



Faculté des Sciences  
Département de Physique

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de  
MAGISTER

***AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DES COMPOSANTS  
ÉLECTRONIQUES PAR SIMULATION***

**Option :**

Physique des Solides Mal Ordonnés Théorie et Applications

**Présenté par :**

Abdelhalim Besra

**Devant le jury composé de :**

Président :	Gasmi Ali	Prof	U de Annaba
Rapporteur :	Yousfi Ali	Prof	U de Annaba
Examineur :	Ghers Mokhtar	Prof	U de Annaba
Examineur :	Gueldane Farid	M C	U de Annaba
Examineur :	Cheloufi Tahar	M C	U de Annaba
Membre invité :	Belalli Yacine	Dr	U de Annaba



## Dédicaces

Je dédie ce mémoire

**A**

la mémoire de ma mère et mon père

ma femme : Nadia

mes fils : Akram, Ayoub Abdelalim et Radouan et  
Anas

mes frères et sœurs

mes amis et proches

## Remerciements

Je remercie en premier lieu **ALLAH** qui m'a donné le courage et la volonté de poursuivre les études en post graduation.

Je remercie surtout **ma mère Bendaikha Aicha** qui a fait preuve de beaucoup de patience et de sacrifice pour mon éducation, sans oublier **mon père**.

Je remercie **ma femme** qui ma soutenu et particulièrement lors de l'année théorique.

Je remercie chaleureusement le directeur de ce mémoire : **Mr Ali Yousfi** professeur à l'université de Badji Mokhtar de Annaba de m'avoir aidé par ses conseils précieux, le président : **Mr Gasmi Ali** professeur à l'université de Badji Mokhtar de Annaba et les membres du jury :

**Mr Ghers Mokhtar** professeur à l'université de Badji Mokhtar de Annaba

**Mr Gueldane Farid** maitre de conférences à l'université de Badji Mokhtar de Annaba

**Mr Cheloufi Tahar** maitre de conférences à l'université de Badji Mokhtar de Annaba d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Enfin, je remercie chaleureusement mon ami **Boukarm Riadh** pour ses conseils et ses orientations qui ont apporté à l'aboutissement de ce travail. Ainsi que mon ami **Bensalem Chaouki** qui m'a poussé à poursuivre mes études de post grad. Sans oublier mon ami **Belalli Yacine**.

## **Résumé**

L'énergie solaire étant une source d'énergie renouvelable et qui respect l'environnement et de ce fait est considérée comme une énergie d'avenir.

Le système photovoltaïque nous permet l'exploitation de cette énergie grâce aux cellules photovoltaïque qui nous donnent de l'énergie électrique.

L'amélioration des performances des composants électroniques s'est basée sur la simulation de ces composants. Enfin on a confronté les résultats obtenus à ceux théoriques ce qui nous a permis d'affirmer l'utilisation de ces composants dans la conversion d'énergie.

**Mots clés** : semi-conducteurs, composants électroniques, effet photovoltaïque, cellules photovoltaïques, convertisseurs électriques.

## **ABSTRACT**

Solar energy being a renewable energy source and which respect the environment and of this fact is regarded as an energy with a future.

The photovoltaic system allows us the exploitation of this energy thanks to the cells photovoltaic which give us electrical energy.

The improvement of the performances of the electronics components was based on the simulation of these components. Finally one confronted the results obtained with those theoretical what enabled us to affirm the use of these components in the energy transformation.

## **KEY WORDS**

Semiconductors, electronics components, photovoltaic effect, photovoltaic cells, electric converters

## Sommaire

	Résumé/ mots clés.....	04
	Abstract/ Keywords.....	05
	ملخص.....	06
	Sommaire.....	07
	Liste des figures.....	13
	Liste des tableaux.....	16
	Introduction générale.....	17
<b>1</b>	<b>Principe de la conductivité des semi-conducteurs</b>	
<b>1.1</b>	Introduction.....	20
<b>1.2</b>	Variation de la conductivité des semi-conducteurs.....	20
<b>1.3</b>	Structure des bandes d'énergies.....	21
<b>1.3.1</b>	La notion de gap.....	22
<b>1.3.2</b>	Semi-conducteur à gap direct.....	23
<b>1.3.3</b>	Semi-conducteur à gap indirect.....	23
<b>1.4</b>	Types de matériaux.....	24
<b>1.5</b>	Types de semi-conducteurs.....	25
<b>1.5.1</b>	Les semi-conducteurs élémentaires.....	25
<b>1.5.2</b>	Les semi-conducteurs composés.....	25
<b>1.5.3</b>	Les semi-conducteurs intrinsèques.....	26
<b>1.5.3.1</b>	Ionisation thermique.....	26
<b>1.5.3.2</b>	Recombinaison.....	27
<b>1.5.3.3</b>	Concentration des porteurs dans le semi-conducteur intrinsèque.....	28
<b>1.5.3.4</b>	Interaction entre lumière - semi-conducteur.....	28
<b>1.5.3.5</b>	Effet de la température sur la conductivité des semi-conducteurs.....	30
<b>1.5.4</b>	Les semi-conducteurs extrinsèques.....	32
<b>1.5.4.1</b>	Semi-conducteur dopé n.....	33
<b>1.5.4.2</b>	Semi-conducteur dopé p.....	34
<b>1.6</b>	Le courant dans les semi-conducteurs.....	35
<b>1.7</b>	Conclusions.....	37

---

<b>2</b>	<b>Structure physique des semi-conducteurs</b>	
<b>2.1</b>	Introduction.....	<b>39</b>
<b>2.2</b>	La diode.....	<b>39</b>
<b>2.2.1</b>	Définition.....	<b>39</b>
<b>2.2.2</b>	Caractéristiques principales d'une diode.....	<b>41</b>
<b>2.2.2.1</b>	Tension maximale (en inverse).....	<b>41</b>
<b>2.2.2.2</b>	Courant maximal (en direct).....	<b>41</b>
<b>2.2.2.3</b>	Température maximale.....	<b>41</b>
<b>2.2.3</b>	Caractéristiques statiques.....	<b>42</b>
<b>2.2.4</b>	Caractéristiques dynamiques.....	<b>42</b>
<b>2.2.4.1</b>	Blocage.....	<b>43</b>
<b>2.2.4.2</b>	Amorçage.....	<b>44</b>
<b>2.2.5</b>	La diode idéale.....	<b>44</b>
<b>2.2.6</b>	La diode Schottky.....	<b>44</b>
<b>2.3</b>	Le transistor bipolaire.....	<b>45</b>
<b>2.3.1</b>	Définition.....	<b>45</b>
<b>2.3.2</b>	Caractéristique d'un transistor.....	<b>46</b>
<b>2.4</b>	Le thyristor.....	<b>48</b>
<b>2.4.1</b>	Définition.....	<b>48</b>
<b>2.4.2</b>	Caractéristique statique.....	<b>49</b>
<b>2.4.2.1</b>	Amorçage par effet d'avalanche.....	<b>49</b>
<b>2.4.2.2</b>	Amorçage par la gâchette.....	<b>49</b>
<b>2.4.2.3</b>	Blocage.....	<b>50</b>
<b>2.4.3</b>	Caractéristiques dynamiques.....	<b>50</b>
<b>2.4.3.1</b>	Amorçage.....	<b>50</b>
<b>2.4.3.2</b>	Blocage.....	<b>51</b>
<b>2.5</b>	Le GTO (Gate Turn-Off Thyristor).....	<b>51</b>
<b>2.5.1</b>	Définition.....	<b>51</b>
<b>2.5.2</b>	Principe d'amorçage.....	<b>52</b>
<b>2.5.3</b>	Principe d'extinction.....	<b>52</b>
<b>2.5.4</b>	Caractéristiques.....	<b>53</b>
<b>2.6</b>	Le MOS (Métal, Oxyde, Semi-conducteur).....	<b>53</b>
<b>2.6.1</b>	Définition.....	<b>53</b>

---

2.6.2	Caractéristiques.....	54
2.7	Le MOSFET.....	56
2.7.1	Définition.....	56
2.7.2	Caractéristiques.....	57
2.8	Le BJT.....	57
2.8.1	Définition.....	57
2.8.2	Caractéristiques.....	57
2.9	L'IGBT.....	58
2.9.1	Définition.....	58
2.9.2	Caractéristiques.....	59
2.10	Les composants électroniques.....	59
2.10.1	Fonctionnement en Commutation.....	59
2.10.2	Performances.....	60
2.10.3	Etude comparative entre les différents composants.....	62
2.10.4	Evolution de dispositifs de puissance.....	63
2.10.5	Les progrès des technologies conventionnelles.....	64
2.10.5.1	Amélioration des MOSFET de puissance.....	64
2.10.5.2	Amélioration des IGBT de forte puissance, l'IEGT.....	66
2.11	Conclusions.....	67
3	<b>L'effet photovoltaïque</b>	
3.1	Introduction.....	69
3.2	Le potentiel solaire.....	70
3.3	Rayonnement solaire.....	70
3.4	Rôle de l'atmosphère.....	71
3.5	La notion Masse d'air (AM).....	72
3.6	Les conditions Standard (STC).....	73
3.7	Le spectre solaire.....	73
3.8	Principe de l'effet photovoltaïque.....	74
3.8.1	La cellule photovoltaïque.....	74
3.8.2	Procédé de fabrication.....	75
3.8.3	La caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	75
3.8.4	Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque.....	76

3.8.5	Les différents types de cellules photovoltaïques.....	77
3.8.5.1	Les cellules mono- cristallines.....	77
3.8.5.2	Les cellules poly-cristallines.....	77
3.8.5.3	Les cellules amorphes.....	78
3.8.6	La conversion photovoltaïque.....	80
3.8.7	Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	81
3.8.7.1	Les cellules solaires.....	81
3.8.7.2	Les modules.....	81
3.8.7.3	Le générateur photovoltaïque.....	81
3.8.7.4	Dimensionnement du générateur.....	82
3.9	Les différents paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	82
3.9.1	La courbe courant-tension.....	82
3.9.2	Tension de circuit ouvert $V_{CO}$ .....	83
3.9.3	Courant de court-circuit $I_{CC}$ .....	83
3.9.4	Le point de fonctionnement optimal (PPM).....	83
3.9.5	Facteur de forme.....	83
3.9.6	Le rendement.....	84
3.10	Caractéristique P-V d'une cellule photovoltaïque.....	84
3.11	Conclusions.....	85
4	<b>Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque</b>	
4.1	Introduction.....	87
4.2	La modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	87
4.2.1	Cas idéal.....	87
4.2.2	Cas réel.....	88
4.3	Caractéristique I – V d'une cellule photovoltaïque.....	90
4.4	Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	91
4.4.1	Courant de court circuit $I_{CC}$ .....	91
4.4.2	Tension en circuit ouvert $V_{CO}$ .....	91
4.4.3	Facteur de forme FF.....	92
4.4.4	Rendement ( $\eta$ ).....	92
4.5	Groupement des cellules photovoltaïques.....	92
4.5.1	Module photovoltaïque.....	92

---

4.5.2	Champ photovoltaïque.....	93
4.6	Facteurs limitatifs du rendement.....	94
4.6.1	Influence du flux.....	94
4.6.2	Influence de la température.....	96
4.6.3	Influence de la résistance série $R_S$ .....	98
4.6.4	Influence de la résistance parallèle $R_P$ .....	100
4.7	Conclusions.....	102
5	<b>Performances des composants électroniques utilisés dans la conversion d'énergie électrique</b>	
5.1	Introduction.....	104
5.2	Transformation d'énergie électrique.....	104
5.3	Le système photovoltaïque.....	105
5.4	Les types de systèmes photovoltaïques.....	105
5.4.1	Systèmes autonomes.....	105
5.4.2	Systèmes hybrides.....	105
5.4.3	Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	106
5.5	Avantages et inconvénients du système photovoltaïque.....	106
5.5.1	Les avantages.....	106
5.5.2	Les inconvénients.....	106
5.6	Les convertisseurs statiques d'énergie électrique.....	107
5.7	Les différents types de convertisseurs statiques.....	108
5.7.1	Le convertisseur alternatif – continu (redresseur).....	108
5.7.2	Le convertisseur continu – continu (hacheur).....	109
5.7.3	Le convertisseur continu- alternatif (Onduleur).....	109
5.7.4	Le convertisseur alternatif – alternatif (gradateur).....	109
5.8	Avantages de l'électricité solaire photovoltaïque.....	109
5.9	Historique du développement.....	111
5.10	Potentiel de l'électricité photovoltaïque à long terme.....	112
5.11	Simulation des convertisseurs.....	113
5.11.1	Simulation d'un hacheur.....	113
5.11.2	Simulation d'un gradateur monophasé.....	115
5.11.3	Simulation d'un onduleur monophasé.....	117

<b>5.12</b>	Conclusions.....	<b>119</b>
<b>6</b>	<b>Conclusions générales</b>	
<b>6.1</b>	Conclusion générales.....	<b>121</b>
	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>123</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b>	Les différents types des matériaux et leurs conductivités.....	<b>21</b>
<b>Figure 1.2</b>	Évolution des orbitales atomiques de <i>S</i> et de <i>P</i> dans des bandes de valence et de conduction dans un semi-conducteur .....	<b>22</b>
<b>Figure 1.3</b>	Gap du matériau.....	<b>23</b>
<b>Figure 1.4</b>	Gap direct et indirect dans les semi-conducteurs.....	<b>23</b>
<b>Figure 1.5</b>	Gap des différents matériaux semi-conducteurs à 300 °K.....	<b>24</b>
<b>Figure 1.6</b>	Bandes d'énergie pour les différents types de matériaux .....	<b>25</b>
<b>Figure 1.7</b>	La création d'une paire électron- trou dans un semi-conducteur.....	<b>26</b>
<b>Figure 1.8</b>	Création d'une paire électron-trou par l'absorption d'un photon.....	<b>29</b>
<b>Figure 1.9</b>	Le courant dans un semi-conducteur.....	<b>30</b>
<b>Figure 1.10</b>	Concentration du silicium et du germanium en fonction de la température.....	<b>31</b>
<b>Figure 1.11</b>	Variation de la bande interdite du silicium et du germanium en fonction de la température.....	<b>32</b>
<b>Figure 1.12</b>	Position du niveau donneur dans un semi-conducteur.....	<b>33</b>
<b>Figure 1.13</b>	Position du niveau accepteur dans un semi-conducteur.....	<b>34</b>
<b>Figure 2.1</b>	Symbole et structure de la diode.....	<b>39</b>
<b>Figure 2.2</b>	Polarisation d'une diode en direct et en inverse.....	<b>40</b>
<b>Figure 2.3</b>	Propriétés d'une diode.....	<b>41</b>
<b>Figure 2.4</b>	Caractéristique courant-tension d'une diode.....	<b>42</b>
<b>Figure 2.5</b>	Caractéristique dynamique d'une diode.....	<b>43</b>
<b>Figure 2.6</b>	Symbole et caractérisation d'une diode idéale.....	<b>44</b>
<b>Figure 2.7</b>	Caractéristiques d'une diode Schottky et d'une diode jonction PN.	<b>45</b>
<b>Figure 2.8</b>	Symbole et structure du transistor bipolaire.....	<b>46</b>
<b>Figure 2.9</b>	Caractéristiques électriques d'un transistor bipolaire <i>NPN</i> en montage émetteur commun.....	<b>47</b>
<b>Figure 2.10</b>	Symbole et structure d'un thyristor.....	<b>48</b>
<b>Figure 2.11</b>	Caractéristique courant-tension statique d'un thyristor.....	<b>49</b>
<b>Figure 2.12</b>	Principe d'amorçage d'un thyristor par la gâchette.....	<b>50</b>
<b>Figure 2.13</b>	Temps de croissance pendant l'amorçage du thyristor.....	<b>50</b>
<b>Figure 2.14</b>	Structure et symbole du GTO.....	<b>52</b>
<b>Figure 2.15</b>	Caractéristique du GTO.....	<b>52</b>
<b>Figure 2.16</b>	Commande du thyristor par le courant de gâchette.....	<b>53</b>
<b>Figure 2.17</b>	Structurer et symbole du MOS à enrichissement.....	<b>54</b>
<b>Figure 2.18</b>	Coupe transversale d'un thyristor NMOS.....	<b>54</b>
<b>Figure 2.19</b>	Caractéristiques de base d'un transistor MOS à canal N.....	<b>55</b>
<b>Figure 2.20</b>	Symbole et structure du MOSFET.....	<b>56</b>
<b>Figure 2.21</b>	Symbole du BJT.....	<b>57</b>
<b>Figure 2.22</b>	Structure d'IJBT.....	<b>58</b>
<b>Figure 2.23</b>	Symbole d'IGBT.....	<b>58</b>

<b>Figure 2.24</b>	Aire de sécurité d'un composant de puissance.....	<b>60</b>
<b>Figure 2.25</b>	Domaine d'application de différents dispositifs de commutation.....	<b>60</b>
<b>Figure 2.26</b>	Performances des composants électroniques.....	<b>61</b>
<b>Figure 2.27</b>	Caractéristique améliorée des transistors CoolMOS.....	<b>65</b>
<b>Figure 2.28</b>	Caractéristique améliorée des transistors CoolMOS.....	<b>65</b>
<b>Figure 2.29</b>	Structure du MOSFET et IEGT.....	<b>66</b>
<b>Figure 3.1</b>	Rayonnement solaire reçu par la terre.....	<b>70</b>
<b>Figure 3.2</b>	Courbes électromagnétiques du Soleil et de la Terre.....	<b>72</b>
<b>Figure 3.3</b>	La notion de masse d'air.....	<b>72</b>
<b>Figure 3.4</b>	Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère (AM <sub>0</sub> ) et à l'incidence 48° (AM <sub>1,5</sub> ) .....	<b>73</b>
<b>Figure 3.5</b>	Schéma représentatif d'une cellule photovoltaïque alimentant une charge.....	<b>74</b>
<b>Figure 3.6</b>	Différentes étapes de la production d'un module photovoltaïque.....	<b>75</b>
<b>Figure 3.7</b>	Rendement théorique maximal des semi-conducteurs à AM <sub>0</sub> et sans recombinaison.....	<b>77</b>
<b>Figure 3.8</b>	Evolution temporelle des coûts de fabrication des modules (1993- 2012) en Europe.....	<b>78</b>
<b>Figure 3.9</b>	Production mondiale de cellules par technologie MWc (2004- 2008).....	<b>79</b>
<b>Figure 3.10</b>	Champ photovoltaïque de N <sub>S</sub> modules en séries et de N <sub>P</sub> branches en parallèles.....	<b>82</b>
<b>Figure 3.11</b>	Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.....	<b>83</b>
<b>Figure 3.12</b>	Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque.....	<b>84</b>
<b>Figure 4.1</b>	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéal.....	<b>88</b>
<b>Figure 4.2</b>	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	<b>89</b>
<b>Figure 4.3</b>	Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	<b>90</b>
<b>Figure 4.4</b>	L'influence du flux sur la caractéristique I - V de la cellule photovoltaïque à une température constante 25°C.....	<b>94</b>
<b>Figure 4.5</b>	L'influence du flux sur la caractéristique P - I de la cellule photovoltaïque à une température constante 25°C.....	<b>95</b>
<b>Figure 4.6</b>	L'influence du flux sur la caractéristique P - V de la cellule photovoltaïque à une température constante 25°C.....	<b>95</b>
<b>Figure 4.7</b>	L'influence de la température sur la caractéristique I - V de la cellule photovoltaïque sous un éclairement fixe E =1000W/m <sup>2</sup> .....	<b>96</b>
<b>Figure 4.8</b>	L'influence de la température sur la caractéristique P - V de la cellule photovoltaïque sous un éclairement fixe E =1000W/m <sup>2</sup> .....	<b>97</b>
<b>Figure 4.9</b>	L'influence de la température sur la caractéristique P - I de la cellule photovoltaïque sous un éclairement fixe E =1000W/m <sup>2</sup> .....	<b>97</b>

<b>Figure 4.10</b>	L'influence de la résistance en série sur la caractéristique I - V de la cellule photovoltaïque sous un éclairement $E = 1000 \text{ W/m}^2$ et à une température $T=25^\circ\text{C}$ .....	<b>98</b>
<b>Figure 4.11</b>	L'influence de la résistance en série sur la caractéristique P - I de la cellule photovoltaïque sous un éclairement $E = 1000 \text{ W/m}^2$ et à une température $T=25^\circ\text{C}$ .....	<b>99</b>
<b>Figure 4.12</b>	L'influence de la résistance en série sur la caractéristique P - V de la cellule photovoltaïque sous un éclairement $E = 1000 \text{ W/m}^2$ et à une température $T=25^\circ\text{C}$ .....	<b>99</b>
<b>Figure 4.13</b>	L'influence de la résistance en parallèle sur la caractéristique I - V de la cellule photovoltaïque sous un éclairement $E = 1000 \text{ W/m}^2$ et à une température $T=25^\circ\text{C}$ .....	<b>100</b>
<b>Figure 4.14</b>	L'influence de la résistance en parallèle sur la caractéristique P - I de la cellule photovoltaïque sous un éclairement $E = 1000 \text{ W/m}^2$ et à une température $T=25^\circ\text{C}$ .....	<b>101</b>
<b>Figure 4.15</b>	L'influence de la résistance en parallèle sur la caractéristique P-V de la cellule photovoltaïque sous un éclairement $E = 1000 \text{ W/m}^2$ et à une température $T=25^\circ\text{C}$ .....	<b>101</b>
<b>Figure 5.1</b>	La position d'un convertisseur.....	<b>108</b>
<b>Figure 5.2</b>	Les différents convertisseurs statiques.....	<b>108</b>
<b>Figure 5.3</b>	Gaz à effet de serre (en grammes d'équivalent $\text{CO}_2$ par kilowattheure produit).....	<b>110</b>
<b>Figure 5.4</b>	L'évolution de la capacité photovoltaïque installée en Europe et dans le monde.....	<b>112</b>
<b>Figure 5.5</b>	Capacité mondiale cumulée jusqu'en 2030 – Scénario avancé.....	<b>112</b>
<b>Figure 5.6</b>	Schéma du montage (simulation d'un hacheur).....	<b>113</b>
<b>Figure 5.7</b>	Courbes obtenues par simulation (hacheur) montrant la variation de $V_{Tr}$ , $V_C$ , $I_L$ en fonction du temps.....	<b>114</b>
<b>Figure 5.8</b>	Schéma du montage (simulation d'un gradateur monophasé).....	<b>115</b>
<b>Figure 5.9</b>	Courbes obtenues par simulation (gradateur monophasé) montrant la variation de $U_{Source}$ , $U_{Charge}$ et $I_{Charge}$ en fonction du temps.....	<b>116</b>
<b>Figure 5.10</b>	Schéma du montage (simulation d'un onduleur monophasé).....	<b>117</b>
<b>Figure 5.11</b>	Courbes obtenues par simulation (onduleur monophasé) montrant la variation de $U_S$ , $U_{Ch}$ et $I_{Ch}$ en fonction du temps.....	<b>118</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b>	Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température.....	<b>31</b>
<b>Tableau 1.2</b>	Les valeurs de la mobilité de quelques semi-conducteurs.....	<b>35</b>
<b>Tableau 2.1</b>	Comparaison entre les composants électroniques.....	<b>62</b>
<b>Tableau 3.1</b>	Rendement et domaines d'application de diverses cellules photovoltaïques.....	<b>79</b>

## **Introduction générale**

Aujourd'hui, l'intensité des problèmes de pollution et d'épuisement des ressources naturelles, et l'accroissement mondial de la consommation de l'énergie, confirment l'urgence de réduire cette dernière et la recherche d'autres sources d'énergies qui respectent l'environnement.

