

Les diodes

Pascal MASSON
(pascal.masson@unice.fr)
 Edition 2017-2018




École Polytechnique Universitaire de Nice Sophia-Antipolis
Cycle Initial Polytechnique
 1645 route des Lucioles, 06410 BIOT
 

Sommaire

- I. Historique
- II. La diode PN : caractéristique
- III. La diode PN : applications
- IV. La diode Zener
- V. La diode photovoltaïque

Pascal MASSON
Les diodes



I. Historique



I.1. Définition

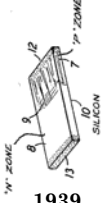
- La diode est un élément qui ne laisse passer le courant que dans un sens



1901



1903



1939



1950

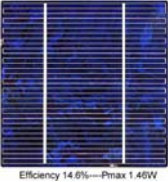


1956

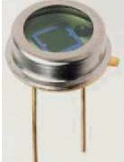
- La diode à semi-conducteur présente aussi des propriétés photoélectriques



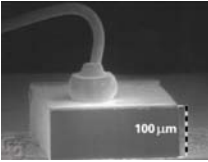
LED



Solaire



Photosensible



Laser



OLED

Pascal MASSON

Les diodes



I. Historique



I.2. Histoire de la diode à semi-conducteur

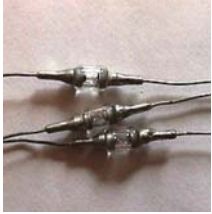
- 1874 : effet découvert sur de la galène par Ferdinand BRAUN (24 ans).



1901

- 1901 : dépôt d'un brevet par Jagadis Chandra BOSE pour l'utilisation de la galène avec contact métallique comme détecteur d'ondes électromagnétiques.

- 1940 : découverte de la diode PN par Russell OHL.
- Remarque : le transistor bipolaire a été découvert en 1948 par William SHOCKLEY.



1956

Pascal MASSON

Les diodes



I. Historique



I.3. Histoire de la diode à tube

- 1879 : invention de la lampe par thomas EDISON.
- 1873 : découvert de l'effet thermoïonique par Frederick GUTHRIE. Cet effet est redécouvert par Thomas EDISON en 1880 (puis breveté en 1883).



1879



1903



1950

- 1904 : John Ambrose FLEMING brevette la diode à vide.

Pascal MASSON

Les diodes



I. Historique



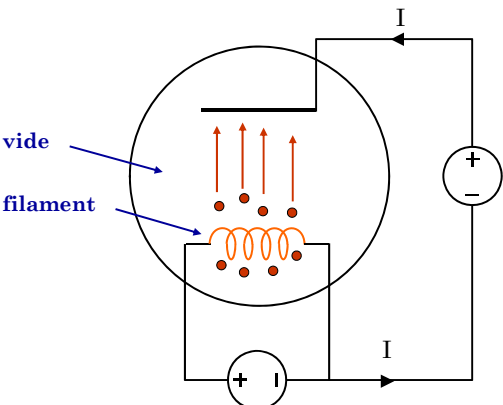
I.3. Histoire de la diode à tube

□ Fonctionnement



vide →

filament →



Pascal MASSON

Les diodes



II. La diode PN : caractéristique



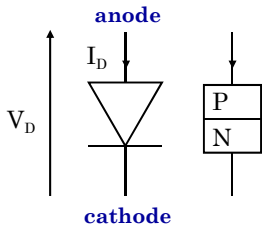
II.1. Définition de la jonction PN

- Une jonction P-N est créée en juxtaposant un semi-conducteur dopé N (les électrons sont majoritaires) avec un semi-conducteur dopé P (les trous sont majoritaires).

II.2. Représentation

anneau de repérage





Pascal MASSON

Les diodes



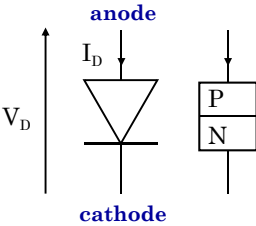
II. La diode PN : caractéristique



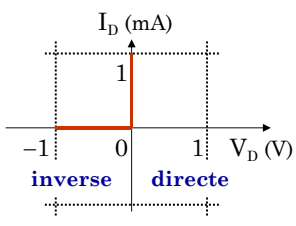
II.3. Caractéristique idéale

- Dans le cas idéal la diode ne laisse pas passer de courant pour $V_D < 0$ V sinon elle en laisse passer sans limitation. Cela revient à un interrupteur qui est ouvert ou fermé

anode



cathode



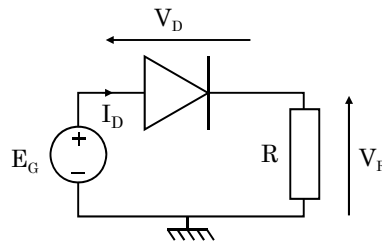
- Si $V_D < 0$ alors la diode est polarisée en inverse sinon elle est polarisée en directe.
- Quand $I_D = 0$, on dit que la diode est bloquée sinon elle est passante

Pascal MASSON

Les diodes

II.3. Caractéristique idéale

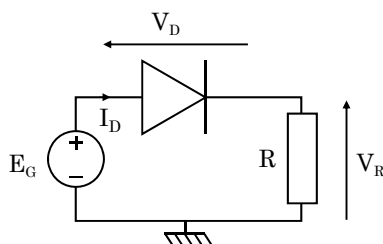
- On alimente une résistance $R = 1000 \, \Omega$ avec un générateur de tension variable E_G qui peut prendre des valeurs positives et négatives.
- On a une contrainte sur le courant qui traverse la résistance qui doit être uniquement positif.
- Pour réaliser cette fonction, on intercale une diode entre le générateur et la résistance :



