$R_{IZ} = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \approx 0,1\Omega \text{ à } 1\Omega$$

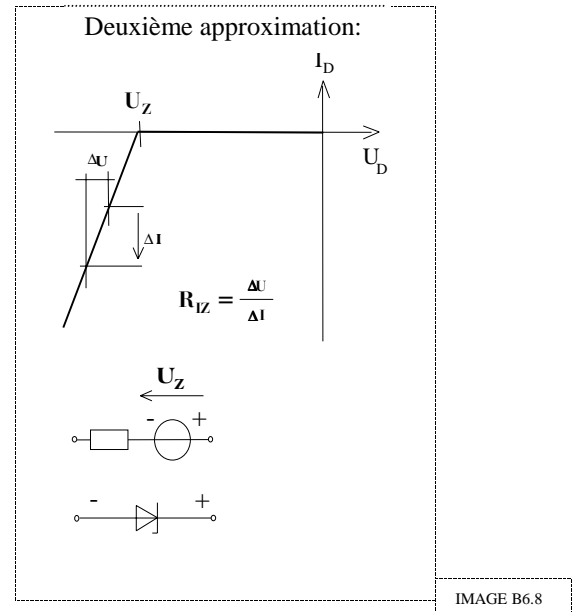
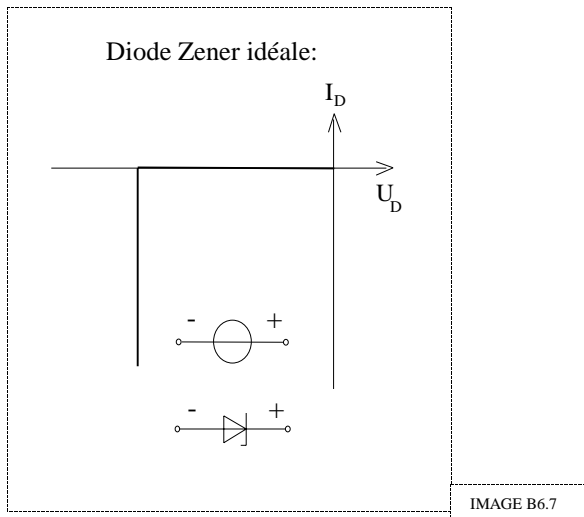
Enfin, en connaissant la puissance maximale que peut dissiper la diode, nous pouvons calculer le courant Zener maximal qui peut traverser la diode.

De la puissance maximale  $P_{ZMAX}$ , nous tirons le courant Zener maximum  $I_{ZMAX}$ .

$$I_{ZMAX} = \frac{P_{ZMAX}}{U_{ZNOM}}$$

De plus, il est possible de déterminer, comme pour les diodes conventionnelles, une valeur de résistance interne de la diode, soit de manière statique  $R_{IZ\_STAT.}$ , soit de manière dynamique  $R_{IZ\_DYN.}$ , en fonction des besoins.

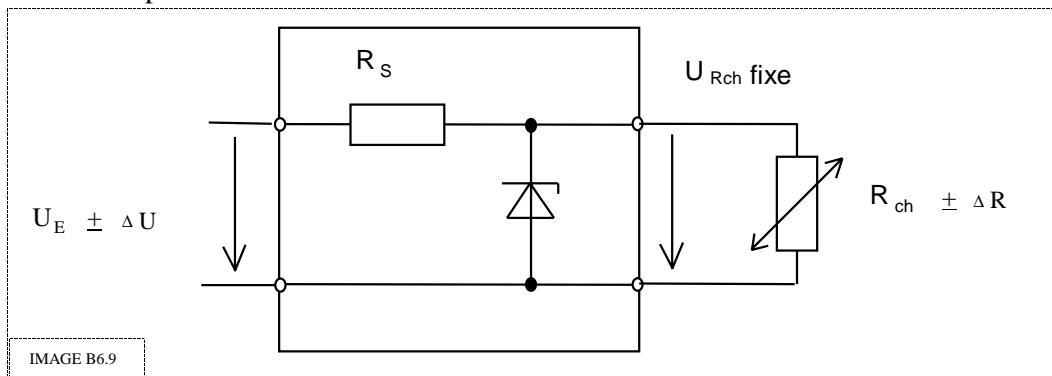
Ce dernier point nous amène à considérer la diode Zener selon la même technique d'approximation utilisée pour les diodes conventionnelles:



Lors du dépannage, il peut être suffisant de considérer la diode Zener dans un circuit comme une diode Zener idéale. Par contre, dans la conception et le calcul de circuits électroniques, il est souvent nécessaire de prendre en compte la valeur de la résistance interne  $R_{IZ}$ .

### B6.6 Principales utilisations

Les diodes Zener sont utilisées pour leur propriété de maintenir une tension constante à leurs bornes : Les circuits de stabilisation de tension ou "régulateur Zener" ou les circuits générateurs de tension de référence. Le schéma est toujours semblable et consiste à relier une résistance en série avec la Zener et de se connecter aux bornes de celle-ci pour obtenir une tension fixe.



Pour le fonctionnement du montage, il est impératif que la diode zener fonctionne dans la zone de claquage, appelée également zone d'utilisation Zener.

Il faudra pour cela contrôler si la tension d'entrée est suffisante et surveiller que le courant dans la zener ne descende pas en dessous d'un minimum, ce qui entraînerait le blocage de la diode.