Le solaire photovoltaïque, source d'énergie verte par excellence est l'exploitation directe de l'énergie solaire pour la production de l'électricité par l'effet photovoltaïque et qui représente une nécessité économique et écologique.

Les problèmes majeurs du solaire photovoltaïque sont le faible taux de rendement et le coût élevé des installations, mais les problèmes de changement climatique sont venus modifier cette perspective au cours de la dernière décennie. L'alarme a été sonnée par les problèmes environnementaux liés à l'accumulation de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>): il y a désormais urgence à mettre au point de nouvelles technologies non polluantes.

Le système photovoltaïque est une source d'énergie verte sûre, fiable, sans entretien et non polluante.

Un système photovoltaïque est constitué d'un générateur, des charges à alimenter. Ces charges sont de type charge à courant continu ou à courant alternatif.

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes.

Le premier chapitre présente les différents types de matériaux (conducteur, semi-conducteur, isolant) et leur classification en fonction de leur conductivité et la hauteur de la bande interdite.

On s'est basé sur les semi-conducteurs pour montrer comment un semi-conducteur conduit le courant électrique, la création des porteurs de charge (électron, trou) et en quoi un semi-conducteur se distingue d'un métal. Ainsi que l'influence de la température, l'éclairement et le dopage sur la conductivité des semi-conducteurs.

Dans Le second chapitre on présente les principaux composants électroniques utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance (symboles, caractéristiques, principe de fonctionnement ...etc.).Ces composants semi-conducteurs doivent fonctionner en interrupteurs.

Le troisième chapitre a été réservé à l'effet photovoltaïque qui est la transformation directe de la lumière en électricité, au moyen des cellules photovoltaïques. Cette partie présente le Procédé de fabrication, les types et les caractéristiques des cellules photovoltaïques.

Le quatrième chapitre présente la modélisation d'un élément important dans un générateur photovoltaïque qui est la cellule photovoltaïque et les influences de l'éclairement, la température et la résistance en série et la résistance en parallèle sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque.

Le cinquième chapitre est consacré à la simulation des différents convertisseurs qui sont appliqués à la conversion de l'énergie électrique.

Les convertisseurs fonctionnant en commutation (interrupteurs), permettent par des séquences convenables de fonctionnement, un transfert d'énergie entre un générateur et un récepteur et possédant des caractéristiques différentes.

## **Chapitre 1**

# **PRINCIPE DE LA CONDUCTIVITÉ DES SEMI-CONDUCTEURS**

## **Principe de la conductivité des semi-conducteurs**

### **1.1 Introduction**

Il y a trois types de matériaux en fonction de leur conductivité :

- ✓ Les conducteurs, leur conductivité de  $10^2$  à  $10^6 \text{ S/m}$  , une partie de ces électrons possèdent une énergie suffisante pour se libérer presque totalement des forces d'interaction avec le réseau. Ces électrons libres sont les électrons de conduction des métaux. Leur niveau d'énergie est situé dans la bande de conduction,
- ✓ Les isolants, leur conductivité de  $10^{-16}$  à  $10^{-8} \text{ S/m}$  , Tous les électrons des isolants sont fortement liés aux atomes du cristal. L'énergie nécessaire pour les libérer est très élevée en particulier devant l'énergie thermique ou électrostatique qu'on peut fournir en élevant la température ou en appliquant un champ électrique. Leur mobilité est nulle,
- ✓ Les semi-conducteurs, leur conductivité de  $10^{-6}$  à  $10^2 \text{ S/m}$  , les semi-conducteurs sont des matériaux présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les conducteurs et les isolants.

Ce chapitre décrit comment un semi-conducteur conduit un courant électrique et en quoi il se distingue d'un métal. Et l'influence de la température, l'éclairement et le dopage sur la conductivité des semi-conducteurs.

### **1.2 Variation de la conductivité des semi-conducteurs**

La conductivité électrique des semi-conducteurs peut varier de façon considérable en fonction de :

- ✓ la température,
- ✓ l'éclairement,
- ✓ la présence d'impuretés (dopage).

On peut classifier les matériaux en conducteurs, semi-conducteurs et isolants par la largeur de leur bande interdite.

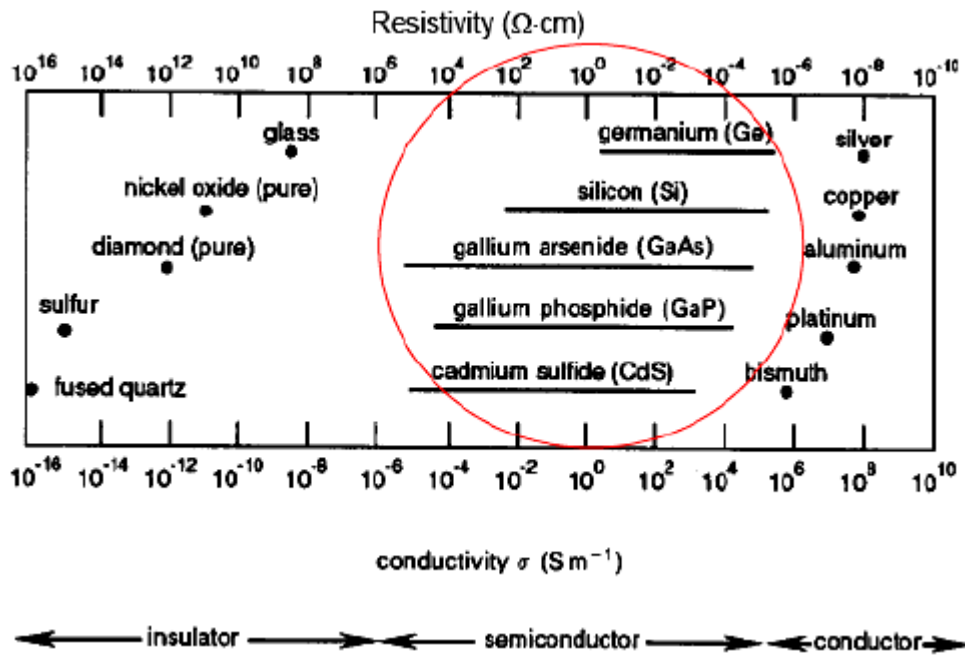


Figure 1.1 : Les différents types des matériaux et leur conductivité.

### 1.3 Structure des bandes d'énergies

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons. On distingue :

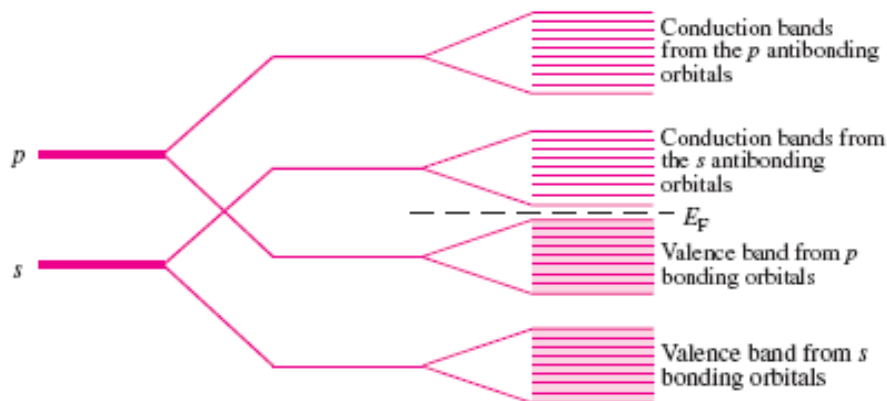
- ✓ Les électrons internes qui occupent les couches internes et qui sont très fortement liés au noyau,
- ✓ Les électrons périphériques (ou de valence) qui occupent la couche la plus externe et qui sont peu liés au noyau.

Les électrons de l'atome sont assujettis à occuper des niveaux discrets  $E_1, E_2, \dots, E_n$  qui définissent chacun une couche électronique. Plus le niveau est élevé, plus la couche qui lui correspond est éloignée du noyau. Si on choisit comme origine des énergies ( $E = 0 \text{ eV}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ ) celle d'un électron soustrait à l'influence du noyau (c'est-à-dire porté à une distance infinie), toutes les valeurs de  $E_n$  sont négatives. Cela se traduit par le fait qu'il faut produire un travail pour éloigner un électron.

Le cristal est constitué d'un ensemble d'atomes dont les noyaux sont répartis dans l'espace de façon régulière. La cohésion des atomes est assurée par la mise en commun des électrons de valence pour former des liaisons dites de covalente.

Les états énergétiques possibles des électrons du cristal sont représentés par un diagramme analogue à celui de l'atome. Mais du fait de l'interaction des atomes, les niveaux d'énergie se transforment en bandes d'énergie séparés par des bandes interdites. Comme dans le cas de l'atome, le nombre d'électrons susceptibles d'occuper une bande d'énergie est limité et les électrons du solide comblent en priorité les états d'énergie les plus faibles.

Un électron dont l'énergie est située dans une bande en dessous de la bande de valence est lié à un atome donné du solide. Dans la bande de valence, l'électron est commun à plusieurs atomes. La bande située au-dessus de la bande interdite s'appelle la bande de conduction. L'électron dont l'énergie est comprise dans cette bande circule librement dans le solide. C'est un porteur de charge qui participe à l'écoulement du courant dans le solide lorsque ce dernier est sous différence de potentiel.

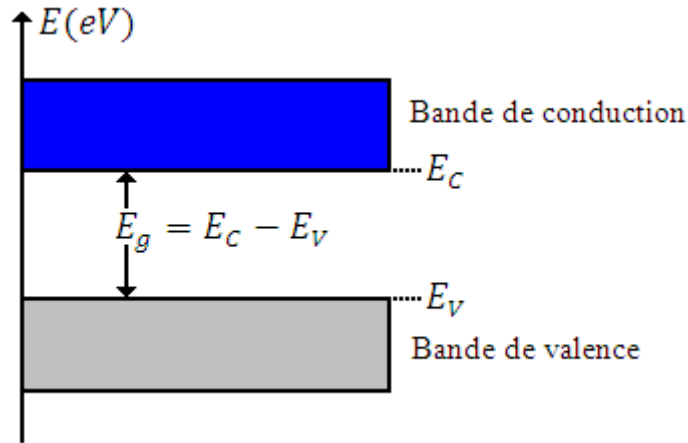


**Figure 1.2 :** Évolution des orbitales atomiques de *S* et de *P* dans des bandes de valence et de conduction dans un semi-conducteur [28].

Chaque type de matériau présente une hauteur de bande interdite de lui propre, cette différence d'énergie, qui joue un rôle fondamental, permet de distinguer les matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs.

### 1.3.1 La notion de gap

L'écart entre les bandes de valence et les bandes de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des matériaux.



**Figure 1.3 :** Gap du matériau.

L'énergie de la bande interdite  $E_g$  est la différence entre le niveau énergétique le plus bas de la bande de conduction et le niveau le plus haut de la bande de valence.

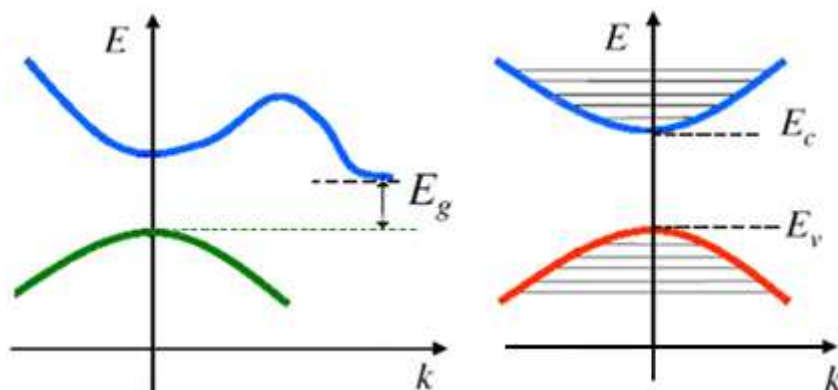
Chaque matériau possède un gap  $E_g$  fixe à une température donnée, et selon la nature du gap il y a deux types de semi-conducteur :

### 1.3.2 Semi-conducteur à gap direct

Un semi-conducteur dit à gap direct, lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace K (correspondent à la même valeur d'impulsion). C'est le cas de GaAs.

### 1.3.3 Semi-conducteur à gap indirect

Un semi-conducteur dit à gap indirect, lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence ne coïncident pas dans l'espace K (ne correspondent pas à la même valeur d'impulsion). C'est le cas de Si, Ge.



**Figure 1.4 :** Gap direct et indirect dans les semi-conducteurs.

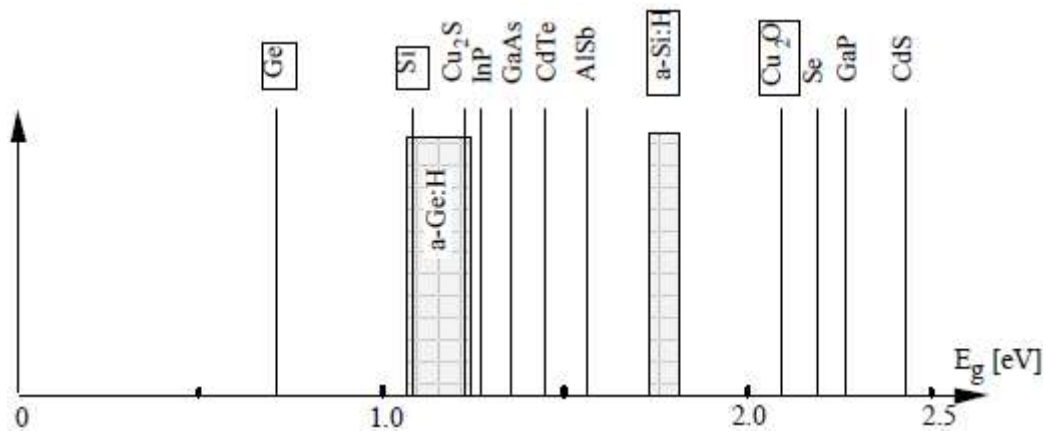


Figure 1.5 : Le gap de différents matériaux semi-conducteurs à 300 °K.

## 1.4 Types de matériaux

Suivant la valeur du gap ( $E_g$ ) le matériau peut être :

- ✓ Conducteur, dans ce matériau les liaisons chimiques n'utilisent pas tous les électrons de la couche périphérique. Ceux qui sont excédentaires sont alors libres de circuler et se déplacent naturellement dans la bande de conduction (même à 0 °K). Ceci traduit par un gap nul ou négatif : les bandes de conduction et de valence se chevauchent,
- ✓ Isolant, possède un gap élevé. Tous les électrons de la couche périphérique sont utilisés dans les liaisons chimiques covalentes. A la température de 0 °K, il n'y a pas d'électrons dans la bande de conduction. Une élévation de température peut toutefois apporter l'énergie nécessaire au passage de certains électrons dans la bande de conduction, mais à température ambiante, cette probabilité est très faible, et le matériau reste isolant,
- ✓ Semi-conducteur, possède un faible gap. Il est parfaitement isolant à 0 °K, mais devient progressivement conducteur lorsque la température augmente ou par apport d'énergie sous forme quelconque (lumière ou chauffage). Il reste proche de l'isolant à température ambiante ; on parle alors de semi-conducteur intrinsèque.

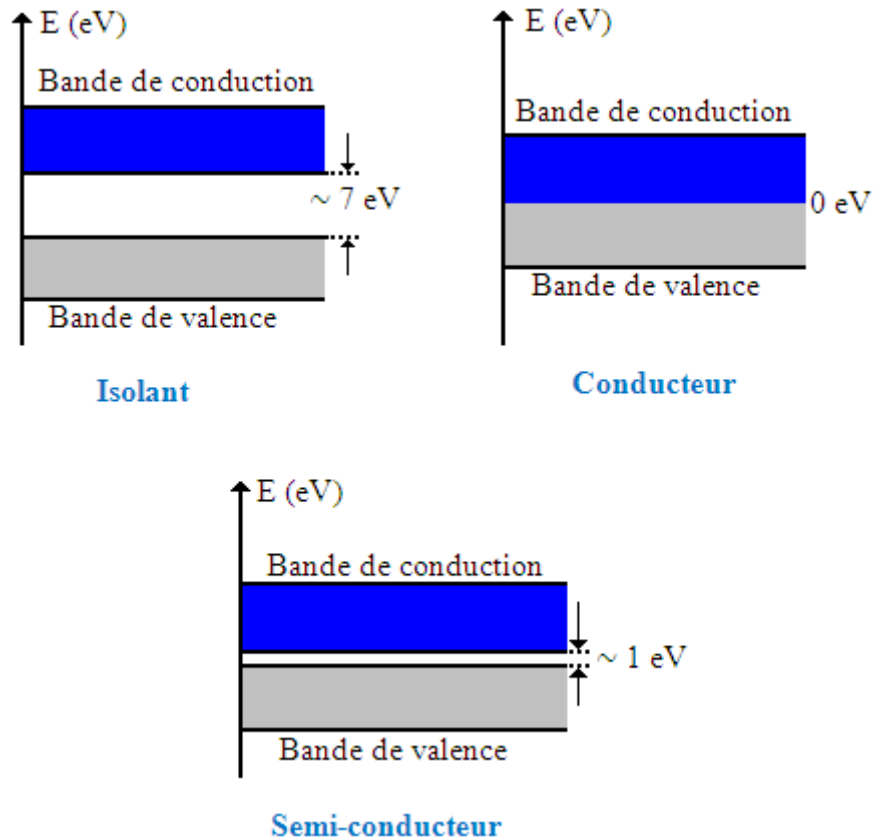


Figure 1.6 : Bandes d'énergie pour les différents types de matériaux.