- La loi des mailles s'écrit : $E_G = V_D + V_R$

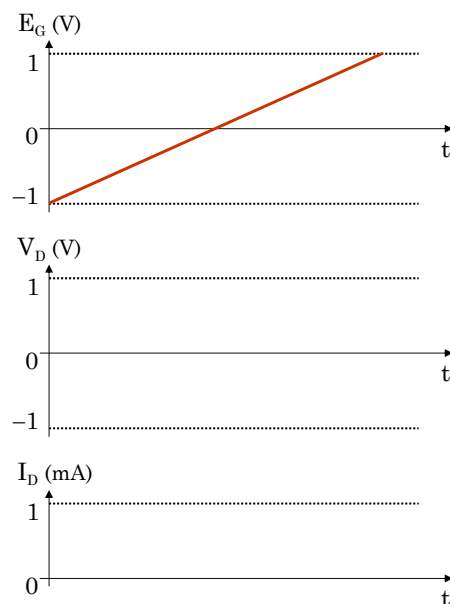
II.3. Caractéristique idéale

- E_G a l'allure d'une rampe de tension



- Loi des mailles :

$$E_G = V_D + V_R$$





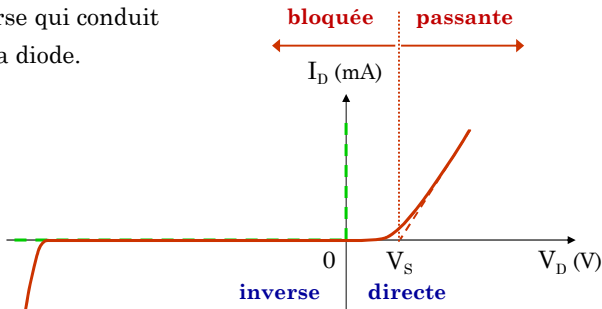
II. La diode PN : caractéristique



II.4. Caractéristique réelle

□ **Modification de la caractéristique idéale**

- Existence d'une tension de seuil, V_S , dont la valeur dépend du semi-conducteur utilisé et de ses dopages.
- Existence d'une résistance interne à la diode, R_S (en série avec la diode idéale).
- Existence d'un phénomène d'avalanche en inverse qui conduit à la destruction de la diode.



Pascal MASSON

Les diodes



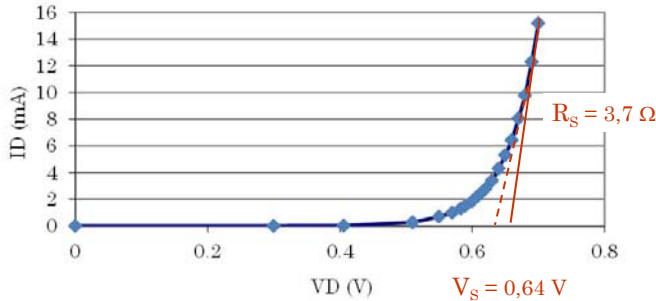
II. La diode PN : caractéristique



II.4. Caractéristique réelle

□ **Exemple de la diode 1N4004 qui sera étudiée en TP**

Caractéristique I(V) de la diode 1N4004



Pascal MASSON

Les diodes



POLYTECH
NICE-SOPHIA

II. La diode PN : caractéristique

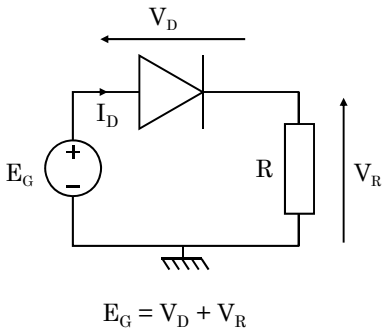


Université
Nice
Sophia Antipolis

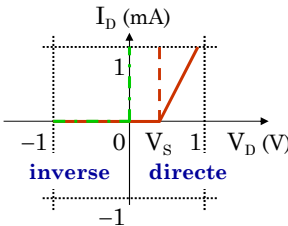
II.4. Caractéristique réelle

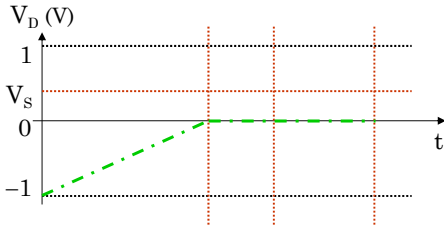
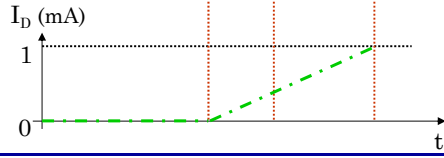
□ Impact sur l'exemple précédent

- Tension de seuil.
- Résistance série, R_S .



$E_G = V_D + V_R$



Pascal MASSON

Les diodes



POLYTECH
NICE-SOPHIA

II. La diode PN : caractéristique



Université
Nice
Sophia Antipolis

II.4. Caractéristique réelle

□ Expression du courant

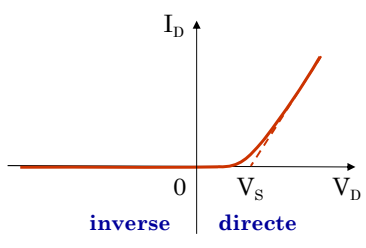
- L'expression du courant ne fait intervenir que deux paramètres :

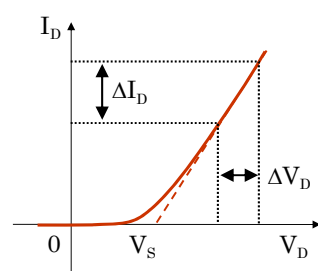
$$\begin{cases} I_D = \frac{1}{R_S}(V_D - V_S) & \text{si } V_D > V_S \\ I_D = 0 & \text{si } V_D \leq V_S \end{cases}$$

- ✓ V_S (V) : tension de seuil de la diode
- ✓ R_S (Ω) : résistance série de la diode

□ Détermination de la résistance série

$$R_S = \frac{dV_D}{dI_D} = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$





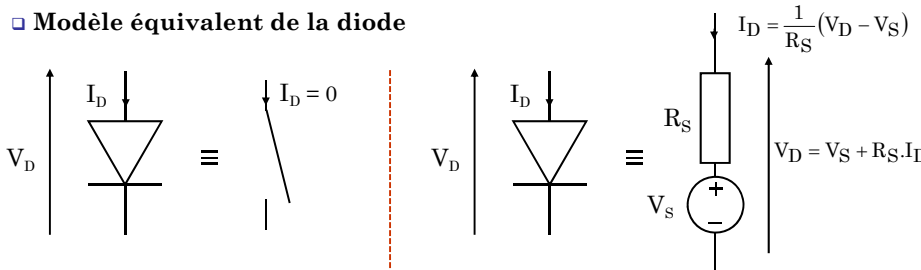
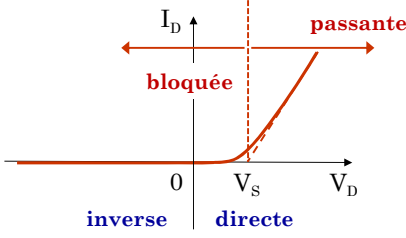
Pascal MASSON

Les diodes

II. La diode PN : caractéristique

II.4. Caractéristique réelle

□ **Modèle équivalent de la diode**

Pascal MASSON Les diodes

II. La diode PN : caractéristique

II.5. Point de polarisation

□ **Equations du circuit**

- $E_G = V_D + V_R = V_D + R \cdot I_D$
- $V_D = V_S + R_S \cdot I_D$

□ **Résolution des 2 équations**

1 & 2) $E_G = V_S + R_S \cdot I_{D0} + R \cdot I_{D0}$

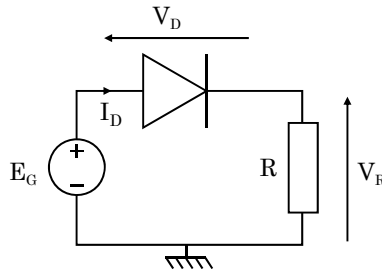
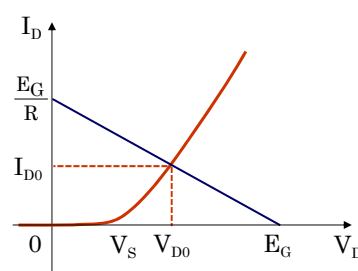
point de polarisation $\begin{cases} I_{D0} = \frac{E_G - V_S}{R + R_S} \\ V_{D0} = V_S + R_S \cdot I_{D0} = E_G - R \cdot I_{D0} \end{cases}$

□ **Résolution graphique**

- Droite de charge :

- $\Rightarrow I_D = \frac{E_G - V_D}{R}$

- Le point de polarisation correspond à l'intersection entre les 2 droites

Pascal MASSON Les diodes



III. La diode PN : application



III.1. La logique à diode

- Les circuits logiques constituent plus de 99 % des circuits intégrés que nous utilisons au quotidien.
- Bien qu'ils soient réalisés à partir de transistors MOS (Métal – Oxyde – Semi-conducteur), on peut utiliser des diodes pour obtenir les fonctions de base.

Pascal MASSON

Les diodes



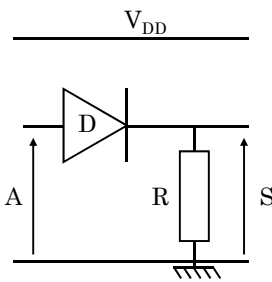
III. La diode PN : application



III.1. La logique à diode

□ Exemple : la porte "non-inverseuse"

- Le circuit logique est alimenté entre 0 V et $V_{DD} = 5$ V.
- Le circuit possède aussi une entrée « A » et une sortie « S »
- « A » peut prendre 2 valeurs : 0 V (0 binaire) et 5 V (1 binaire)
- On considère que la diode est semi-idéale avec $V_S = 0.5$ V



$S = A$

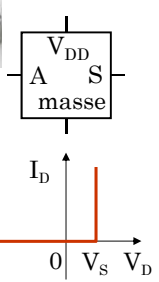
A	S
0	

binaire

$S = A$

A	S
0	

tension (V)

Pascal MASSON

Les diodes

III. La diode PN : application

III.1. La logique à diode

□ **Exemple : la porte "OU"**

- Le circuit logique est alimenté entre 0 V et $V_{DD} = 5$ V.
- Le circuit possède aussi 2 entrées « A, B » et une sortie « S »
- Les diodes sont semi-idéale avec $V_S = 0.5$ V

$S = A + B$

A	B	S

Pascal MASSON
Les diodes

III. La diode PN : application

III.2. Pompe de charges

- Les cartes à puces, étiquettes électroniques, des lecteurs MP3, téléphones portables, appareils photos et d'une manière générale les circuits intégrés montés sur des supports portables embarquent des mémoires EEPROM et Flash.
- Ces mémoires permettent de stocker des données (code, photos, mots de passe...) de façon permanente.
- La programmation nécessite des tensions typiquement de l'ordre de 15 à 20 V alors que la tension d'alimentation d'un circuit intégré n'est que de l'ordre de 3 à 5 V.
- Il faut donc intégrer des survolteurs qui dans ce cas seront des pompes de charges.

Flash

Pascal MASSON
Les diodes



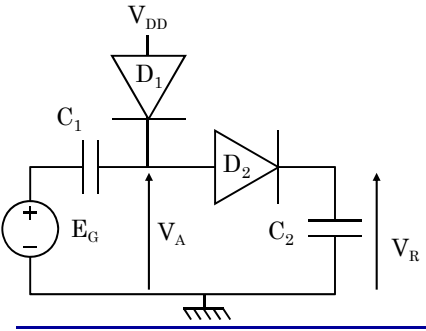
III. La diode PN : application

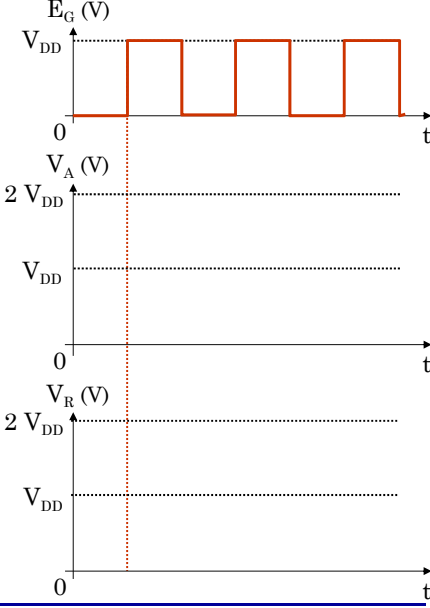


III.2. Pompe de charges

■ **Le doubleur de tension**

- On suppose : $V_S = 0$ et $C_1 = C_2$
- Etat initial : C_1 et C_2 déchargées





Pascal MASSON
Les diodes

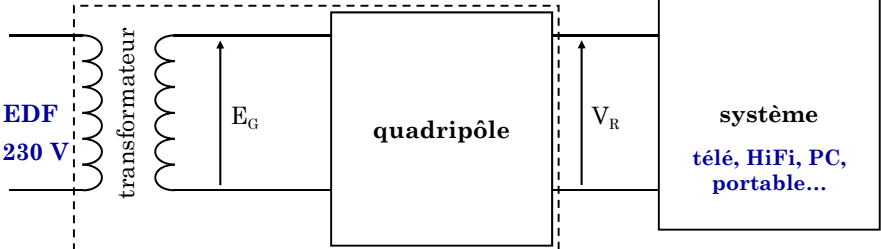


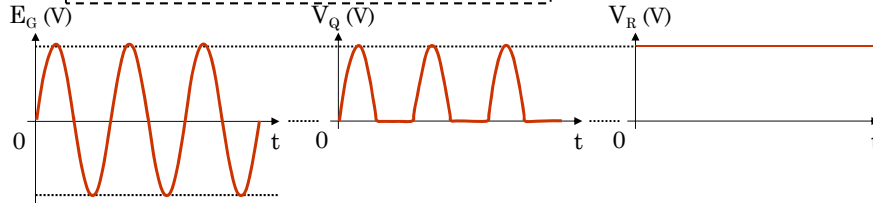
III. La diode PN : application



III.3. Redressement mono alternance

■ Transformation d'une tension alternative en provenance d'EDF (par exemple) en tension continue.