## 1.5 Types de semi-conducteurs

Du point de vue chimique, on peut généralement distinguer deux grandes catégories de matériaux semi-conducteurs :

### 1.5.1 Les semi-conducteurs élémentaires

Sont les cristaux constitués d'un seul élément chimique. Les deux éléments les plus importants pour l'électronique sont le silicium (Si) et le germanium (Ge).

### 1.5.2 Les semi-conducteurs composés

Sont constitués de plusieurs éléments par exemple :

Les composés binaires sont constitués de deux éléments distincts de la colonne IV (*SiC, SiGe*), d'éléments des colonnes III et V (composés III-V tels que le *GaAs* et le *GaN*) ou encore des éléments des colonnes II et VI (composés II-VI tels que le *ZnS* et le *CdS*). Enfin, on peut également trouver des alliages de types ternaires (*AlGaAs*) et quaternaire (*GaInAsP*).

### 1.5.3 Les semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique.

Dans un cristal de silicium intrinsèque, les atomes constitutifs ont quatre électrons périphériques. La couche de valence peut contenir huit électrons, elle n'est donc pas saturée. Dans le cristal, un atome donné met ses électrons en commun avec les quatre atomes voisins pour établir des liaisons covalentes. Une liaison résulte ainsi de la mise en commun de deux électrons issus de deux atomes voisins. Les électrons sont attirés par les deux noyaux et sont donc liés. On peut dire que dans le cristal, un atome donné est entouré de huit électrons liés, ce qui sature sa couche de valence.

A une température proche du zéro absolu, les quatre électrons de valence des atomes participent aux liaisons covalentes. Aucun électron n'est disponible pour la conduction électrique. Le cristal est alors un isolant électrique.

#### 1.5.3.1 Ionisation thermique

Lorsque la température augmente, certaines liaisons se brisent et libèrent des électrons dans le cristal, les électrons libérés deviennent des porteurs de charge libres.

L'atome qui a perdu un électron devenu un ion positif et la liaison covalente non satisfaite est appelée trou. Les trous sont des porteurs de charge (positive) libres.

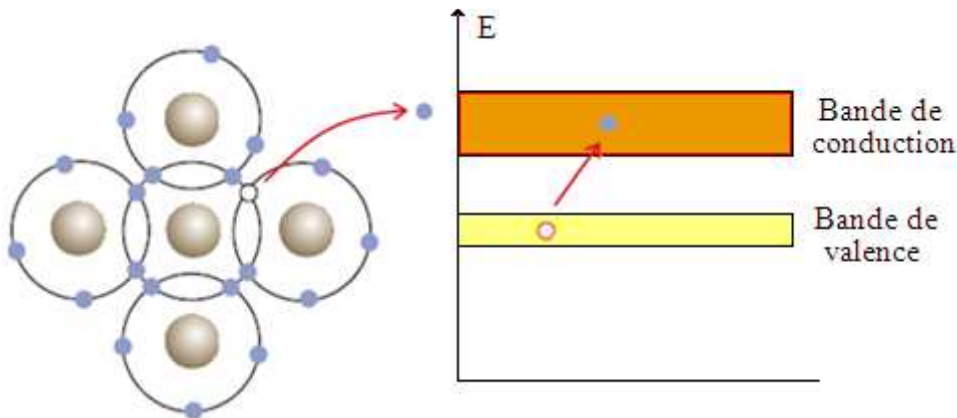


Figure 1.7 : La création d'une paire électron-trou dans un semi-conducteur.

Sous l'effet du champ électrique les électrons (charge négative) se déplacent dans le sens inverse du champ, les trous (charge positive) se déplacent dans le sens du champ. Autorisant la circulation d'un courant électrique.

La concentration intrinsèque en électrons libres  $n_i$  et en trous libres  $p_i$  par  $cm^{-3}$  à la température  $T$ , et varie de la façon suivante avec la température :

$$n_i = p_i = A T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad (1.1)$$

Avec

$A$  : constante propre au matériau. Pour le Silicium  $A = 7,3 \cdot 10^{15} cm^{-3} \cdot K^{-\frac{3}{2}}$ ,

$K$  : constante de Boltzmann  $K = 1,38 \cdot 10^{-23} J/^{\circ}K$ ,

$E_g$ : l'énergie du gap. Pour le Silicium  $E_g = 1,12 eV$  à  $T = 300^{\circ}K$ .

### 1.5.3.2 Recombinaison

Dans un semi-conducteur à l'équilibre thermique, il se produit en permanence un processus de génération de paire électron-trou par agitation thermique. Cependant il existe aussi le processus inverse, un électron se recombine avec un trou, c'est la recombinaison. À l'équilibre thermique les deux processus s'équilibrent de façon à ce que la concentration en porteurs libres reste constante.

En effet, un électron libre, arrivant, lors de son déplacement dans le cristal, à proximité d'un ion positif peut être capturé par ce dernier afin de satisfaire sa liaison de covalence (trou libre). La liaison de covalence est alors rétablie.

Lorsque l'électron descend de la bande de conduction vers la bande de valence, le semi-conducteur restitue l'énergie sous forme de chaleur ou émet de la lumière (photon). Le photon émis a une énergie  $E_{ph}$  égale à  $E_g$  selon :

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

$$\lambda \cdot E_g = h \cdot c \quad (1.3)$$

$$\lambda(\mu m) \cdot E_g(eV) = 1.24 \quad (1.4)$$

Avec

$\lambda$  : longueur d'onde,

$h$  : constante de Planck,

$c$  : vitesse de la lumière.

En sens inverse, un photon qui possède une énergie supérieure ou égale à  $E_g$  a la pouvoir de générer une paire électron-trou.

### 1.5.3.3 Concentration des porteurs dans le semi-conducteur intrinsèque

A l'équilibre thermique la densité des porteurs libres ; d'électrons  $n$  dans la bande de conduction ( $n$  électrons.  $\text{cm}^{-3}$ ) et les trous  $p$  dans la bande de valence ( $p$  trous.  $\text{cm}^{-3}$ ), s'exprime selon la loi :

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{KT}\right) \quad (1.5)$$

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{KT}\right) \quad (1.6)$$

Où :

$N_c$  et  $N_v$  sont respectivement la densité effective d'état des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'état des trous dans la bande de valence.

A température constante, la concentration en électrons libres  $n$  et en trous libres  $p$  sont égales à  $n_i$  la concentration intrinsèque ( $n = p = n_i$ ), donc on obtient l'expression suivante, pour la concentration intrinsèque des porteurs et le niveau de Fermi intrinsèque :

$$n_i = (N_c N_v)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad (1.7)$$

$$E_F = \frac{1}{2}(E_v + E_c) + \frac{3}{4}KT \log \frac{m_h}{m_e} \quad (1.8)$$

D'après l'expression précédente, le niveau de Fermi intrinsèque  $E_F$  est toujours très proche du centre de la bande interdite.

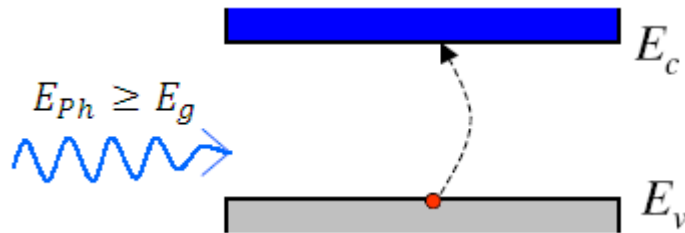
### 1.5.3.4 Interaction entre lumière - semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie

minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du "band gap",  $E_g$ .

Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera une partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule.

Un photon absorbé par un semi-conducteur, permet la création d'une paire électron-trou.



**Figure 1.8 :** La création d'une paire électron-trou par l'absorption d'un photon.

La création d'une paire électron-trou, ne peut avoir lieu que pour les photons ayant une énergie supérieure ou égale à l'énergie  $E_g$ . Il existe trois situations différentes, selon la différence d'énergie entre le photon et le gap du semi-conducteur :

- ✓ Si  $E_{ph} < E_g$  : le photon a une énergie insuffisante. Il est soit, réfléchi ou absorbé ailleurs, dans un autre milieu. Dans ce cas, l'énergie du photon est perdue,
- ✓ Si  $E_{ph} = E_g$  : le photon est absorbé et il génère une paire électron-trou,
- ✓ Si  $E_{ph} > E_g$  : le photon est absorbé, une seule paire électron-trou est générée et l'excès d'énergie est transformé en chaleur (thermalisation),
- ✓ Si  $E_{ph} \gg E_g$  : le photon peut créer une paire électron-trou dont l'électron libéré possède une grande énergie cinétique  $E_c$ . Un tel électron pourrait encore, avant de thermaliser, entrer en collision avec un deuxième électron et générer ainsi une paire électron-trou,

L'énergie transmise aux électrons soit une énergie potentielle et non une énergie thermique.

Donc, l'interaction photon-semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie la conductivité du matériau.

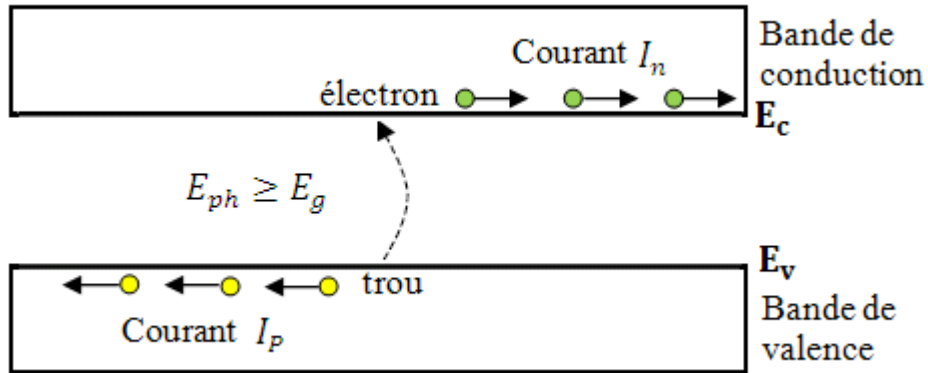


Figure 1.9 : Le courant dans un semi-conducteur.

### 1.5.3.5 Effet de la température sur la conductivité des semi-conducteurs

Dans un cristal d'un semi-conducteur intrinsèque la bande de valence est pleine et la bande de conduction est vide à 0 °K. Elevons ce cristal à la température ambiante (300 °K), la hauteur de bande interdite  $E_g$  est du même ordre de grandeur que  $KT$ . Sous l'action de l'agitation thermique, des électrons migrent dans la bande de conduction et il se forme des trous dans la bande de valence. Sous l'action d'un champ électrique, les électrons situés dans le bas de la bande de conduction et les trous situés dans le haut de la bande de valence peuvent acquérir un mouvement collectif : le solide devient conducteur.

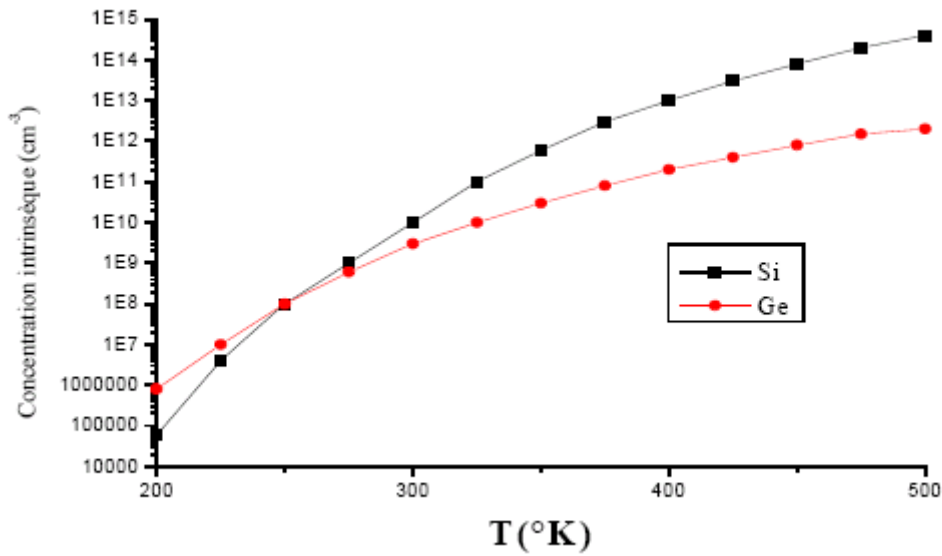
La concentration intrinsèque  $n_i$  en électrons libres et en trous libres  $p_i$  par  $cm^{-3}$  dépend de la hauteur de la bande interdite  $E_g$  et de la température  $T$  selon la loi :

$$n_i = p_i = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad (1.9)$$

Avec

$A$  : Constante du matériau.

$K$  : Constante de Boltzman ( $8,6 \cdot 10^{-5}$  eV/°K).



**Figure 1.10** : Concentration du Si et du Ge en fonction de la température.

La hauteur de la bande interdite donne des caractéristiques électroniques importantes à chaque semi-conducteur. La hauteur de la bande interdite dépend de la température et peut être donnée par la formule empirique proposée originellement par Varshni et théoriquement par Lautenschlager :

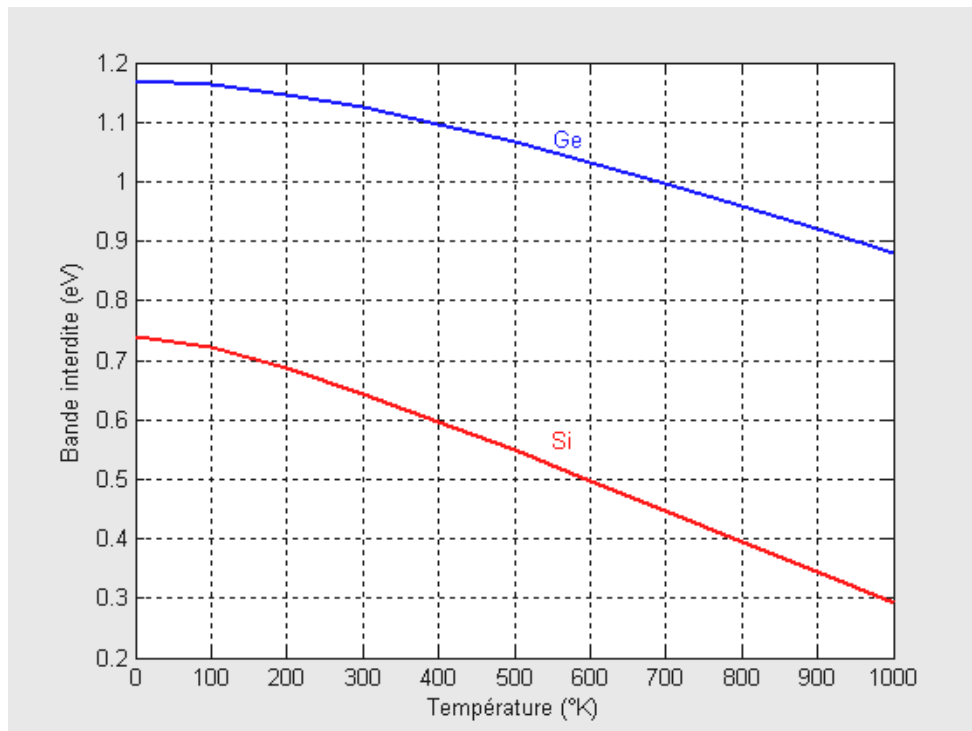
$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (1.10)$$

Où :

$\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres du matériau.

Semi-conducteur	$E_g(T = 0^\circ K) eV$	$\alpha \cdot 10^{-4} \cdot eV/^\circ K$	$\beta \cdot ^\circ K$
Si	1,17	4,730	636
Ge	0,74	5,405	235
GaAs	1,52	5,405	204

**Tableau 1.1** : Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température.



**Figure 1.11 :** Variation de la bande interdite du Si et Ge en fonction de la température.

Le courant électrique est transporté à la fois par les électrons et par les trous. A une température  $T$  donnée, les deux types de porteurs sont animés d'une agitation thermique et subissent des collisions (à température ambiante, les collisions sont essentiellement provoquées par les vibrations thermiques du réseau).

Si la température augmente, les collisions sont plus fréquentes, ce qui se traduit par une diminution des mobilités  $\mu_n$  et  $\mu_p$ . Par ailleurs, une augmentation de  $T$  entraîne également la génération de paires électron-trou en nombre important. L'augmentation de  $n$  et  $p$  l'emporte largement sur la diminution des mobilités. Par conséquent, la conductivité électrique augmente et  $\rho$  diminue si  $T$  augmente.

#### 1.5.4 Les semi-conducteurs extrinsèques

Un semi-conducteur extrinsèque c'est un semi-conducteur dopé avec des atomes d'impuretés convenablement choisies. Le dopage va permettre d'amener des charges excédentaires qui amélioreront la conductivité du matériau.

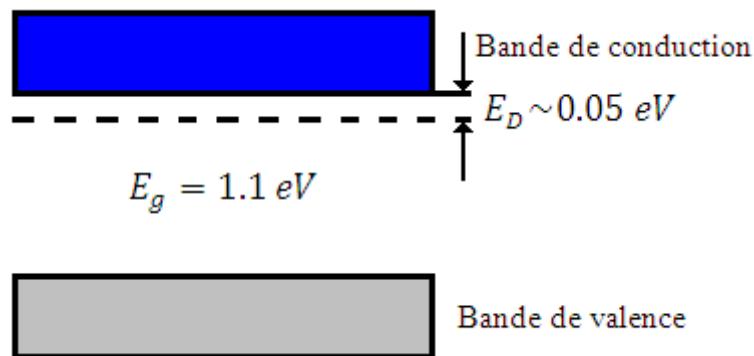
Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques :

### 1.5.4.1 Semi-conducteur dopé n

Un semi-conducteur dopé  $n$  est un matériau dont la concentration en électrons est supérieure à la concentration en trous.

Chaque atome d'un semi-conducteur (silicium ...) est relié à quatre atomes voisins par des liaisons covalentes impliquant deux électrons pour chaque liaison. Si on introduit un atome d'impureté ayant cinq électrons de valence (phosphore, arsenic ou antimoine), cet atome prend la place d'un atome du cristal. A cet atome d'impureté est associé un niveau d'énergie appelé niveau donneur  $E_D$  dans la bande interdite très proche de la bande de conduction.

Quatre des électrons de l'impureté participent aux quatre liaisons avec les quatre atomes voisins du cristal, le 5<sup>ème</sup> électron, inutilisé, est très faiblement lié à l'atome pentavalent. Une très faible énergie suffit pour le libérer et il peut facilement passer dans la bande de conduction. L'atome d'impureté qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur. Il a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe.



**Figure 1.12 :** Position du niveau donneur dans un semi conducteur.

A température ambiante, presque tous les atomes donneurs sont ionisés. Si  $N_D$  est la concentration des atomes donneurs, ceux-ci vont libérer  $n = N_D$  électrons libres.

Les concentrations en électrons libres  $n$  et en trous  $p$  sont liées par la loi d'action de masse :

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (1.11)$$

Pour le cas du silicium dopé au phosphore :

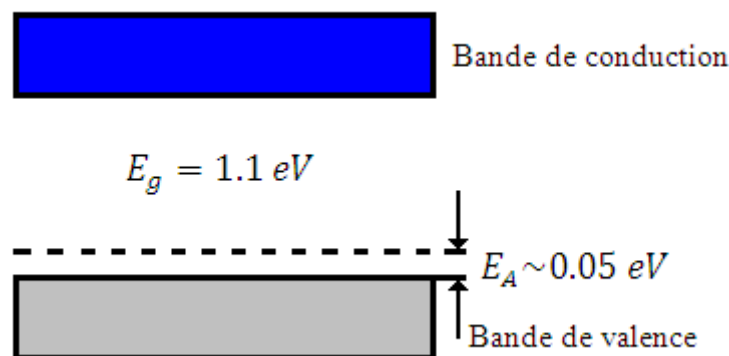
$$N_D = n = 10^{18} \text{ cm}^{-3} \quad \text{et} \quad p = 225 \text{ cm}^{-3} \text{ à } 300^\circ \text{K}.$$

Donc dans un semi-conducteur dopé  $n$ , les électrons sont des porteurs de charge majoritaires et les trous sont des porteurs de charge minoritaires.

#### 1.5.4.2 Semi-conducteur dopé $p$

Un semi-conducteur dopé  $p$  est un matériau dont la concentration en trous est supérieure à la concentration en électrons.