Pascal MASSON
Les diodes

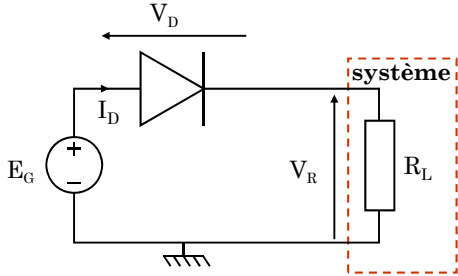


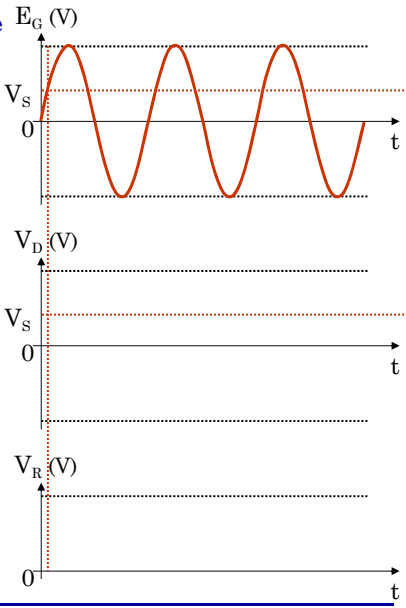
III. La diode PN : application



III.3. Redressement mono alternance

- Récupération de l'alternance positive
 - R_L représente la résistance d'entrée du système que l'on alimente.





Pascal MASSON

Les diodes

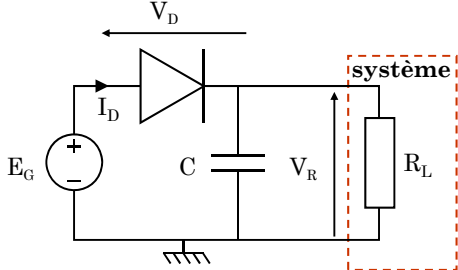


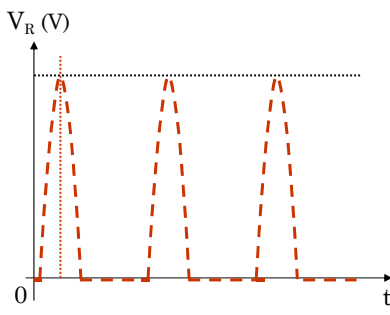
III. La diode PN : application



III.3. Redressement mono alternance

- Récupération de l'alternance positive
 - R_L représente la résistance d'entrée du système que l'on alimente.
- Transformation en tension continue
 - Ajout d'une capacité en parallèle avec l'entrée du système.



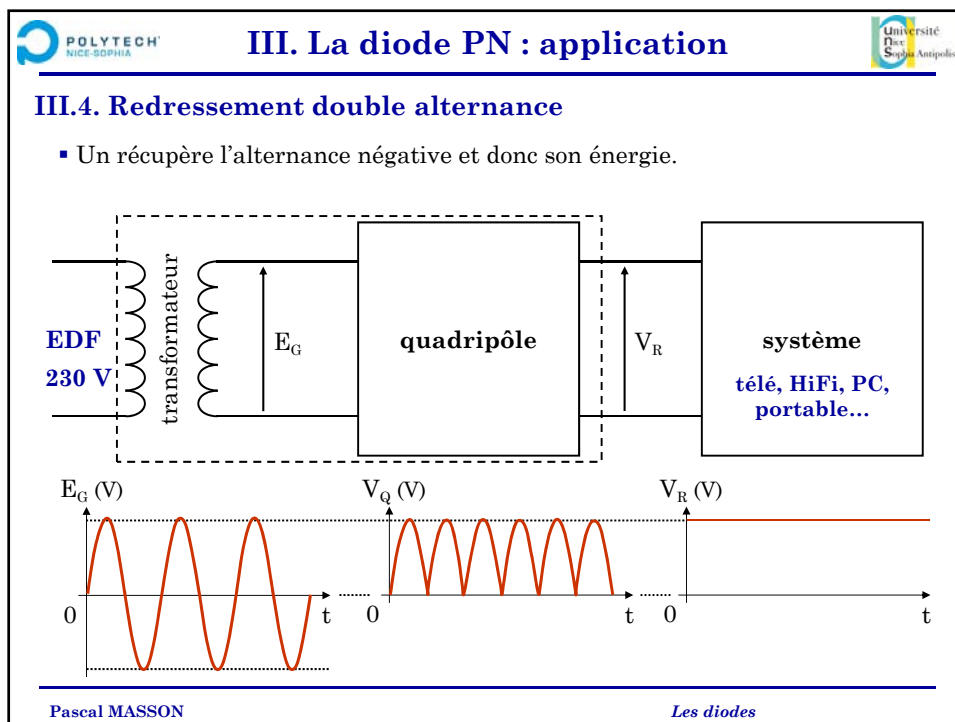
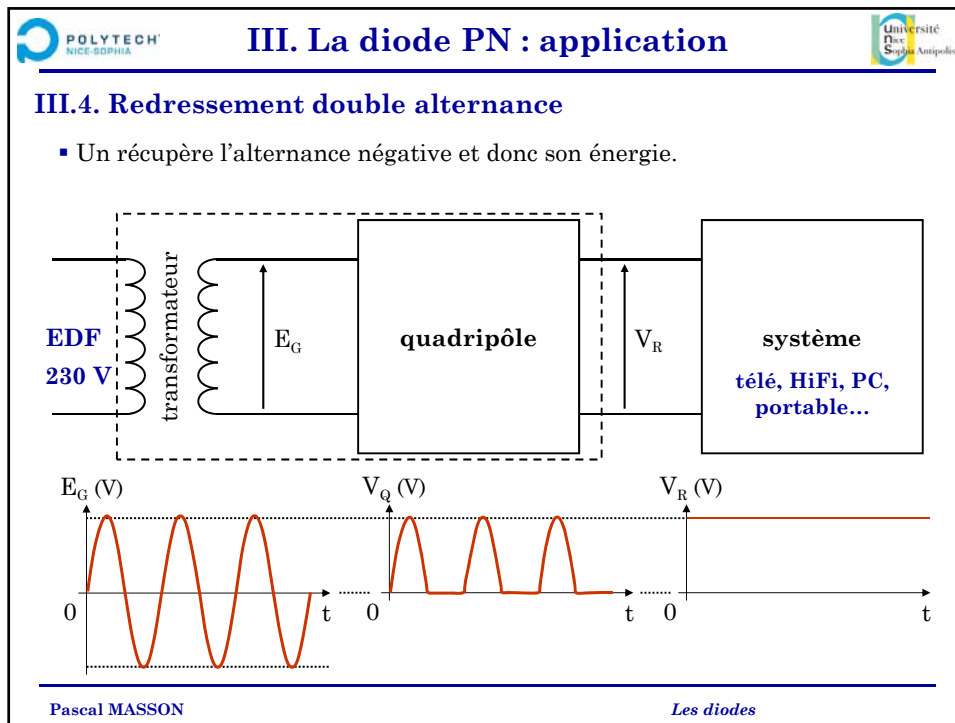