Si on introduit un atome d'impureté trivalent (bore, aluminium ou gallium) dans un semi-conducteur (silicium...), cet atome en se plaçant dans le réseau ne peut saturer que trois liaisons sur quatre avec les quatre atomes du semi-conducteur qui l'entourent. A cet atome d'impureté est associé un niveau d'énergie appelé niveau accepteur  $E_A$  dans la bande interdite très proche de la bande de valence. En fait, les électrons participants aux liaisons sont indiscernables les uns des autres. Tous ce passe alors comme si un des atomes de silicium voisin avait cédé un électron à l'atome trivalent, créant ainsi un trou dans le cristal de silicium qui est libre de circuler dans la bande de valence. L'atome d'impureté qui capte un électron est appelé atome accepteur, il a perdu sa neutralité pour devenir un ion négatif fixe.



**Figure 1.13 :** Position du niveau accepteur dans un semi-conducteur.

A température ambiante, presque tous les atomes accepteurs sont ionisés. Si  $N_A$  est la concentration par  $\text{cm}^{-3}$  des atomes accepteurs, ceux-ci vont libérer  $p = N_A$  trous libres.

Les concentrations en électrons libres  $n$  et en trous libres  $p$  sont liées par la loi d'action de masse :

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (1.11)$$

Pour le cas du silicium dopé au bore :

$$N_A = p = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad \text{et} \quad n = 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3} \text{ à } T = 300^\circ\text{K}.$$

Donc un semi-conducteur dopé  $p$ , les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires.

### 1.6 Le courant dans les semi-conducteurs

Le courant dans le semi-conducteur résulte du déplacement des porteurs de charge, électrons et trous, sous l'action d'un champ électrique (courant de conduction) ou un gradient de concentration (courant de diffusion).

Le courant de conduction est le courant que l'on rencontre lorsqu'on applique au semi-conducteur une différence de potentiel  $V$ , il apparaît dans le semi-conducteur un champ électrique  $E$  qui favorise le déplacement des trous dans le sens du champ électrique et le déplacement des électrons dans le sens opposé.

Les trous et les électrons prennent des vitesses d'ensemble :

$$v_p = \mu_p \cdot E \tag{1.12}$$

$$v_n = \mu_n \cdot E \tag{1.13}$$

Avec

$\mu_p$  : mobilité des trous,

$\mu_n$  : mobilité des électrons.

Mobilité (T = 300°K)	$\mu_n$ (cm <sup>2</sup> . V. s <sup>-1</sup> )	$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> . V. s <sup>-1</sup> )
Ge	3900	1900
Si	1500	475
GaAs	8500	400

**Tableau 1.2 :** Les valeurs de la mobilité de quelques semi-conducteurs.

Ces mobilités dépendent de la température, du champ électrique et du dopage.

A température constante, la densité de courant total  $J_{tot}$  est alors proportionnelle au champ électrique et à la conductivité  $\sigma$  :

$$J_{tot} = q(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)E = \sigma \cdot E \tag{1.14}$$

La conductivité à une température  $T$ , est donnée par :

$$\sigma(T) = q \left( n \cdot \mu_n(T) + p \cdot \mu_p(T) \right) E \quad (1.15)$$

Dans un semi-conducteur non homogène (dopé), les porteurs peuvent aussi déplacer par diffusion. La densité de courant de diffusion des électrons  $J_{Dn}$  en un point d'abscisse  $x$  est proportionnelle au gradient de concentration des électrons :

$$J_{Dn} = q \cdot D_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (1.16)$$

$$D_n = \mu_n \frac{KT}{q} \quad (1.17)$$

Avec

$D_n$  : constante de diffusion des électrons dans le semi-conducteur.

La densité de courant de diffusion des trous  $J_{Dp}$  en un point d'abscisse  $x$  est proportionnelle au gradient de concentration des trous :

$$J_{Dp} = - q \cdot D_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (1.18)$$

$$D_p = \mu_p \frac{KT}{q} \quad (1.19)$$

Lorsque les deux phénomènes existent simultanément, la densité totale de courant pour les électrons et les trous est donnée :

$$J_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E + q D_n \frac{dn}{dx} \quad (1.20)$$

$$J_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E - q D_p \frac{dp}{dx} \quad (1.21)$$

Le courant total s'écrit alors :

$$J_{tot} = J_n + J_p \quad (1.22)$$

## **1.7 Conclusions**

Dans un semi-conducteur d'une part le courant électrique est favorisé par deux types de porteurs de charge, les électrons qui portent une charge négative et les trous qui portent une charge positive et d'autre part la conductivité électrique croit avec l'augmentation de la température contrairement au métal, et elle varie aussi avec l'éclairement et le dopage.

## **Chapitre 2**

# **STRUCTURE PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS**

## Structure physique des semi-conducteurs

### 2.1 Introduction

Les composants électroniques évoluent vers une plus grande diversité et une meilleure adéquation de leur rôle. Durant les dernières années, la technologie des composants de puissance a fait d'énormes progrès principalement par l'élimination des circuits auxiliaires d'aide à la commutation utilisés avec les thyristors conventionnels et l'introduction de nouveaux composants commandables par la gâchette et particulièrement ceux commandés en tension.

Les liaisons entre l'alimentation et la charge sont constituées par des composants semi-conducteurs, qui doivent fonctionner en interrupteur, ces interrupteurs ont un principe de fonctionnement. Ce chapitre présente les principaux composants électroniques utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance, et ces symboles, caractéristiques, principe de fonctionnement, ...

Les semi-conducteurs sont les matériaux de base des composants électroniques.

### 2.2 La diode

#### 2.2.1 Définition

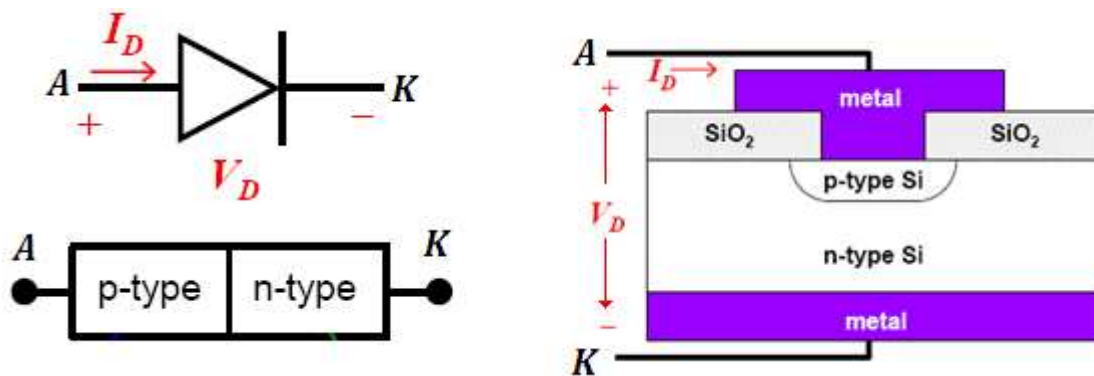


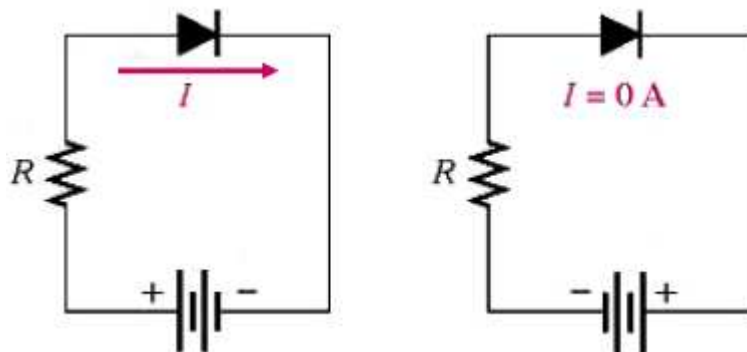
Figure 2.1 : Symbole et structure de la diode.

La diode est un composant formé d'un semi-conducteur (silicium en général), constitué d'une jonction *PN*, possède deux bornes appelées anode (*A*) et cathode (*K*). La diode agit comme un interrupteur automatique ultra-rapide dont les contacts s'ouvrent et se ferment selon les règles suivantes :

**Règle 1 :** Lorsque les bornes de la diode ne sont soumises à aucune tension, la diode se comporte comme un interrupteur ouvert ; le circuit entre les bornes  $A$  et  $K$  est donc ouvert,

**Règle 2 :** Si l'on applique une tension  $E_1$  aux bornes de la diode supérieure au seuil de sorte que l'anode devienne légèrement positive par rapport à la cathode, il s'établit immédiatement un court-circuit entre les bornes  $A$  et  $K$ . La diode agit alors comme un interrupteur fermé et un courant  $I$  commence aussitôt à circuler de l'anode vers la cathode. Et on dit que la diode est passante, et la diode est polarisée dans le sens direct,

Pendant la conduction, il subsiste une faible chute de tension  $e_0$  entre les bornes  $A$  et  $K$  mais, comme celle-ci demeure toujours inférieure à  $1,5 V$ , on peut la négliger dans la plupart des circuits électronique. C'est la faible valeur de cette chute de tension qui permet d'assimiler la diode à un interrupteur fermé lorsqu'elle conduit.



**Figure 2.2 :** Polarisation d'une diode en direct et en inverse.

**Règle 3 :** Aussi longtemps que le courant circule, la diode agit comme interrupteur fermé. Dès que le courant cesse de circuler, la diode reprend son état initial et elle se comporte à nouveau comme un interrupteur ouvert,

**Règle 4 :** Lorsqu'on applique une tension  $E_2$  aux bornes de la diode de sorte que l'anode soit négative par rapport à la cathode, la diode continue à agir comme interrupteur ouvert. Et on dit que la diode est bloquée, et la diode est polarisée dans le sens inverse.

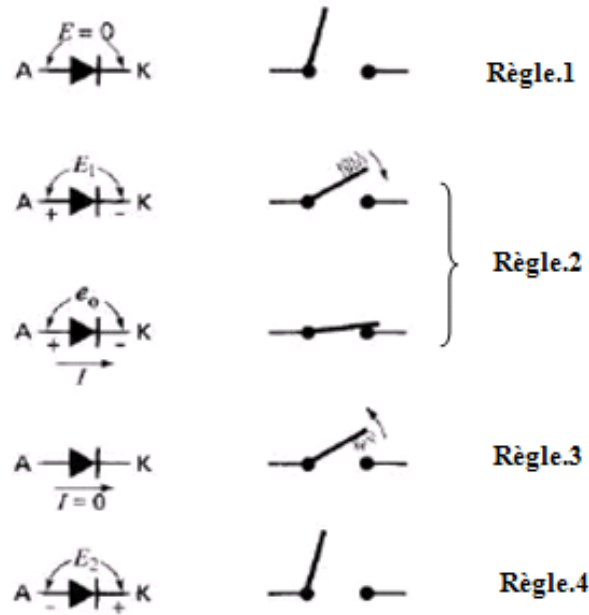


Figure 2.3 : Propriétés d'une diode.

## 2.2.2 Caractéristiques principales d'une diode

Les caractéristiques principales d'une diode sont :

### 2.2.2.1 Tension maximale (en inverse)

Il existe une limite à la tension inverse que peut supporter une diode. Cette tension inverse de crête est généralement comprise entre  $50\text{ V}$  et  $2000\text{ V}$ , selon la construction de la diode. Si l'on dépasse cette limite, la diode commence à conduire dans le sens inverse et la majorité des cas, elle est aussitôt détruite.

### 2.2.2.2 Courant maximal (en direct)

Il existe une limite au courant moyen qu'une diode peut supporter lorsqu'elle conduit. Ce courant moyen nominal dépend de la construction de la diode et du radiateur sur lequel elle est montée. Le courant peut être de l'ordre d'une centaine de milliampères pour les petites diodes et il peut atteindre  $3000\text{ A}$  pour les diodes de grande puissance.

### 2.2.2.3 Température maximale

La diode est soumise à des limites de température que l'on ne doit jamais dépasser. En générale, les diodes au silicium peuvent fonctionner dans une gamme de température allant de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2.3 Caractéristiques statiques

La caractéristique statique d'une diode est la représentation  $I - V$  en régime permanent. Elle est indépendante du temps. Cette caractéristique pour la diode est non linéaire.

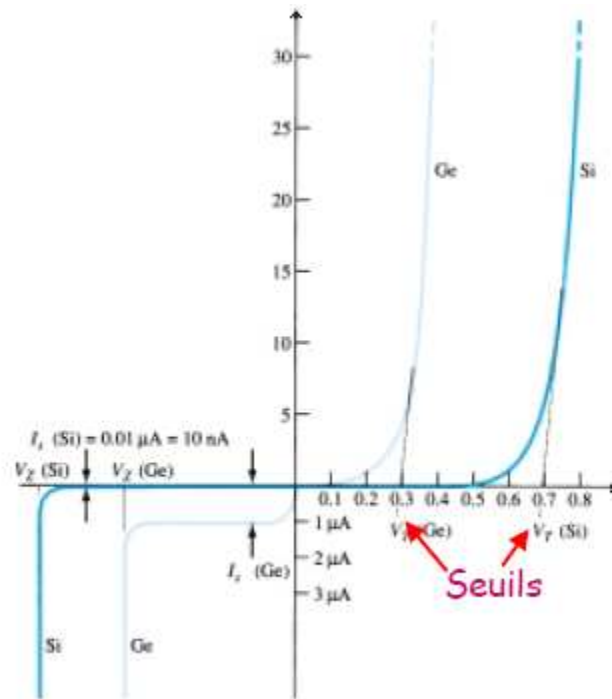


Figure 2.4 : Caractéristique courant-tension d'une diode.

Dans le sens direct, au-delà de la tension du seuil ( $V_s = 0,7 V$  pour le silicium) le courant croit très vite et la variation de la tension reste faible. Il apparaît une chute de tension directe anode - cathode, elle est généralement faible devant les tensions mises en jeu dans les convertisseurs.

Dans le sens inverse, il ne circule qu'un très faible courant jusqu'à une certaine valeur de la tension inverse (tension d'avalanche).

### 2.2.4 Caractéristiques dynamiques

La caractérisation dynamique d'une diode est la représentation  $I - V$  en régime variable. Elles concernent le passage de l'état bloqué à l'état passant (amorçage) et le passage de l'état passant à l'état bloqué (blocage).

La caractérisation dynamique d'une diode dépend de la fréquence des signaux, de la réponse temporelle de la diode.

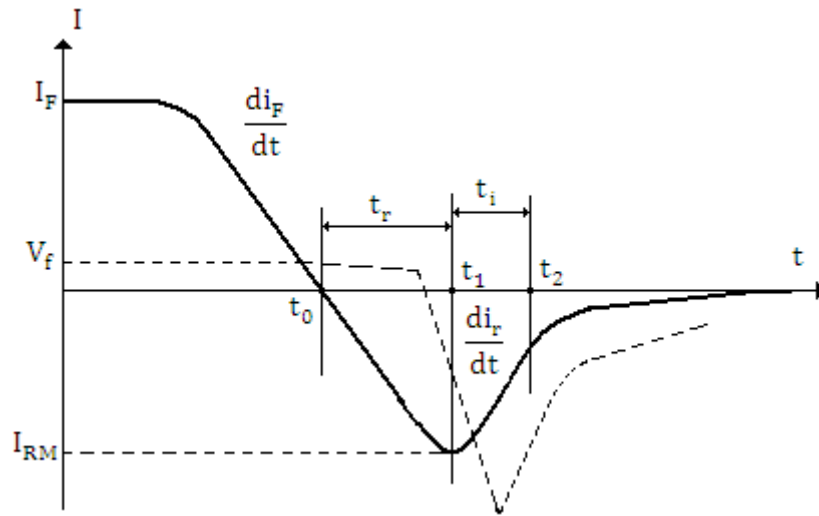


Figure 2.5 : Caractéristique dynamique d'une diode.

#### 2.2.4.1 Blocage

Le blocage d'une diode est caractérisé par l'annulation du courant direct qui la traversait, puis l'apparition d'une tension inverse à ses bornes.

La figure 2.5 montre la forme du courant et la tension pendant toute la durée du phénomène, c'est-à-dire jusqu'à ce que la diode retrouve son pouvoir de blocage.

La décroissance du courant direct ( $di_f/dt$ ) dépend du circuit extérieur. A l'instant  $t_0$  le courant passe par zéro puis apparait un courant inverse de même pente jusqu'à l'instant  $t_1$ . Au voisinage de ( $t_1$ ), la diode commence à retrouver son pouvoir de blocage, la pente du courant change de signe et le circuit extérieur étant généralement inductif, il apparait une surtension inverse aux borne de la diode. A l'instant( $t_2$ ), le courant s'est annulé, il ne reste aux bornes de la diode que la tension inverse composée par le circuit extérieur. La diode est bloquée.

Le paramètre important sera le temps de recouvrement  $t_{off}$  :

$$t_{off} = t_r + t_i \quad (2.1)$$

Ce temps, généralement de quelques  $\mu s$  peut descendre jusqu'à  $100 ns$  pour certaines diodes dites rapides.

L'amplitude de la surtension inverse dépend essentiellement de la pente ( $di_r/dt$ ) du courant inverse de recouvrement et de l'inductance du circuit extérieur.

### 2.2.4.2 Amorçage

La diode se met à conduire lorsque la tension directe anode - cathode tend à devenir supérieure à la tension du seuil ( $V_{AK} \geq V_{seuil}$ ).

Généralement le phénomène transitoire à l'amorçage présente une importance très faible. Notons toute fois l'existence d'un temps d'établissement de l'ordre de la  $\mu s$  pour la plus part des diodes.

### 2.2.5 La diode idéale

Une diode idéal, la tension entre ses bornes est nulle, quelque soit le courant pendant la polarisation direct. Et le courant est nulle quelque soit la tension appliquée pendant la polarisation inverse.

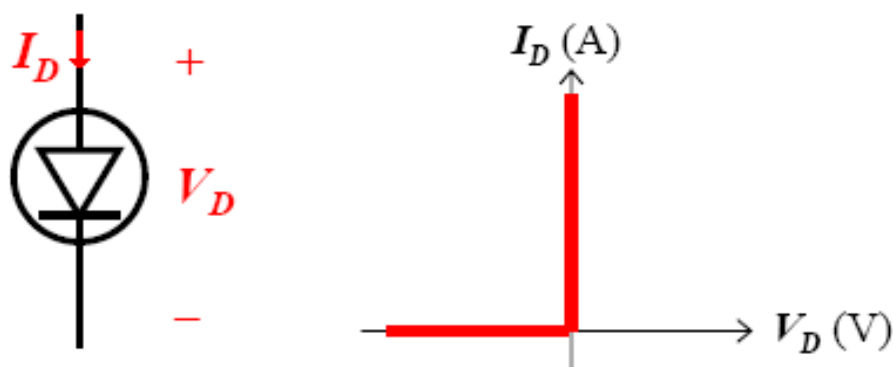


Figure 2.6 : Symbole et caractérisation d'une diode idéale.

### 2.2.6 La diode Schottky

La diode Schottky est constituée d'un contact entre un métal et un semi-conducteur de type  $P$  ou  $N$ . La caractéristique de la diode Schottky est similaire à celle d'une diode de redressement, mais avec une tension direct plus faible ; la diode Schottky est plus rapide. Typiquement, pour une diode Schottky au silicium, on a  $V_{seuil} \sim 0.3 V$ .

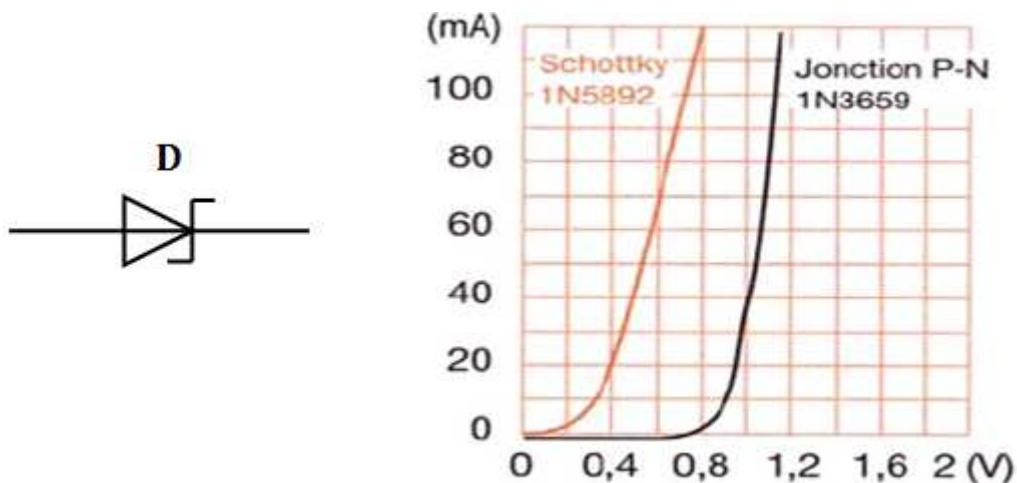


Figure 2.7 : Caractéristiques d'une diode Schottky et d'une diode à jonction  $PN$ .