63V
100µF ±20%

Pascal MASSON

Les diodes



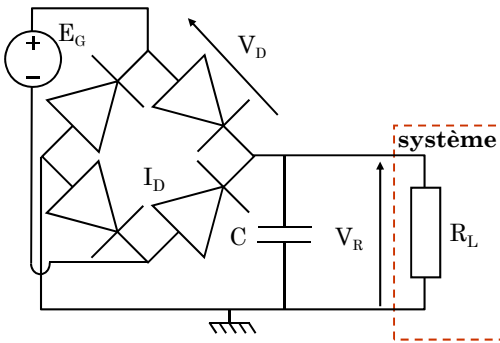


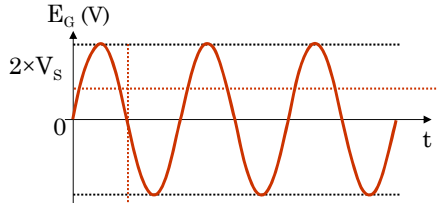
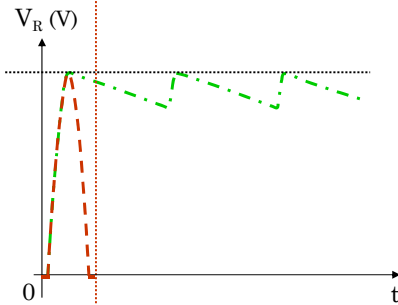
III. La diode PN : application



III.4. Redressement double alternance

□ Alternance positive



Pascal MASSON
Les diodes



III. La diode PN : application



III.4. Redressement double alternance

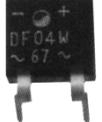
□ Exemples de pont de diodes



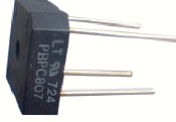
1,5 A - 80 V



1,5 A - 1000 V



1 A - 80 V



5 A - 100 V



35 A - 200 V



50 A - 600 V



Alimentation train électrique



Alimentation à découpage

Pascal MASSON
Les diodes



POLYTECH
NICE-SOPHIA

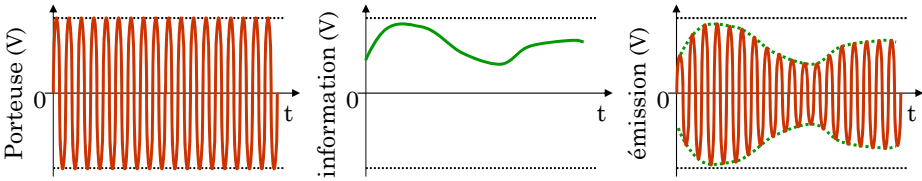
III. La diode PN : application



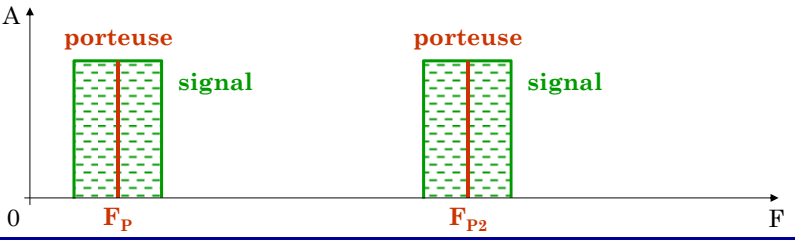
Université
Nice-Sophia Antipolis

III.5. Récepteur radio

□ Modulation d'amplitude



- Une porteuse (sinusoïde à une certaine fréquence) est modulée en amplitude par le signal information (morse, musique...)



Pascal MASSON Les diodes



POLYTECH
NICE-SOPHIA

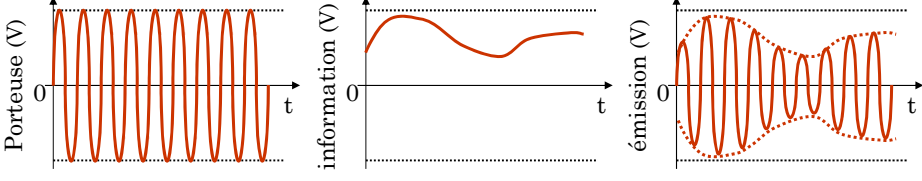
III. La diode PN : application



Université
Nice-Sophia Antipolis

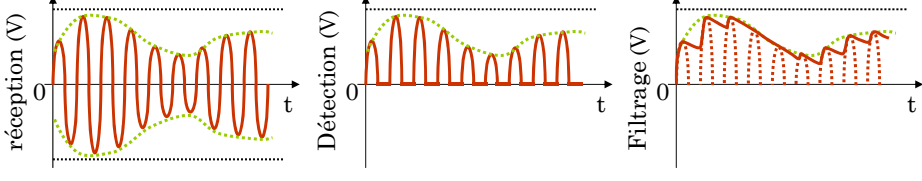
III.5. Récepteur radio

□ Modulation d'amplitude (AM)



- Une porteuse (sinusoïde à une certaine fréquence) est modulée en amplitude par le signal information (morse, musique...)