## 2.3 Le transistor bipolaire

### 2.3.1 Définition

Le transistor bipolaire est constitué de trois couches de semi-conducteur dopées  $P$  ou  $N$  séparées par deux jonctions.

Le transistor est un composant à trois bornes : la base  $B$ , le collecteur  $C$  et l'émetteur  $E$ , il ya deux types de transistor : le  $NPN$  (émetteur  $N$ , base  $P$ , collecteur  $N$ ) et le transistor  $PNP$  (émetteur  $P$ , base  $N$ , collecteur  $P$ ). Le transistor peut avoir trois états : bloqué, saturé et passant en régime linéaire.

Le transistor peut être utilisé principalement comme interrupteur commandé (électronique logique) ou comme amplificateur (électronique analogique), mais aussi pour stabiliser une tension, moduler un signal ainsi que pour de nombreuses autres utilisations [06].

Le symbole de transistor bipolaire comprend une flèche qui désigne la jonction de commande et indique la direction du courant quand cette jonction est polarisée en direct.

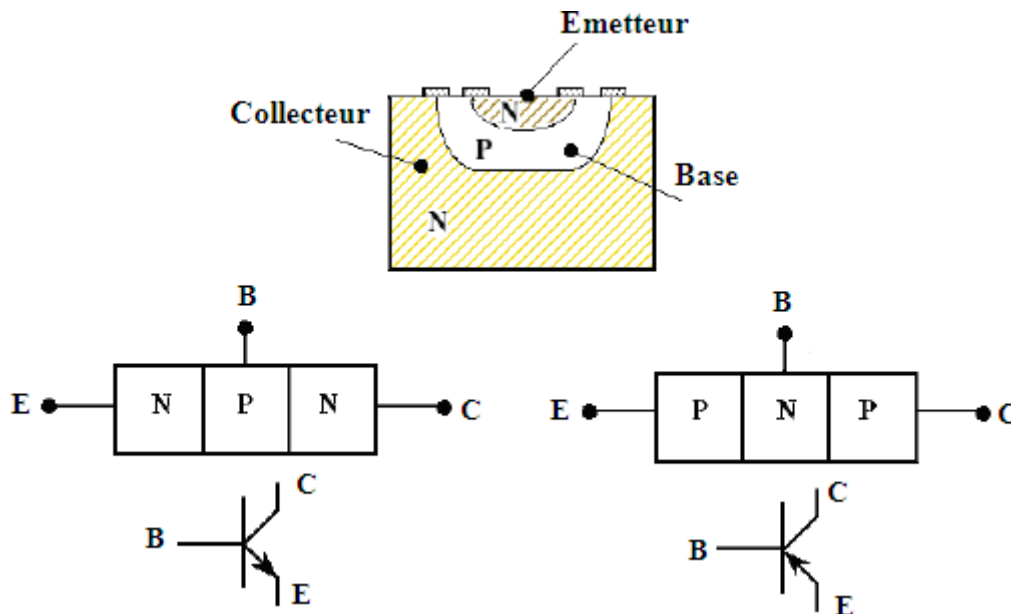


Figure 2.8 : Symbole et structure du transistor bipolaire.

### 2.3.2 Caractéristique d'un transistor

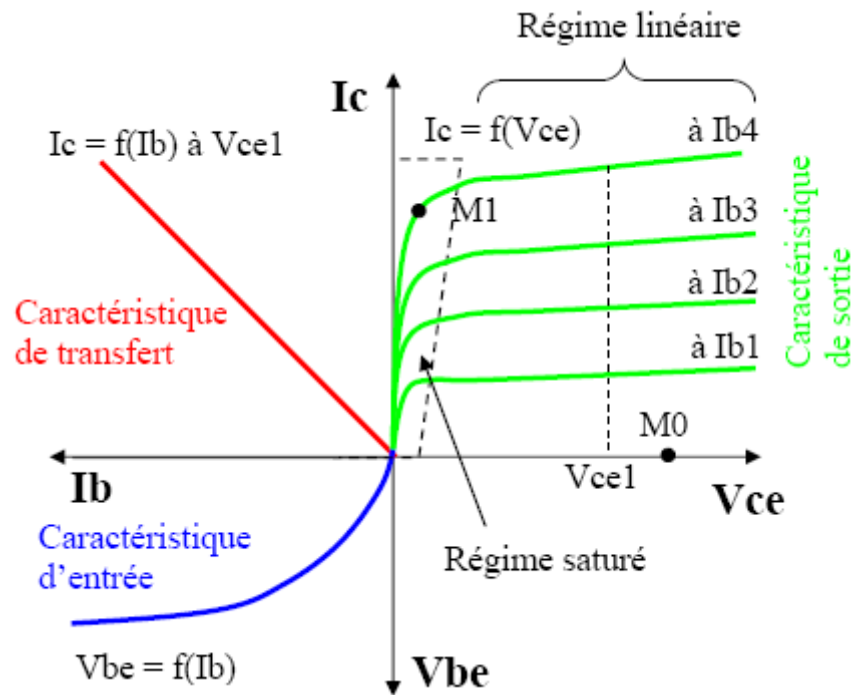
La figure 2.9 représente les caractéristiques électriques d'un transistor bipolaire *NPN* en montage émetteur-commun dont les différentes fonctions et régimes sont :

- ✓ La fonction  $I_C = f(V_{ce})$  (courbes vertes) correspond aux caractéristiques de sortie. Le courant dépend de la valeur du courant de base ( $I_b$ ),
- ✓ La caractéristique d'entrée du transistor correspond à la fonction  $V_{be} = f(I_b)$  (courbe bleue), elle est représentative d'une jonction PN polarisée en direct entre la base et l'émetteur,
- ✓ La fonction  $I_C = f(I_b)$  (courbe rouge) est la caractéristique de transfert en courant. C'est un faisceau de droites de pente  $\beta$ , le facteur  $\beta$  est appelé gain de courant. On peut donc dire que le transistor se comporte comme un générateur de courant commandé (ou "piloté") par un courant.

On peut séparer deux domaines :

- un domaine linéaire  $I_C = \beta \cdot I_b$  qui correspond sur les caractéristiques de sortie aux positions de courbes où  $I_C$  varie peu avec  $V_{ce}$  pour une valeur de  $I_b$  donnée,
- un domaine de saturation du courant de sortie  $I_C$  qui correspond à la partie coudée des courbes de sortie ; en effet quand la tension  $V_{ce}$

diminue pour devenir très faible, la jonction collecteur-base cesse d'être polarisée en inverse, et le courant  $I_C$  décroît alors très rapidement.



**Figure 2.9 :** Caractéristiques électriques d'un transistor bipolaire *NPN* en montage émetteur commun [06].

En commutation, le transistor bipolaire est équivalent à un interrupteur fermé ou ouvert commandé en courant. Lorsqu'on injecte un courant  $I_b$  suffisant ( $I_{b\text{sat}}$ ) dans la base  $B$ , le transistor est dit saturé (point M1 de la figure 2.9), c'est-à-dire qu'il se comporte comme un interrupteur fermé : le courant  $I_C$  de puissance va pouvoir circuler. Si  $I_b = 0$  (pas de courant dans la base) alors le transistor est dit bloqué (point M0 de la figure 2.9), c'est-à-dire qu'il se comporte comme un interrupteur ouvert : le courant  $I_C$  de puissance ne peut pas circuler.

En faisant varier  $I_b$  tout en conservant le transistor en régime linéaire on peut utiliser le transistor en amplificateur de courant. On définit alors son gain d'amplification :

$$\beta = I_C / I_b \quad (2.2)$$

La valeur de  $\beta$  varie entre 20 et 200 suivant le type des transistors et les conditions de fabrication.

Pour un transistor *PNP*, le principe est le même, mais les courants  $I_C$  et  $I_b$  sont inversés.

## 2.4 Le thyristor

### 2.4.1 Définition

Le mot thyristor vient d'un mot Grec qui veut dire Porte.

Le thyristor est un semi-conducteur à quatre couches alternativement  $P_1N_1P_2N_2$  et trois jonctions, entre l'anode *A* (l'extrémité *P*) et la cathode *K* (l'extrémité *N*). Ce redresseur possède une troisième électrode appelée gâchette *G*. La gâchette permet de retarder l'amorçage de la conduction.

Le thyristor conduit le courant dans le sens anode – cathode seulement si l'on applique une impulsion d'allumage à la gâchette, la direction cathode – anode est toujours bloquante.

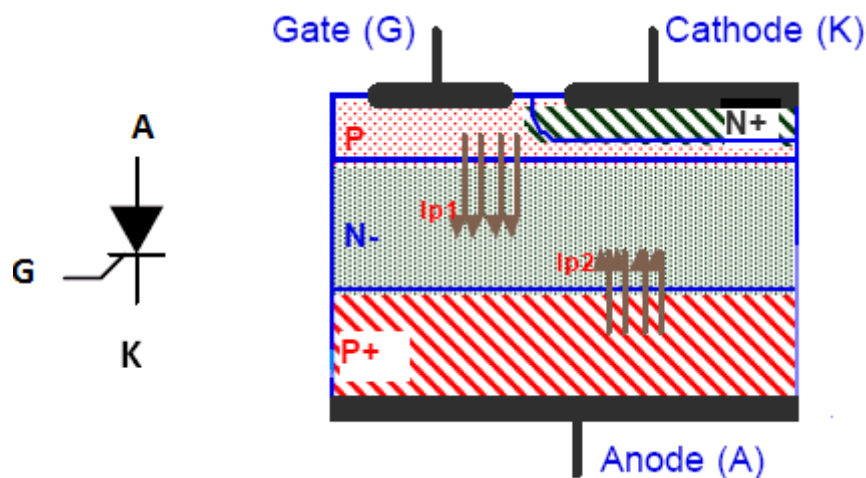


Figure 2.10 : Symbole et structure d'un thyristor.

Le thyristor présente deux états stables ; l'état passant ou saturé, et l'état non passant ou bloqué.

Le thyristor est un composant actif de choix pour l'électronique de puissance, en effet, le thyristor reste normalement bloqué jusqu'au moment, choisi avec précision, où l'on décide de le rendre passant en agissant sur son électrode de déclenchement.

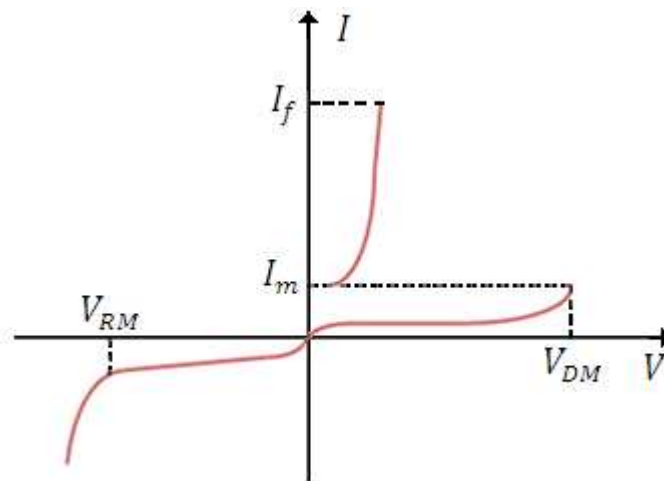
## 2.4.2 Caractéristique statique

### 2.4.2.1 Amorçage par effet d'avalanche

En l'absence de courant de la gâchette, la caractéristique statique d'un thyristor est celle de la (Figure 2. 11).

Dans le sens direct, lorsque l'anode est positive par rapport à la cathode, le thyristor est pratiquement non conducteur tant que la tension appliquée est inférieure à la tension directe maximale  $V_{DM}$ . Si la tension appliquée dépasse  $V_{DM}$ , il y a amorçage de thyristor par effet d'avalanche. Le thyristor ne peut revenir à l'état bloqué que par diminution du courant au-dessous de la valeur de courant de maintien  $I_m$ .

Dans le sens inverse, le thyristor est bloqué tant que la tension inverse ne dépasse pas la tension inverse maximale  $V_{RM}$ .



**Figure 2.11** : Caractéristique courant-tension statique d'un thyristor.

Avec

$I_f$  : Le courant direct continu maximal.

### 2.4.2.2 Amorçage par la gâchette

Pour amorcer le thyristor par la gâchette, deux conditions sont nécessaires :

1. l'anode doit être positive par rapport à la cathode,
2. Un courant  $I_G$  doit entrer dans la gâchette pendant quelques microsecondes.

En pratique, on réalise cette conduction en appliquant sur la gâchette une impulsion  $E_G$  positive.

Une fois la conduction amorcée, la gâchette perd tout contrôle et la conduction ne cesse que lorsque le courant anodique redevient nul, après la gâchette reprend son pouvoir de commande.

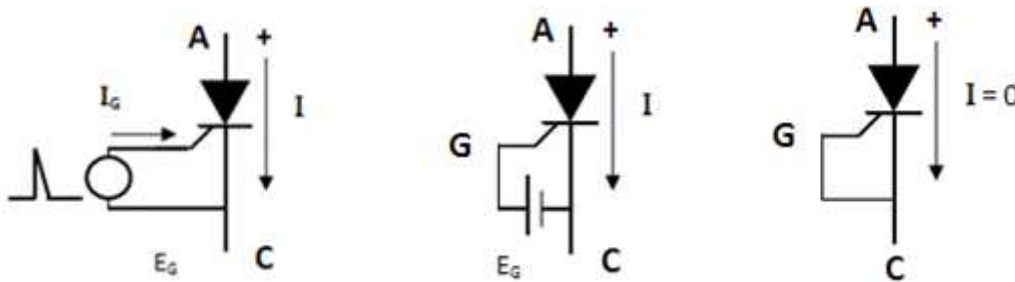


Figure 2.12 : Principe d'amorçage d'un thyristor par la gâchette.

### 2.4.2.3 Blocage

Le thyristor est à nouveau bloqué si le courant devient inférieur à le courant de maintien  $I_m$ .

## 2.4.3 Caractéristiques dynamiques

### 2.4.3.1 Amorçage

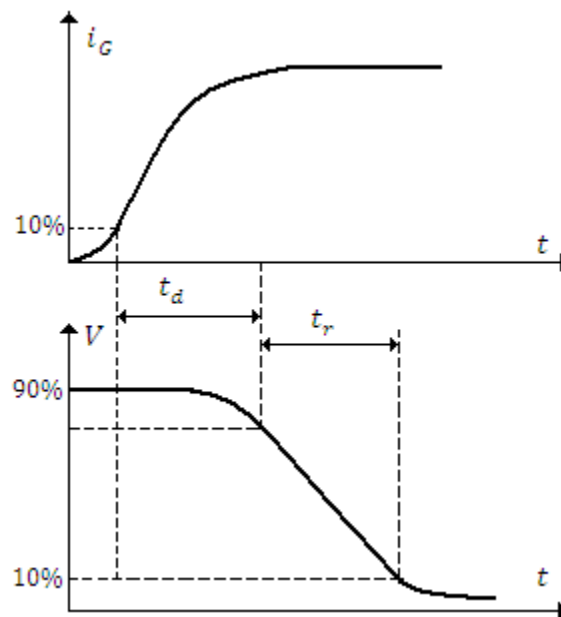


Figure 2.13 : Temps de croissance pendant l'amorçage du thyristor.

Pour amorcer le thyristor, une impulsion de courant est envoyée sur la gâchette du thyristor à l'instant  $t_0$ . Le passage de l'état bloqué à l'état passant s'effectue pendant un temps  $t_{gt}$  qui est la somme de deux temps :

$$t_{gt} = t_d + t_r \quad (2.3)$$

Avec

$t_d$  : Le temps de retard à la croissance commandée par la gâchette,

$t_r$  : Le temps à la croissance commandée par la gâchette.

Le temps  $t_{gt}$  est de l'ordre de  $1\mu s$  pour les petits thyristors, il peut atteindre  $5\mu s$  pour les gros thyristors,

#### **2.4.3.2 Blocage**

Le blocage du thyristor dépend du circuit extérieur, il y a tout d'abord extinction du courant, généralement par commutation naturelle ou forcée, puis application d'une tension inverse, aux bornes du thyristor jusqu'à complète récupération du pouvoir de blocage.

Le temps de blocage  $t_g$  (ou désamorçage) est le temps qui sépare le passage par zéro du courant et l'instant où une tension directe peut être réappliquée aux bornes du thyristor tel que :

$$t_g = t_r + t_{rg} \quad (2.4)$$

Avec

$t_r$  : Temps de recouvrement inverse (ou récupération),

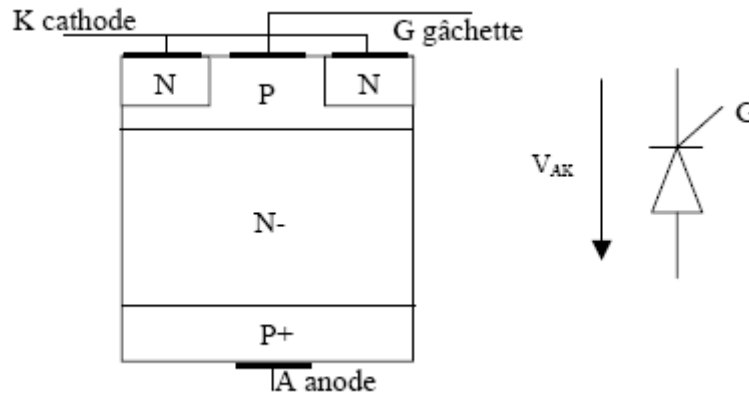
$t_{rg}$  : Temps de recouvrement de la gâchette.

## **2.5 Le GTO (Gate Turn-Off Thyristor)**

### **2.5.1 Définition**

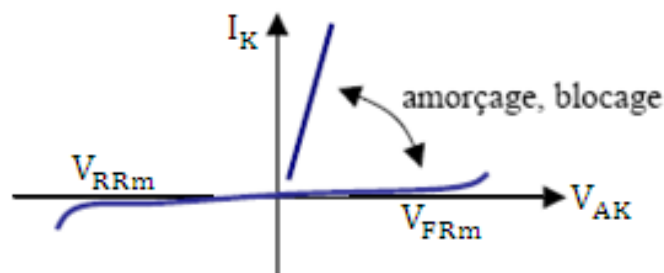
Le problème avec le thyristor est qu'une fois que le courant est établi, il ne peut s'interrompre par la gâchette, en somme, le thyristor n'est commandable qu'à la fermeture.

Le GTO ou thyristor blocable par la gâchette, est un composant qui utilise le même principe que le thyristor ordinaire, Mais il présente la particularité de pouvoir être éteint par la même gâchette qui permet son amorçage.



**Figure 2.14 :** Structure et symbole du GTO.

Le GTO est un semi-conducteur bistable à trois jonctions et à quatre couches  $P_1N_1P_2N_2$  destiné au contrôle de courant unidirectionnel.



**Figure 2.15 :** Caractéristique du GTO.

### 2.5.2 Principe d'amorçage

Le phénomène d'amorçage d'un GTO est le même que celui du thyristor ordinaire, le GTO est en polarisation directe lorsque la différence de potentiel entre anode et cathode est positive.

### 2.5.3 Principe d'extinction

L'extinction du GTO se fait par annulation du courant principal et par l'application d'une tension négative fait apparaître un courant de gâchette négative. Si le courant passe au dessous du seuil nécessaire pour obtenir l'avalanche, le GTO se bloque.

En polarisation inverse, il se comporte comme une simple résistance, il faudra donc lui associer une diode en série s'il doit tenir une tension élevée.

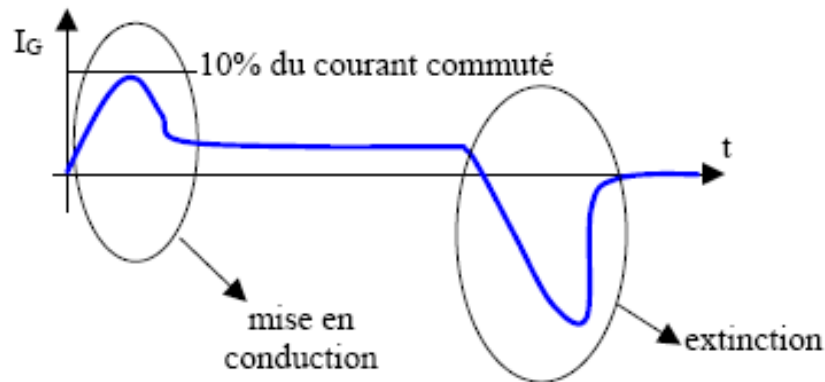


Figure 2.16 : Commande du thyristor par le courant de gâchette.