□ Démodulation d'amplitude



Pascal MASSON Les diodes



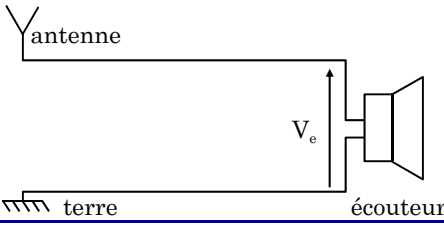
III. La diode PN : application

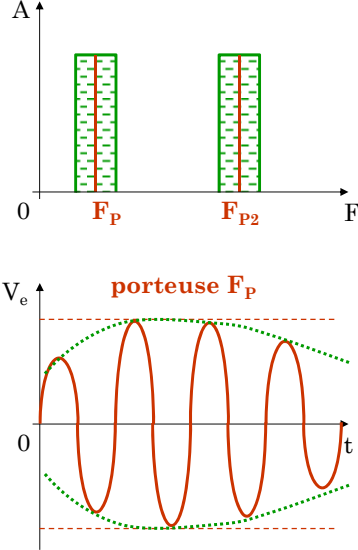


III.5. Récepteur radio

❑ **Le poste à Galène**

- Récepteur radio qui ne nécessite pas d'alimentation.
- L'antenne reçoit toutes les fréquences.
- Circuit bouchon : sélection de la porteuse.
- Écouteur de haute impédance ($> 1\text{ k}\Omega$).
- Diode de type Galène (diode Schottky) à faible seuil.





Pascal MASSON

Les diodes



III. La diode PN : application



III.5. Récepteur radio

❑ **Le poste à Galène**

- Récepteur radio qui ne nécessite pas d'alimentation.
- L'antenne reçoit toutes les fréquences.
- Circuit bouchon : sélection de la porteuse.
- Écouteur de haute impédance ($> 1\text{ k}\Omega$).
- Diode de type Galène (diode Schottky) à faible seuil.
- L'écouteur est aussi un filtre passe-bas.



Pascal MASSON

Les diodes

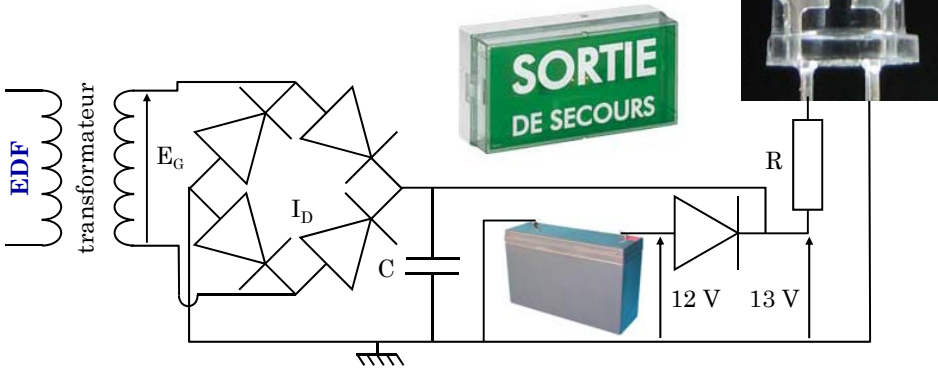


III. La diode PN : application



III.6. Double alimentation

- Lorsque l'alimentation est présente, la LED est alimentée par le pont de diodes.



Pascal MASSON Les diodes

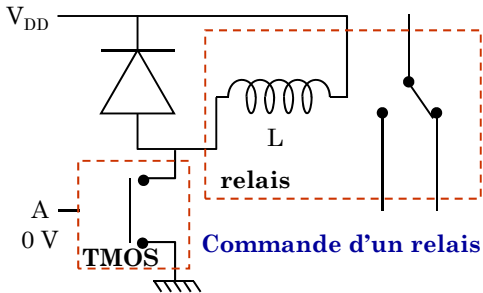


III. La diode PN : application

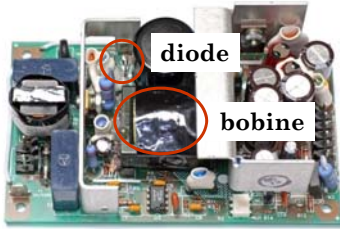


III.7. Diode de roue libre

- La diode de roue libre sert à évacuer l'énergie emmagasinée par une bobine.
- On prend ici pour exemple la commande d'un relais.
- $A = 0\text{ V}$, le TMOS est un circuit ouvert.
- $A = V_{DD}$, le TMOS est un circuit fermé : un courant circule dans la bobine d'où basculement du relais. La diode est bloquée.
- $A = 0\text{ V}$, la diode devient passante pour évacuer l'énergie de la bobine.



Commande d'un relais



Alimentation à découpage

Pascal MASSON Les diodes



IV. La diode zener



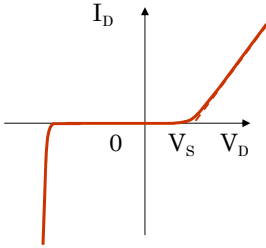
IV.1. Définition de la zener

- Une diode zener est une jonction P-N dont la fabrication permet son utilisation en régime d'avalanche ou tunnel :

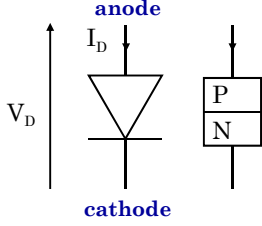
Très forte variation de courant pour une très faible variation de tension

- L'effet Zener a été découvert par Clarence ZENER (1905-1993)

IV.2. Représentation(s)



anode



cathode

diode PN

Pascal MASSON

Les diodes



IV. La diode zener



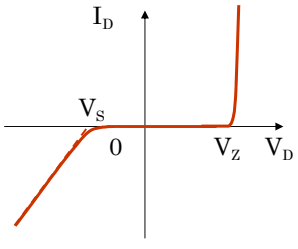
IV.1. Définition de la zener

- Une diode zener est une jonction P-N dont la fabrication permet son utilisation en régime d'avalanche ou tunnel :

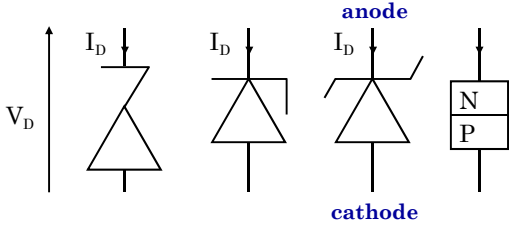
Très forte variation de courant pour une très faible variation de tension

- L'effet Zener a été découvert par Clarence ZENER (1905-1993)

IV.2. Représentation(s)



anode



cathode

diode zener

Pascal MASSON

Les diodes

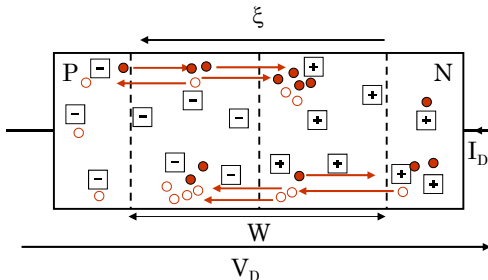
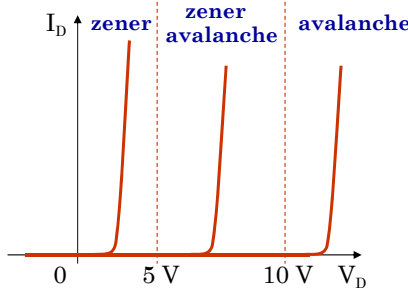


IV. La diode zener



IV.3. Caractéristique en courant

- La caractéristique $I_D(V_D)$ résulte de l'effet d'avalanche et/ou de l'effet zener
 - ✓ $V_Z < 5 \text{ V}$: effet zener
 - ✓ $5 \text{ V} < V_Z < 10 \text{ V}$: effet zener + effet d'avalanche
 - ✓ $V_Z > 10 \text{ V}$: effet d'avalanche

Pascal MASSON

Les diodes



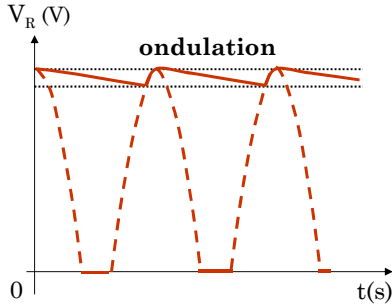
IV. La diode zener

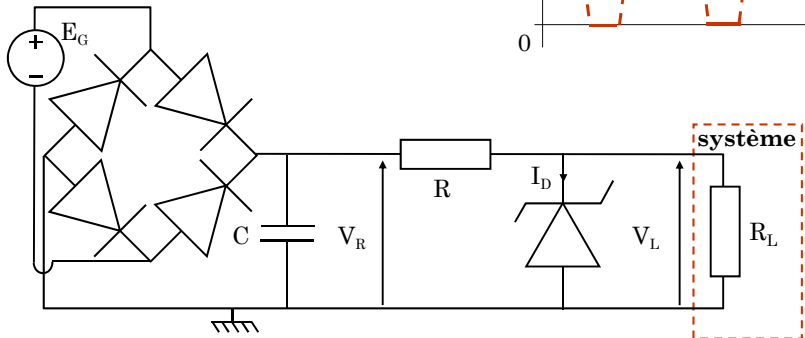


IV.4. Application

□ **Stabilisateur de tension**

- Le but ici est de supprimer l'ondulation résiduelle après le filtrage capacitif.
- La tension de rupture (V_Z) est la tension que l'on souhaite avoir sur la charge.





Pascal MASSON

Les diodes

POLYTECH[®]
 NICE-SOPHIA

IV. La diode zener

Université
 Nice-Sophia Antipolis

IV.4. Application

□ Stabilisateur de tension

- Le but ici est de supprimer l'ondulation résiduelle après le filtrage capacitif.
- La tension de rupture (V_Z) est la tension que l'on souhaite avoir sur la charge.

Pascal MASSON

Les diodes

POLYTECH[®]
 NICE-SOPHIA

V. Effet photoélectrique : absorption

Université
 Nice-Sophia Antipolis

V.1. Effet photo-électrique et cellule photovoltaïque

1839

Mise en évidence de l'effet photoélectrique par Antoine Becquerel : comportement électrique d'électrodes immergées dans un liquide, modifié par un éclairage

1905

Heinrich Rudolf Hertz découvre l'effet photoélectrique : une plaque de métal étant soumise à une lumière émettra des électrons

1886

Albert Einstein propose une explication en introduisant la notion de photon

Pascal MASSON

Les diodes

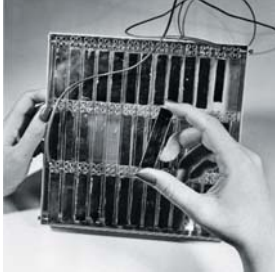
20



V. Effet photoélectrique : absorption



V.1. Effet photo-électrique et cellule photovoltaïque



1883

- Charles Fritts réalise la première cellule solaire. Elle est réalisée avec du Sélénium sur lequel a été déposée une très fine couche d'or

- Premier panneau solaire basé sur le brevet de Russel Ohl en 1946 (patent US2402662, "Light sensitive device.") qui a initialement inventé la diode PN en 1939



1950

Pascal MASSON

Les diodes

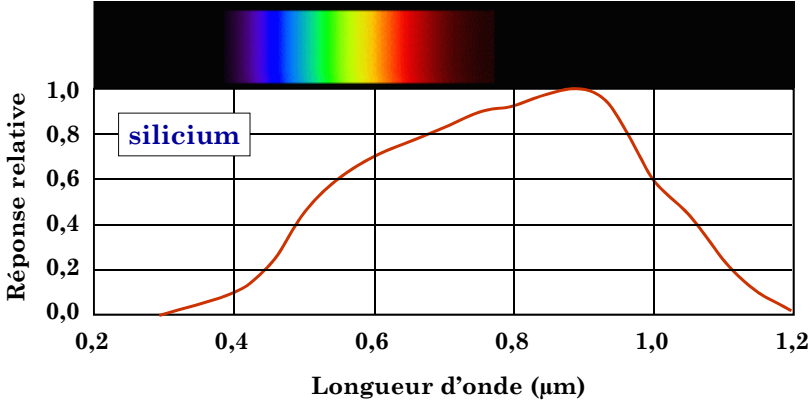


V. Effet photoélectrique : absorption



V.2. Absorption dans le silicium

- L'efficacité de la conversion photon-électron dépend de la longueur d'onde des photons
- Tous les photons d'énergie supérieure à E_G ne génèrent pas forcément une paire électron-trou



silicium

Pascal MASSON

Les diodes

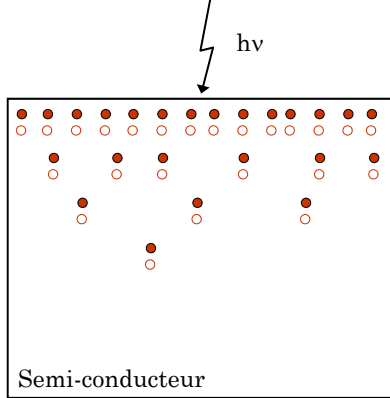


V. Effet photoélectrique : absorption

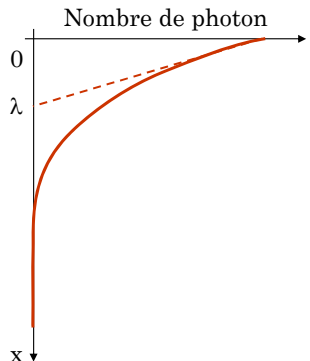


V.2. Absorption dans le silicium

- Les photons ont une certaine distance de pénétration dans le semi-conducteur.