## 2.5.4 Caractéristiques

Le GTO ressemble beaucoup au thyristor, à l'état bloqué le GTO peut résister aux tensions  $V_{AK}$  positives, mais non pas aux tensions négatives. À l'état passant, la chute de tension est environ  $3V$ , par rapport à  $2V$  pour le thyristor. La conduction du GTO est initiée en injectant un courant positif dans la gâchette. Afin de maintenir la conduction dans le GTO, le courant d'anode ne doit pas baisser en dessous d'un seuil appelé courant de maintien. Le courant d'anode est bloqué en injectant un courant négatif substantiel dans la gâchette pendant quelques microsecondes.

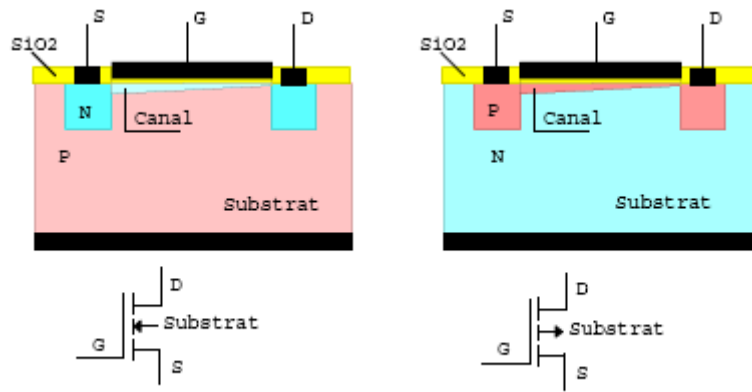
Le GTO est donc un commutateur de grande puissance, pouvant commander des courants de quelques milliers d'ampères sous des tensions allant jusqu'à  $4KV$ .

## 2.6 Le MOS (Métal, Oxyde, Semi-conducteur)

### 2.6.1 Définition

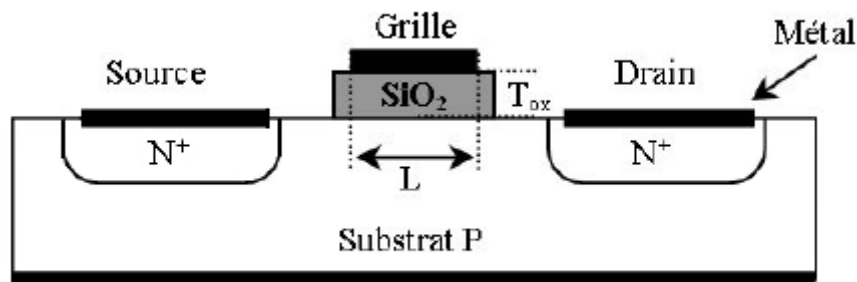
Le transistor MOS est un composant totalement commandé à la fermeture et à l'ouverture. C'est le composant le plus rapide à se fermer et à s'ouvrir. Le MOS est un composant très facile à commander.

Il existe deux types de transistors MOS, de type  $N$  et de type  $P$ , l'un étant le complémentaire de l'autre.



**Figure 2.17 :** Structure et symbole du MOS à enrichissement.

Comme le montre la figure 1.18, le transistor NMOS est constitué d'une grille en polysilicium sur une fine couche d'oxyde isolant ( $SiO_2$ ) d'épaisseur  $T_{OX}$ . Dans le substrat de type  $P$ , deux régions de type  $N^+$  sont implantées qui constituent la source  $S$  et le drain  $D$ . Le canal s'étend sur toute la longueur entre la source et le drain et se comporte comme une résistance ( $I_S = I_D \approx V_{DS}/R$ ) dont la valeur  $R$  est indépendante de  $V_{DS}$ , mais varie avec la tension de commande  $V_{GS}$ . La densité électronique dans le canal augmente lorsque la tension de grille augmente, et donc la conductivité du canal augmente elle aussi.



**Figure 2.18 :** Coupe transversale d'un transistor NMOS.

### 2.6.2 Caractéristiques

Le réseau de caractéristiques de sortie :  $I_D = f(V_{DS})$  (courant de drain en fonction de la tension drain-source) est donné sur la figure 1.19. Le niveau de courant de sortie  $I_D$  dépend, pour un  $V_{DS}$  donné, de la tension appliquée sur la grille  $V_{GS}$ .

On peut séparer ces caractéristiques en deux zones principales qui correspondent au régime linéaire et au régime saturé.

Dans le régime linéaire, le courant est imposé par le circuit extérieur, le MOS se comportant comme une résistance modulée par la tension  $V_{GS}$ . Dans le second, le courant est limité par le transistor, et ne dépend plus que de  $V_{GS}$ . La résistance drain source à l'état passant ( $R_{DS(on)}$ ) se mesure en régime linéaire et s'obtient par la relation [06]:

$$R_{DS(on)} = \Delta V_{DS} / \Delta I_D \quad (2.5)$$

En commutation :

Pour  $V_{GS} = 0$ , le transistor est bloqué (interrupteur ouvert) et donc  $I_D = 0$ .

Pour  $V_{GS} > 0$ , le transistor est saturé (interrupteur fermé) et donc  $I_D > 0$ .

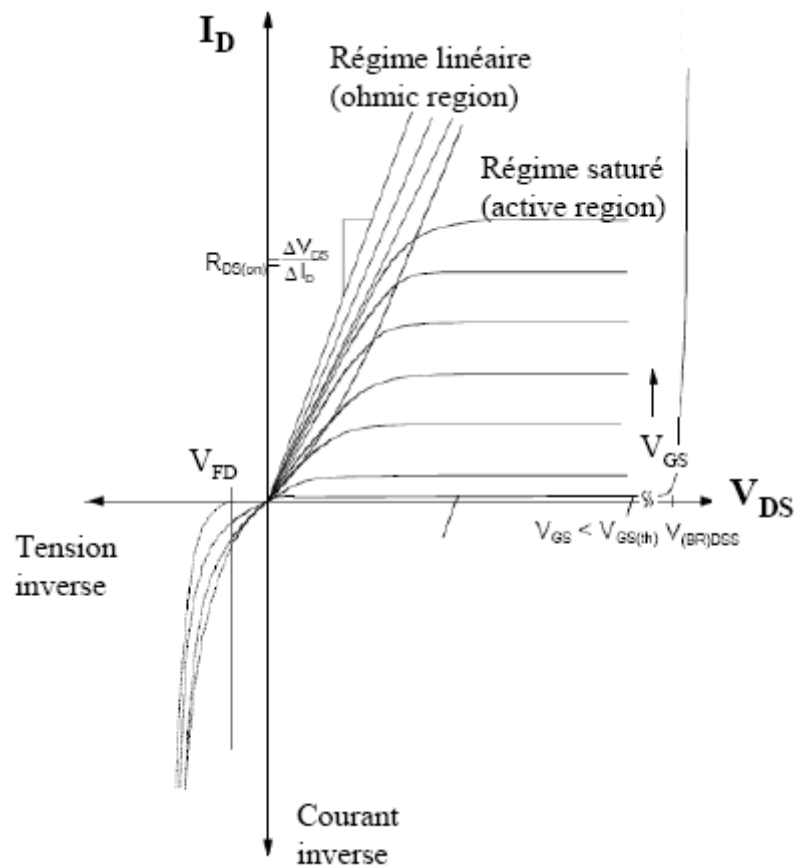


Figure 2.19 : Caractéristiques de base d'un transistor MOS à canal N.

Par rapport aux dispositifs bipolaires de puissance, les MOS ont l'avantage de présenter une haute vitesse de commutation (passage de l'état bloqué à l'état saturé), une facilité d'intégration et une plus grande région d'utilisation SOA (safe operating area) définie comme les conditions en courant et en tension selon lesquelles le composant peut fonctionner sans subir de dommage.

Les principaux avantages du MOS de puissance sont [23]:

- ✓ Faible courant de grille (de commande),
- ✓ Temps de commutation faibles entre  $10ns$  et  $100ns$  ( $T_{on}$  et  $T_{off}$ ),
- ✓ Aire de sécurité carrée (maximale), (pas de second claquage),
- ✓ Pas de phénomène de stockage.

En revanche, le MOS présente un inconvénient majeur qui est la résistance du canal à l'état passant  $E_{DS}$ , ainsi pour tenir des hautes tensions inverses, l'épaisseur de silicium faiblement dopé impose une chute de tension à l'état passant conséquente. De plus, la surface de silicium nécessaire dans ces cas là amène un coût prohibitif devant celui de l'équivalent en transistor bipolaire. Ainsi, au delà de  $500V$ , le MOS devient plus coûteux que le bipolaire.

## 2.7 Le MOSFET

### 2.7.1 Définition

Le MOSFET de puissance est un semi-conducteur à trois bornes qui s'appellent drain  $D$ , source  $S$  et grille  $G$ . Le drain et l'anode alors que la source est la cathode.

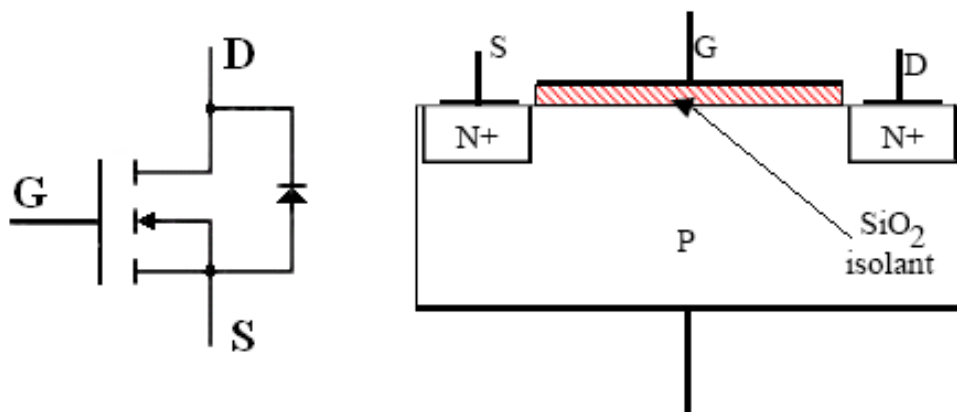


Figure 2.20 : Symbole et structure du MOSFET.

Parmi tous les composants produits en microélectronique, le transistor MOSFET occupe une place fondamentale. Il offre des performances très honorables à des coûts relativement plus faibles, il est très mature d'un point de vue industriel. Le transistor MOSFET a suscité beaucoup d'études et de recherche pour exploiter au mieux ses caractéristiques intéressantes et prometteuses [27].

### 2.7.2 Caractéristiques

L'état de ce transistor dépend de la tension appliquée sur la grille. Le courant  $I_D$  dans le drain est amorcé en appliquant une tension  $V_{GS}$  positive d'environ 12V entre la grille et la source. La conduction cesse dès qu'on diminue  $V_{GS}$  en dessous d'environ 1V. Le courant dans la grille est extrêmement petit ; par conséquent, une très faible puissance est requise pour amorcer et désamorcer la conduction.

Le MOSFET ne peut pas tolérer des tensions  $V_{DG}$  négatives. Afin de répondre à cette exigence, on y incorpore une diode, comme indiqué sur son symbole. Les MOSFET de puissance peuvent porter des courants de quelques centaines d'ampères sous des tensions d'environ 500V. Lors de la conduction, à l'état saturé, la chute de tension  $V_{DS}$  est comprise entre 2V et 3V.

## 2.8 Le BJT

### 2.8.1 Définition

Dans le transistor BJT à jonction bipolaire, la conduction est due au déplacement des électrons et des trous. Le BJT possède trois bornes appelées respectivement collecteur  $C$ , émetteur  $E$  et base  $B$ .

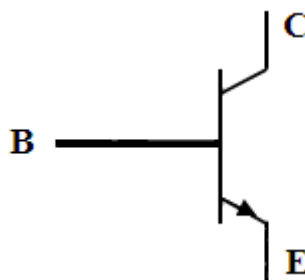


Figure 2.21 : Symbole du BJT.

### 2.8.2 Caractéristiques

Le courant  $I_C$  circulant du collecteur à l'émetteur est initié et soutenu en faisant circuler un faible courant  $I_B$  dans la base.

Lorsque le BJT est utilisé comme interrupteur, le courant dans la base doit être suffisamment élevé pour que le BJT reste à l'état saturé. Lors de la conduction, la tension entre le collecteur et l'émetteur est généralement de 2V à 3V. La conduction cesse dès que le courant dans la base est interrompu.

Les BJT peuvent supporter des courants de quelques centaines d'ampères sous des tensions  $V_{CE}$  de 1000V. Cependant, ils ne peuvent pas tolérer des tensions  $V_{CE}$  négatives.

## 2.9 L'IGBT

### 1.9.1 Définition

Le transistor bipolaire à grille isolée (I.G.B.T) est un transistor possède trois bornés sont nommées collecteur  $C$ , émetteur  $E$  et grille  $G$ . Un schéma équivalent simplifié de l'IGBT représente bien l'entrée de commande sur un MOS qui met le transistor bipolaire de sortie en conduction à un faible courant de grille.

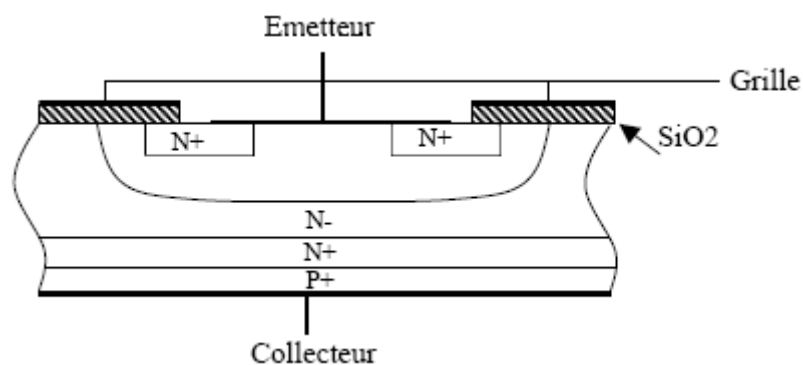


Figure 2.22 : Structure d'IJBT.

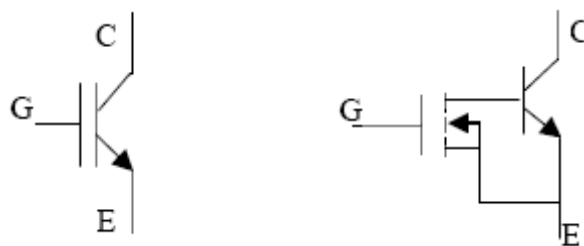


Figure 2.23 : Symbole d'IGBT.

## 2.9.2 Caractéristiques

Le transistor MOS de puissance représente l'idéal en ce concerne la commande, le transistor bipolaire, lui apporte le meilleur compromis chute de tension à l'état passant tenue en tension. L'IJBT est une structure qui apporte les deux avantages de chacun.

L'IGBT est un transistor, plus performants, au même comportement que le transistor bipolaire à la différence qu'il se commande avec une tension (le courant de commande est très faible).

L'IGBT est un transistor dont la conduction est amorcée et désamorcée en appliquant une tension appropriée sur la gâchette.

Les avantages de tel convertisseur sont la fréquence plus élevée de fonctionnement, et de dimension plus réduites et la possibilité de commande en tension.

## 2.10 Les composants électroniques

### 2.10.1 Fonctionnement en Commutation

L'électronique de puissance a toujours fait fonctionner les semi-conducteurs en commutation : un état bloqué ( $I = 0$ ), un état passant ( $V = \varepsilon$ ) et deux phases de commutation (l'allumage et le blocage). On comprend aisément que ces deux transitions qui nécessitent des transferts de charges électriques dans le silicium, ne peuvent pas être instantanées et qu'il existe donc des intervalles de temps pendant lesquels courant, tension et donc puissance instantanée peuvent avoir des valeurs importantes. Cette énergie perdue à chaque commutation conduit à une puissance proportionnelle à la fréquence qui participe avec la puissance perdue pendant la phase de conduction à l'échauffement de la puce de silicium. Il apparaît dès maintenant les premières contraintes imposées aux composants :

- ✓ Tension à tenir dans l'état bloqué,
- ✓ Tension de déchet (chute) la plus faible possible à l'état passant,
- ✓ Courant maximum à l'état passant,
- ✓ Rapidité des commutations pour les diminuer pertes en commutation et aussi augmenter les performances des convertisseurs.

Pour la rapidité des commutations, il faut revenir sur la fréquence de travail des composants encore appelée fréquence de découpage [32].

### 2.10.2 Performances

Un composant de puissance ne peut pas faire passer un courant infini, ni supporter des tensions infinies.

On définit une aire de sécurité en direct qui correspond aux performances maximum du composant.

Elle se découpe en trois parties :

- ✓ limitation du courant maximum par la section des connexions de sortie,
- ✓ limitation par la puissance maximum que peut dissiper le composant

$$I_{AK} \cdot V_{AK} < P_{Max}$$

- ✓ limitation par l'avalanche (tension inverse maximum) [12].

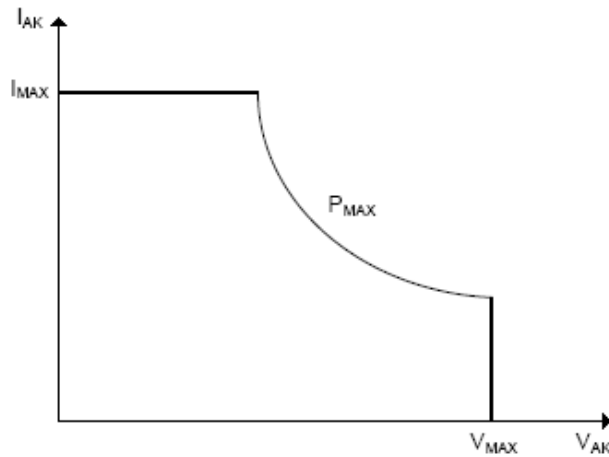


Figure 2.24 : Aire de sécurité d'un composant de puissance.

Ces trois paramètres sont essentiels pour le choix d'un composant de puissance.

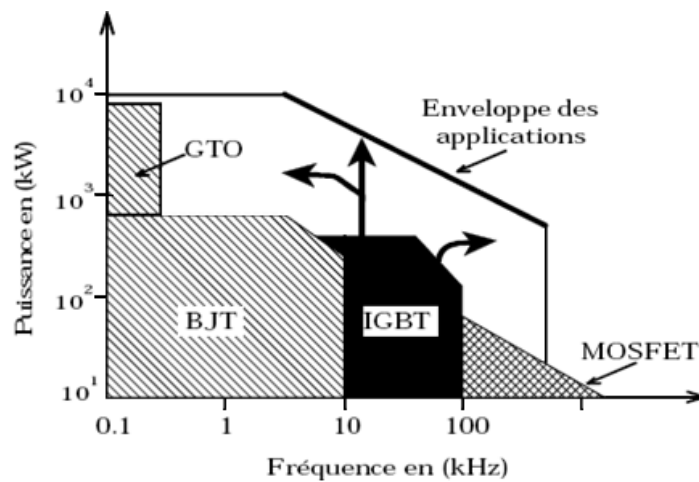


Figure 2.25 : Domaine d'application des différents dispositifs de commutation.

Les différents composants ne peuvent pas être employés dans les mêmes gammes de puissance et de fréquence de commutation, en raison des contraintes liées à leurs structures respectives.

Lorsque l'on étudie les performances relatives des composants en fonction des tensions d'alimentation et des fréquences auxquelles le composant est capable de fonctionner, on peut tracer le domaine suivant :

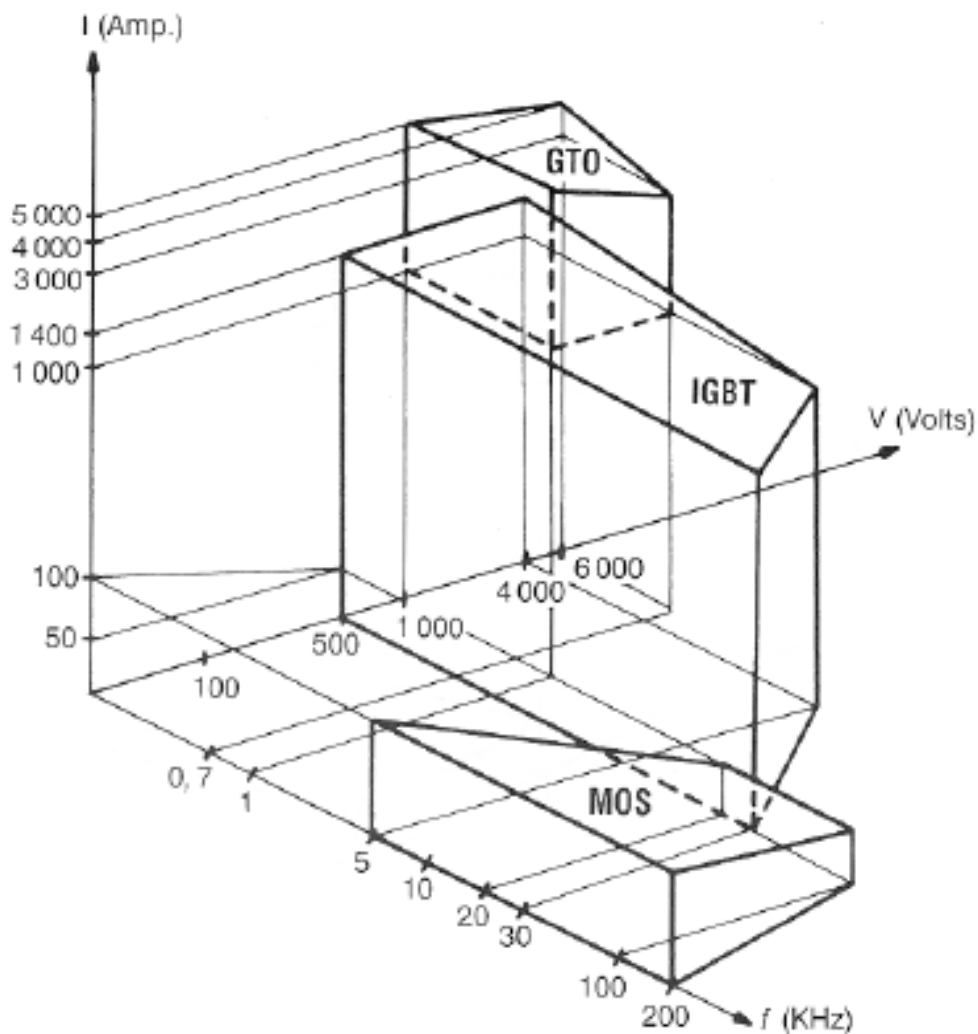


Figure 2.26 : Performances des composants électroniques.

### 2.10.3 Etude comparative entre les différents composants

Composant	BJT	IGBT	MOSFT	SIT	GTO
Puissance max	1200 V 800 A	1200 V 400 A	500 V 50 A	1200 V 300 A	4500 V 3000 A
Type de commande de gâchette	Courant	Tension	Tension	Tension	Courant
Limite de température	(-40 à 150) °C	(-20 à 150) °C	(-55 à 150) °C	(-50 à 150) °C	(-40 à 150) °C
Chute de tension à l'état ON	1,9 V	3,2 V	3,2 V	1,8 V	4,0V
Courant de fuite à l'état OFF	2,5 mA	1,0 mA	0,2 mA	0,1 mA	30 mA
Fréquence de commutation (KHz)	10	20	100	70	2 à 10
Turn ON ( $\mu s$ )	1,70	0,90	0,09	0,25	1,00
Turn OFF ( $\mu s$ )	5,00	1,40	0,14	0,30	10,00

**Tableau 2.1 :** Comparaison entre les composants électroniques.

Par rapport aux dispositifs bipolaires de puissance, les MOS ont l'avantage de présenter une haute vitesse de commutation (passage de l'état bloqué à l'état saturé), une facilité d'intégration et une plus grande région d'utilisation SOA (safe operating area) définie comme les conditions en courant et en tension selon lesquelles le composant peut fonctionner sans subir de dommage. Les bipolaires, quant à eux, ont l'avantage d'avoir une faible tension d'activation et autorisent des plus forts courants que les MOS. Par contre, ils ont des temps de commutation longs et une commande en courant qui gaspille de l'énergie.

Au cours des années 80 un nouveau composant est conçu cherchant à conjuguer les avantages des MOS et des bipolaires : il s'agit de l'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) qui est l'un des composants de puissance les plus utilisés encore

aujourd'hui pour les applications de moyennes puissances (quelques dizaines de kilowatt).

L'IGBT présente la commande simple et à faible consommation typique des structures MOS ainsi qu'une vitesse de commutation élevée. Il a également une faible tension d'activation, comme les bipolaires de puissance. Néanmoins, à cause de la plus grande complexité de réalisation des IGBT, les MOS et les bipolaires sont préférés pour le marché des faibles tensions (moins de 100V). Actuellement les MOS de puissance sont préférés pour les technologies à bas coût parce que leur production nécessite un nombre inférieur de masques par rapport aux transistors bipolaires.

Dans les applications de puissance d'aujourd'hui, les thyristors sont utilisés pour la commutation de forts courants et tensions AC (+de 1000A et + de 300V), tandis que les hautes tensions et petits ou moyens courants (<500A) DC (Direct Current) sont mieux contrôlés par des composants de type DMOS-FETs (Double MOS FET) ou IGBT [06].

#### **2.10.4 Evolution de dispositifs de puissance**

Les développements de dispositifs à semi-conducteurs de puissance ont abouti successivement à l'apparition des éléments tels que les thyristors, pour ce qui concerne les dispositifs commandables à fermeture, ainsi que le GTO et l'IGBT pour les éléments commandables à la fermeture et à l'ouverture. L'une après l'autre, ces différentes technologies ont atteint des niveaux de puissances limites, en relation avec les applications respectives.

Après la réalisation d'applications de puissances extrêmes à l'échelle du GW, sur la base de convertisseurs commutés naturellement et utilisant des thyristors conventionnels, le développement des techniques de mise en série des dispositifs enclenchables et déclenchables a permis de réaliser des onduleurs de tension à pulsation dans des gammes de puissance de plus en plus élevées.

Un premier développement important est représenté par la technique de la commande dure des GTO qui a abouti à un élément à commande intégrée appelé IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor). Les excellentes propriétés à l'état passant, de même que les possibilités de surcharge font de cet élément un candidat sûr pour la réalisation des grandes puissances. De plus, le principe de la commande dure qui fait circuler par la gâchette un courant d'évacuation de porteurs très important et

atteignant momentanément une valeur supérieure au courant d'anode, permet la manœuvre simultanée de plusieurs dispositifs connectés en série.

Parallèlement au développement de l'IGCT, les composants dits à grille isolée ont subi des évolutions considérables du point de vue de la tension de blocage, ainsi que dans le domaine de la connexion de puces en parallèle.

Pour les convertisseurs utilisant plusieurs transistors de commutation en série dans la même branche, un développement d'IGBT en boîtier pressé a vu le jour et permet également l'utilisation en série.

Contrairement à la technique des convertisseurs à commutation naturelle, les onduleurs à pulsation permettent une bonne définition de la valeur de tension à l'intérieur même d'une demi-onde. Cette particularité permet non seulement d'obtenir des formes de courant presque sinusoïdales, mais également de générer des régimes harmoniques contrôlés afin de corriger activement les courants non-sinusoïdaux [01].

### **2.10.5 Les progrès des technologies conventionnelles**

Parallèlement aux progrès potentiels qui sont apportés par les nouveaux matériaux semi-conducteurs, un certain nombre d'innovations apparaissent, sur la base des technologies classiques du silicium. Deux innovations récentes doivent être citées, et qui sont :

- ✓ Le changement radical dans la technologie MOSFET de haute tension,
- ✓ L'enrichissement de l'injection pour un nouveau dispositif voisin de l'IGBT, l'IEGT.

#### **2.10.5.1 Amélioration des MOSFET de puissance**

Récemment, une nouvelle famille de MOSFET de puissance a été présentée, dans laquelle le comportement en conduction a radicalement changé, principalement pour les tensions de blocage élevées. Si le calcul de la résistance interne se faisait selon une loi de croissance géométrique :

$$R(\Omega \cdot mm^2) = K \cdot V_n^{2,6} \quad (2.6)$$

Pour la nouvelle génération appelée CoolMOS cette loi devient linéaire :

$$R(\Omega \cdot mm^2) = K \cdot V_n \quad (2.7)$$

Une conséquence directe de ce changement est que pour un MOSFET en technologie CoolMOS à une tension de blocage de 600 V, il faut cinq fois moins de silicium qu'avec une technologie classique [01].

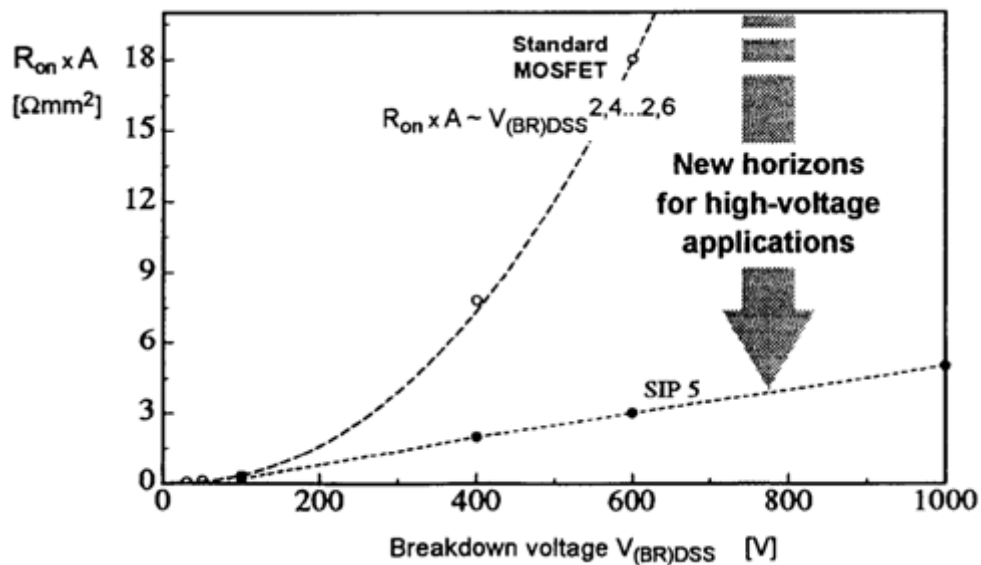


Figure 2.27 : Caractéristique améliorée des transistors CoolMOS.

Une des conséquences de l'amélioration obtenue est qu'il est désormais possible d'obtenir des quantités de pertes en conduction plus faibles qu'avec des transistors de type IGBT et pour des tensions compatibles avec les applications industrielles courantes. En relation avec une augmentation de la surface effective d'un dispositif, on peut obtenir des valeurs de tension passantes inférieures aux limites de seuils bien connues.

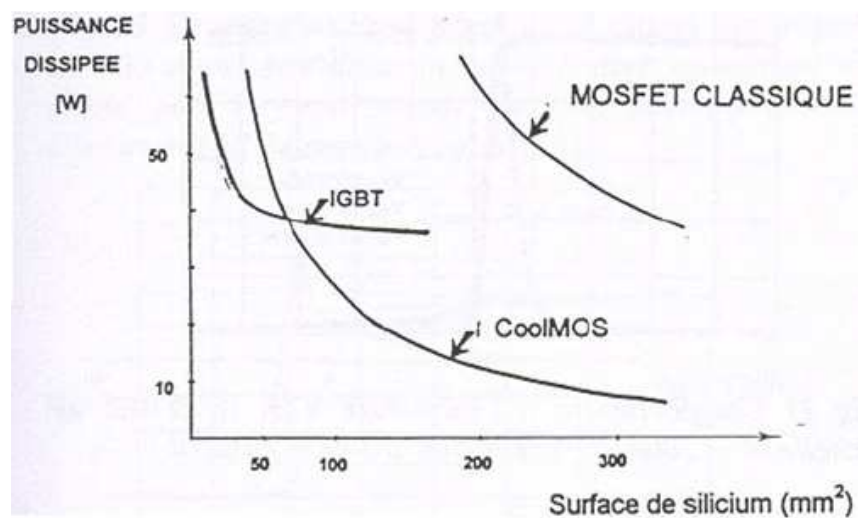
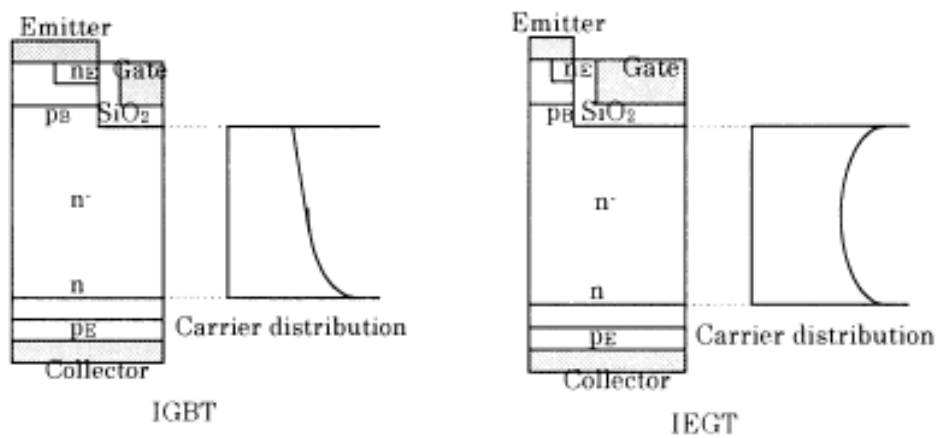


Figure 2.28 : Caractéristique améliorée des transistors CoolMOS.

### 2.10.5.2 Amélioration des IGBT de forte puissance, l'IEGT

Une autre innovation du comportement à l'état passant est proposée par des chercheurs, sur une base technologique très voisine de l'IGBT. Dans cette amélioration, on modifie la concentration des porteurs au niveau de l'émetteur en modifiant la géométrie de l'étage de commande. Le nouveau type de dispositif est appelé IEGT, (Injection Enhancement Gata Transistor). La chute de tension de l'IEGT sera très voisine de celle obtenue avec des dispositifs à double injection tels que les GTO [01].



**Figure 2.29** : Structure du MOSFET et IEGT.

Les composants sur silicium existeront encore dans le futur mais il y aura un développement de composants « grand gap » [20].

Les étapes technologiques nécessaires à la réalisation d'un transistor MOS en GaN sont en cours de validation (problème sur les capacités MOS à résoudre).

Des transistors MOS seront fabriqués en 2010 [18].

## **2.11 Conclusions**

Nous avons vu dans ce chapitre trois types de semi-conducteurs de puissance :

- ✓ Les semi-conducteurs non contrôlés : les diodes,
- ✓ Les semi-conducteurs contrôlés sans commande de blocage : les thyristors,
- ✓ Les semi-conducteurs contrôlés avec commande de blocage : les transistors, les GTO.

Ces composants de puissances sont utilisés dans plusieurs domaines (Communication, Secteur médical, Production industrielle, Transport,.....).

Les semi-conducteurs aujourd'hui ont apporté des solutions nouvelles réduisant l'encombrement des convertisseurs, augmentant leur fiabilité, diminuant ou supprimant l'entretien. La caractéristique la plus intéressante de ces alimentations de puissance est certainement le rendement, car le convertisseur idéal à un rendement égal à 1 puisqu'il comporte :

- ✓ Des composants réactifs : inductances et condensateurs,
- ✓ Des semi-conducteurs qui sont des interrupteurs électroniques. La puissance qu'ils consomment est négligeable tant à l'état bloqué que passant, car les courants qui lui les traversent ou les tensions à leurs bornes sont voisines de zéro.

Pour une meilleure gestion de l'énergie les futurs composants de puissances doivent avoir :

- ✓ Puissance élevée, forte densité de puissance,
- ✓ Fonctionnement possible à haute température,
- ✓ Fonctionnement possible à haute fréquences,
- ✓ Meilleur rendement de fonctionnement.

## **Chapitre 3**

### **L'EFFET PHOTOVOLTAIQUE**

## L'effet photovoltaïque

### 3.1 Introduction

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la Terre. Le soleil est une source d'énergie disponible gratuitement et utilisable de plusieurs façons. Le solaire photovoltaïque, source d'énergie verte par excellence.

L'exploitation directe de l'énergie solaire et la production de l'électricité, nécessite une installation photovoltaïque réussie, par une conception et une installation rigoureuse avec des composants qui répondent au besoin et tiennent leur promesses.

Le terme énergie solaire est un peu ambigu, en effet, toute source lumineuse peut être convertie en électricité. Ceci dit, le soleil étant la source la plus intense de notre environnement.

Le mot "photovoltaïque" vient de "photo", la lumière en grec ancien, et du nom de l'inventeur de la pile électrique Alessandro Volta. Mais c'est le savant français Antoine Becquerel qui est le premier, en 1839, mit en évidence cette conversion particulière de l'énergie : la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière.

Sous l'exposition solaire, la production électrique d'un panneau solaire dépend de :

- ✓ Ses dimensions,
- ✓ Sa technologie,
- ✓ Du rayonnement reçu,
- ✓ De la durée d'exposition.

Sous un ensoleillement maximum de  $1000 \text{ W/m}^2$ , un module photovoltaïque en silicium cristallin de  $1 \text{ m}^2$  produit une puissance instantanée d'environ  $100 \text{ W}$ .

### 3.2 Le potentiel solaire

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la Terre. Le soleil est une source d'énergie disponible gratuitement et utilisable de plusieurs façons. Le soleil, bien que distant de 150 millions de kilomètres de notre planète [08], est assurément notre plus grande source d'énergie. Les réactions nucléaires qui ont lieu dans le soleil entretiennent et renouvellent en permanence cette source d'énergie.

L'énergie dégagée par le soleil est considérable, provient des réactions de fusions nucléaires qui ont lieu à sa surface (transformation d'hydrogène H en hélium He).

Réaction de fusion nucléaire transformant l'hydrogène en hélium [21]:

- ✓ Perte de masse .....  $4,2 \cdot 10^9 \text{ Kg/s}$ ,
- ✓ Puissance émise .....  $3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$ ,
- ✓ Irradiance .....  $6,3 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$ ,
- ✓ Température de surface .....  $5760 \text{ }^\circ\text{K}$ .

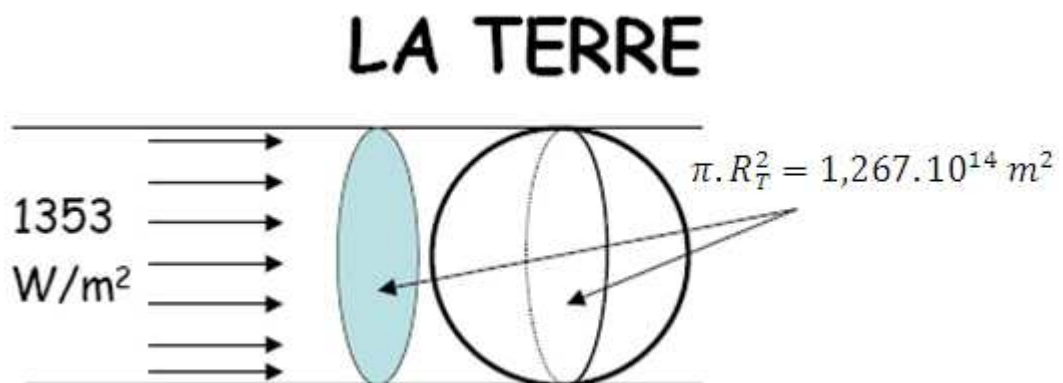


Figure 3.1 : Rayonnement solaire reçu par la terre.

Et par conséquence :

Puissance totale reçue ( $1,267 \cdot 10^{14} \cdot 1353$ ) ... ..  $1,7 \cdot 10^{17} \text{ W}$ ,

Au niveau de la Terre et par an ( $8760h$ ) ... ..  $15,6 \cdot 10^{17} \text{ KWh}$ ,

A la surface de la Terre et par an (météo) ... ..  $7,5 \cdot 10^{17} \text{ KWh}$ ,

Consommation d'énergie mondiale... ..  $1,1 \cdot 10^{17} \text{ KWh}$ .

### 3.3 Rayonnement solaire

Le soleil, ce gigantesque central nucléaire rayonne son énergie dans tout l'espace dont, heureusement pour nous, seule une partie parvient sur terre, en raison de la

distance qui sépare le Soleil de la Terre (150 millions de km). Par temps clair, à midi, on reçoit une puissance d'environ 1000 W par m<sup>2</sup>.