Semi-conducteur



Pascal MASSON

Les diodes

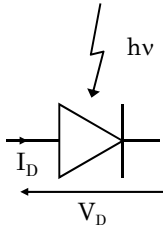


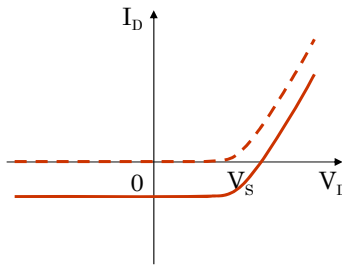
V. Effet photoélectrique : absorption



V.3. Effet sur la diode PN

- Des photons ayant une énergie suffisante ($h\nu$) peuvent générer des paires électron-trou.
- Si la génération se fait dans la ZCE alors le champ électrique sépare les électrons et les trous ce qui donne naissance à un courant I_D négatif
- Ce courant s'ajoute au courant normal de la diode





Pascal MASSON

Les diodes

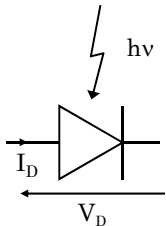
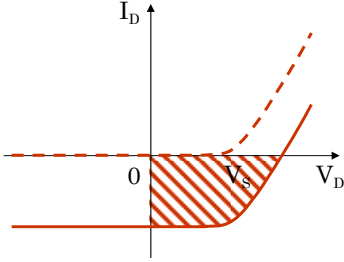


V. Effet photoélectrique : absorption



V.3. Effet sur la diode PN

- L'amplitude du courant photoélectrique dépend de l'énergie et du nombre des photons qui arrivent sur la ZCE de diode
- Si la génération se fait hors ZCE alors la paire électron-trou sera recombinée et ne participera pas au courant
- Lorsque $I_D > 0$ et $V_D > 0$ la diode se comporte comme un générateur de courant et non comme un récepteur

Pascal MASSON

Les diodes

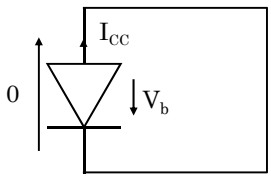
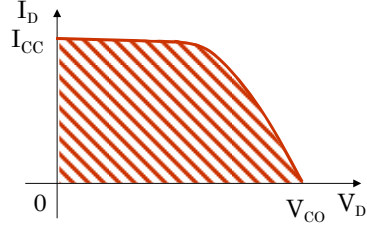


V. Effet photoélectrique : absorption



V.4. Générateur photovoltaïque

- On fait à présent un changement de convention pour le courant de la diode photovoltaïque qui sera inversé par rapport à la diode normale. Cela évitera de conserver un signe - .
- La tension obtenue à vide c'est-à-dire sans charge est appelée V_{CO} (tension de circuit ouvert)
- De même, on définit le courant de court-circuit, I_{CC} .

Pascal MASSON

Les diodes

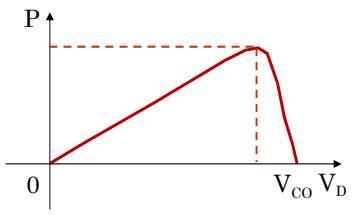
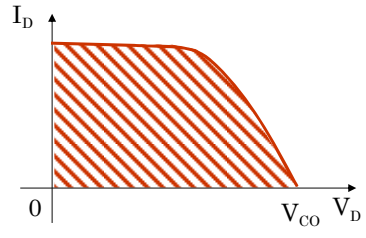


V. Effet photoélectrique : absorption



V.4. Générateur photovoltaïque

- En fonction de la valeur de R , la puissance fournie ($P = I_D \cdot V_D$) par la diode passe par un maximum.
- En conséquence, il existe une valeur optimale de la charge qui permet d'obtenir le plus de puissance.

Pascal MASSON

Les diodes

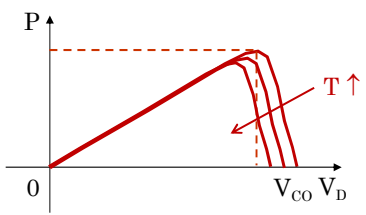
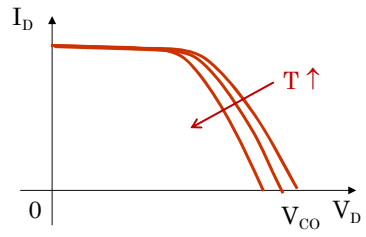


V. Effet photoélectrique : absorption



V.4. Générateur photovoltaïque

- Les caractéristiques $I(V)$ des composants électroniques sont très sensibles à la température
- Le courant d'une diode augmente avec la température. Les courants de Génération-recombinaison augmentent aussi
- Il est donc important de permettre aux panneaux photovoltaïques de se refroidir

Pascal MASSON

Les diodes



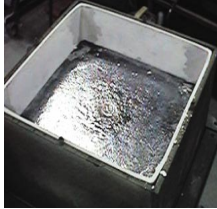
V. Effet photoélectrique : absorption



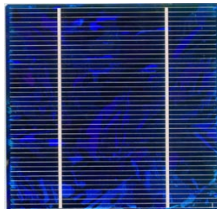
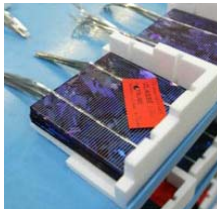
V.5. Photovoltaïque : Silicium poly-cristallin

- Les joints de grain se comportent comme des centres recombinaux et diminuent le courant de la diode







Pascal MASSON
Les diodes

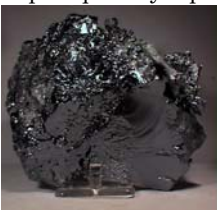


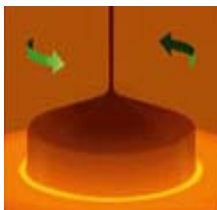
V. Effet photoélectrique : absorption

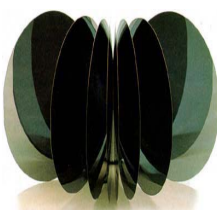
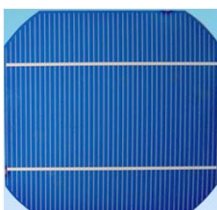


V.6. Photovoltaïque : silicium mono-cristallin

- Le procédé est plus coûteux en énergie mais le rendement est plus grand puisqu'il n'y a pas de joint de grain






Pascal MASSON
Les diodes