Le soleil est à l'origine de la plupart des sources d'énergie présentes sur terre : chaleur, lumière, croissance des végétaux, élévation des masses d'eau, vents, courants marins,...

L'énergie dégagée par le soleil est considérable, approximativement 66 millions de watts par m<sup>2</sup> [14].

Chaque jour, le soleil envoie sur la terre plus d'énergie que les 6 milliards d'habitants de la planète n'en consomment en 25 ans [13].

### 3.4 Rôle de l'atmosphère

L'énergie lumineuse dite extraterrestre c'est-à-dire hors atmosphère a été évaluée avec précision par la NASA et vaut 1367 W/m<sup>2</sup>. Il s'agit du rayonnement solaire reçu, à un instant donné au-dessus de l'atmosphère terrestre, en incidence normale. On appelle cette valeur constante solaire. Mais cette énergie qui descend en ligne droite vers notre planète va subir des transformations en traversant l'atmosphère : par absorption et par diffusion.

Donc, toute l'énergie solaire n'atteint pas la surface de la terre, la radiation solaire, en particulier les infrarouges subissent toutes sortes d'interactions avec les molécules, les poussières et les aérosols présents dans l'atmosphère. Seulement un quart de l'énergie solaire atteint la surface de la Terre.

Les rayons solaires sont :

- ✓ soit réfléchis dans l'espace au contact des molécules et des particules de l'atmosphère,
- ✓ soit absorbés par le sol avec stockage d'énergie,
- ✓ soit renvoyés par la surface terrestre sous forme de rayons infrarouges donc de chaleur.

Ces derniers diffusent dans l'atmosphère et sont piégés en partie par les poussières et certains gaz, puis renvoyés vers la Terre. Le réchauffement qui en résulte, appelé effet de serre, est indispensable à la vie.

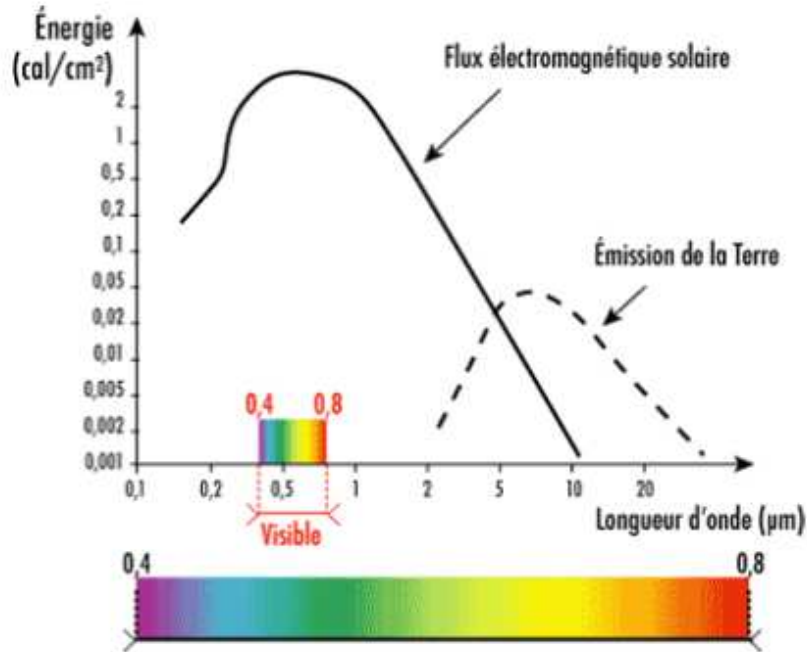


Figure 3.2 : Courbes électromagnétiques du Soleil et de la Terre.

### 3.5 La notion Masse d'air (AM)

On appelle masse d'air, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu.

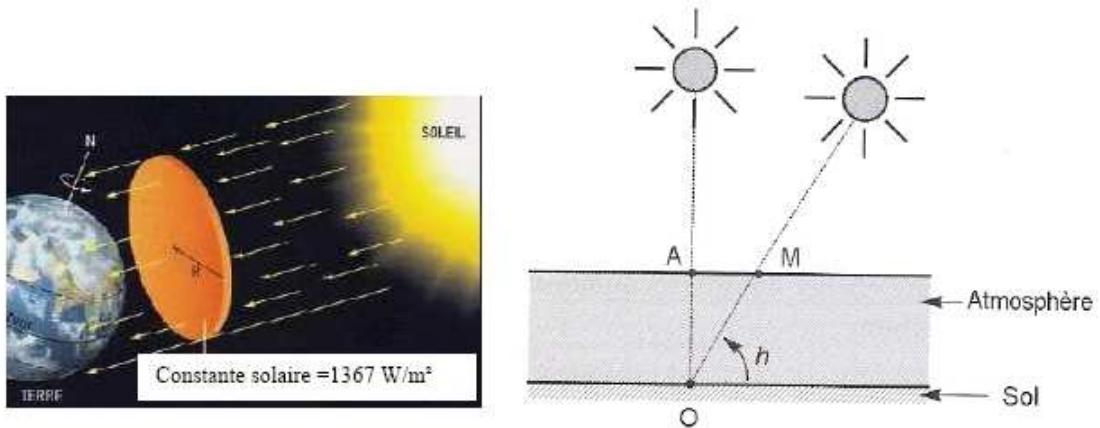


Figure 3.3 : La notion de masse d'air.

$$\text{Masse d'air} = \frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (3.1)$$

L'expression de la masse d'air ( $AM_x$ ),  $x$  désigne ce rapport ( $OM/OA$ ).

Soleil au zénith (au niveau de la mer) :  $AM_1$

Soleil à  $48^\circ$  :  $AM_{1,5}$

Par convention,  $AM_0$  désigne le rayonnement solaire hors atmosphère.

### 3.6 Les conditions Standard (STC)

Les conditions standard STC (Standard Test Conditions) sont [04]:

- ✓ Rayonnement solaire 1000 (W/m<sup>2</sup>),
- ✓ Spectre solaire AM1,5,
- ✓ Température ambiante 25 °C.

### 3.7 Le spectre solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant une énergie donnée par la relation :

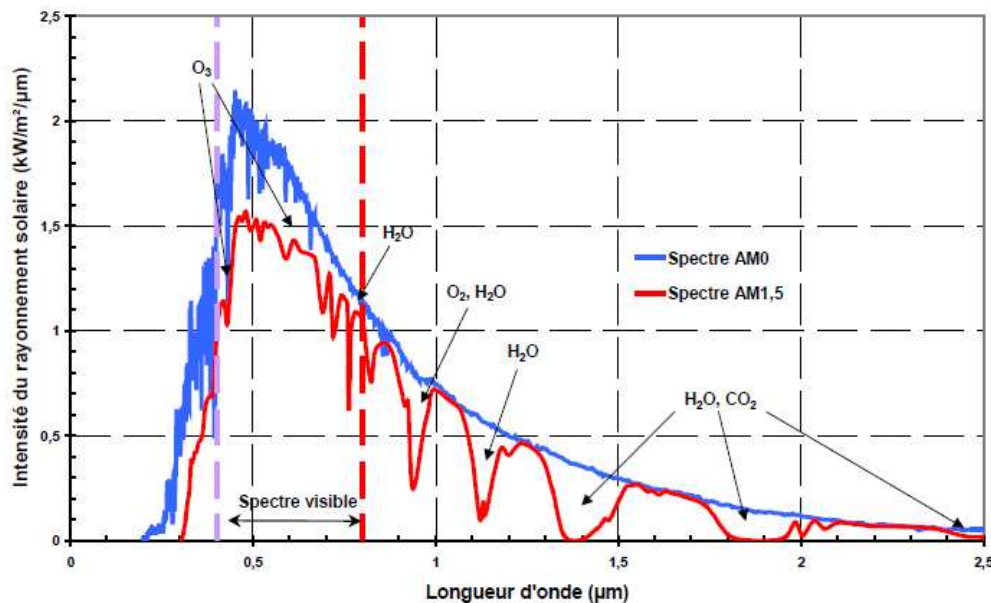
$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.2)$$

La relation directe entre l'énergie d'un photon exprimée en électronvolts et sa longueur d'onde exprimée en micromètres :

$$E(eV) = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} \quad (3.3)$$

Le spectre solaire, sous le non de  $AM_0$  est réparti comme suit :

- ✓ Ultraviolet  $0,20 < \lambda < 0,38\mu m$  6,4%,
- ✓ Visible  $0,38 < \lambda < 0,78\mu m$  48,0%,
- ✓ Infrarouge  $0,78 < \lambda < 10\mu m$  45,6%.



**Figure 3.4 :** Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère ( $AM_0$ ) et à l'incidence 48° ( $AM_{1,5}$ ) [33].

### 3.8 Principe de l'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la transformation (conversion) directe de la lumière en électricité (courant continu CC). Le rayonnement solaire, peut être converti directement en électricité, sous forme de courant continu, au moyen des cellules photovoltaïques (photopiles).

Pour produire cet effet, un photon doit posséder au minimum une énergie égale à la largeur de bande interdite  $E_g$  qui constitue donc le seuil photovoltaïque [31].

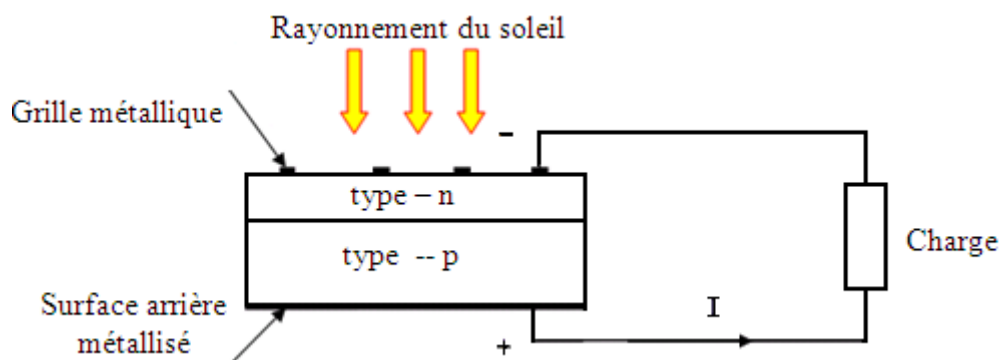
#### 3.8.1 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque c'est une diode de type spécial, optimisée pour absorber des photons du soleil et les convertir en énergie électrique.

La structure la plus simple d'une cellule solaire comporte une jonction entre deux zones dopées différemment, un semi conducteur de type  $N$  et un semi conducteur de type  $P$  séparés par une zone de charge d'espace (ou zone de transition) d'un même matériau (homo jonction  $P - N$ ) ou entre deux matériaux (hétérojonction).

Sous l'effet d'un rayonnement lumineux incident, les électrons des bandes de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création de paire électron-trou. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones  $P$  et  $N$ . Ainsi, on applique une tension entre les faces extérieures de la jonction : la photopile est prête à fonctionner.

La tension générée par une cellule photovoltaïque peut varier entre  $0,3 V$  et  $0,7 V$  en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule [26].



**Figure 3.5 :** Schéma représentatif d'une cellule photovoltaïque alimentant une charge.

### 3.8.2 Procédé de fabrication

Les cellules photovoltaïques sont généralement réalisées à base de silicium, soit tranchées à partir de lingots, soit sous forme de rubans de silicium, soit en couches minces déposées sur un support.

L'élaboration d'une cellule photovoltaïque à partir du sable ensuite de lingot nécessite un grand nombre d'étapes. Ces étapes permettent de faire évoluer la matière depuis son état normal et désordonné (le sable) vers une structure de grande complexité et la mieux ordonnée possible. Les principales étapes sont [10]:

- ✓ Purification du silicium,
- ✓ Tirage du lingot,
- ✓ Sciage du lingot,
- ✓ Traitement des plaquettes.

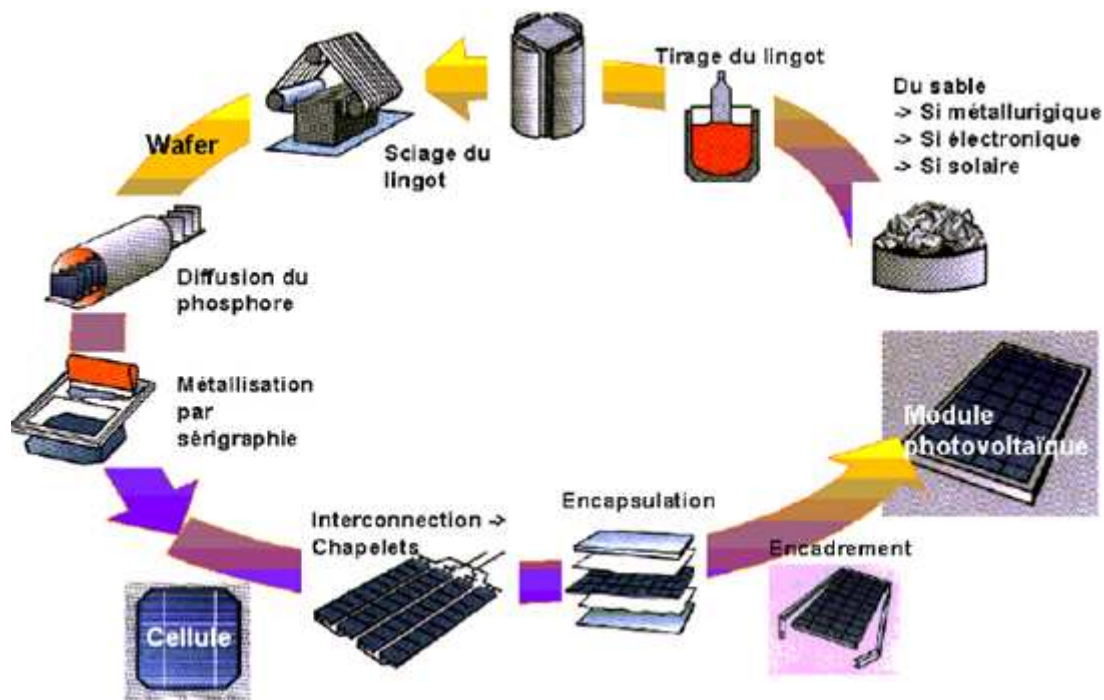


Figure 3.6 : Différentes étapes de la production d'un module photovoltaïque.

### 3.8.3 La caractéristique d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par la courbe  $I - V$  non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de la température.

Il y a trois points importants sur cette courbe :

- ✓ Le point de fonctionnement optimal *PPM* (la puissance maximale de la cellule),
- ✓ Le point du courant maximal ( $I_{SC}$ ). Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court circuit ( $I_{SC}$ ) et dépend fortement du niveau d'éclairement,
- ✓ Le point de la tension maximale de la cellule ( $V_{OC}$ ). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ).

### 3.8.4 Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque

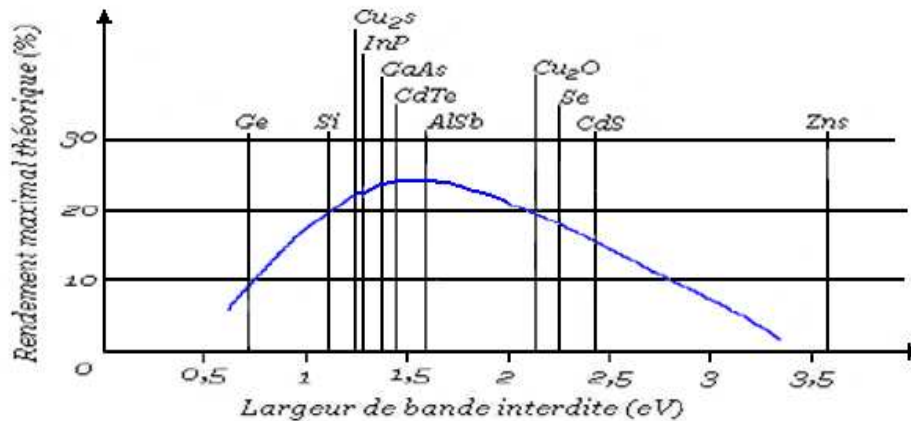
Beaucoup de semi-conducteurs, comme le silicium (Si), l'arséniure de gallium (*GaAs*) sont utilisés dans les technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque, mais le rôle du silicium est de loin prédominant.

Le silicium est le matériau de base de 90 % de l'industrie photovoltaïque. Ce semi-conducteur présente en effet, différents avantages :

- ✓ Il est abondant à la surface du globe terrestre et facilement extrait à partir du sable,
- ✓ Il n'est pas toxique,
- ✓ Il possède un oxyde naturel ( $SiO_2$ ) présentant d'excellentes propriétés électroniques,
- ✓ Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore).

Mais son véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct : pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100  $\mu m$  pour le silicium, alors que seulement 1,0  $\mu m$  de GaAs suffisent (gap direct). De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1,0 et 1,7 eV) : le *GaAs*, avec une largeur de bande interdite de 1,38 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés.

Loferski a donné dès 1956 le rendement théorique en fonction de la largeur de bande interdite des matériaux :



**Figure 3.7 :** Rendement théorique maximal des semi-conducteurs à  $AM_0$  et sans recombinaison.

### 3.8.5 Les différents types de cellules photovoltaïques

Il existe trois types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques :

#### 3.8.5.1 Les cellules mono- cristallines

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches.

Les cellules monocristallines ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % au laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe [26].

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients:

- ✓ Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère,
- ✓ Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur,
- ✓ Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée.

#### 3.8.5.2 Les cellules poly-cristallines

La cellule poly-cristalline est composée d'un agglomérat de cristaux. La cellule poly-cristalline est caractérisées par :

- ✓ Coût de production moins élevé,
- ✓ Nécessite moins d'énergie,
- ✓ Rendement de 11 à 15% et jusqu'à 19,8 % au laboratoire [26].

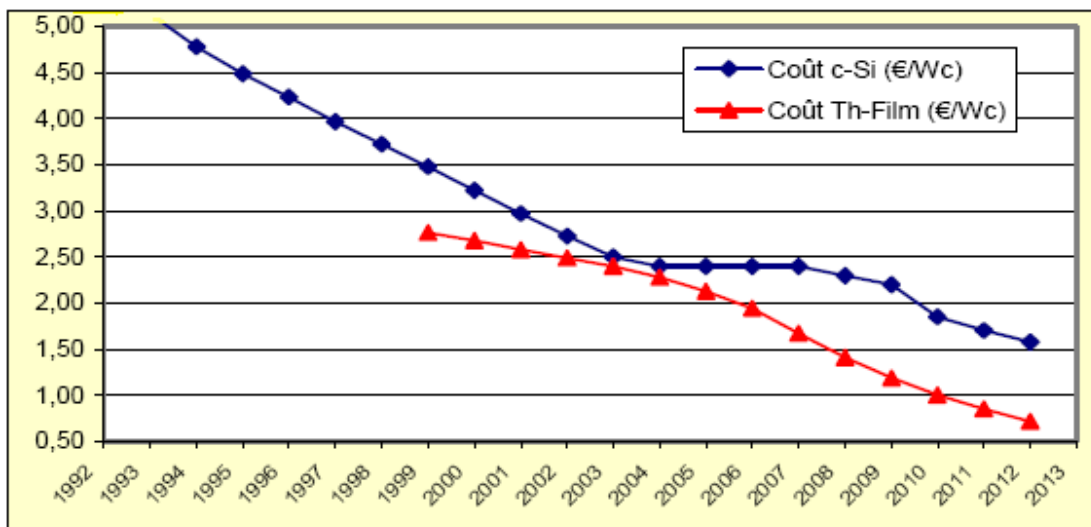
### 3.8.5.3 Les cellules amorphes

Le silicium amorphe, a-Si, est actuellement utilisé dans la fabrication et la conception de plusieurs composants: transistor à effet de champ, cellules solaires, composants quantiques, circuits intégrés, circuits logiques, etc. Ce succès est principalement attribué à ses bonnes caractéristiques ainsi qu'à la possibilité d'obtenir ce matériau sur de larges surfaces avec un faible coût de préparation.[19]

Plusieurs raisons justifient l'utilisation des matériaux organiques, pour la fabrication des cellules photovoltaïques, la plus importante se trouve dans les avantages particuliers de ces matériaux. Ces matériaux étant synthétiques, ils offrent l'avantage d'une technologie de fabrication aisée et peu coûteuse d'un côté et la possibilité d'être déposé en couches minces sur de grandes surfaces d'un autre coté. Néanmoins les rendements de cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques en phase solide restent assez faibles comparés à ceux des semi-conducteurs minéraux. Cela est dû au moins en partie au processus de photogénération de charges libres par absorption d'un photon qui reste mal compris dans les semi-conducteurs organiques. [09]

La cellule amorphe est caractérisée par :

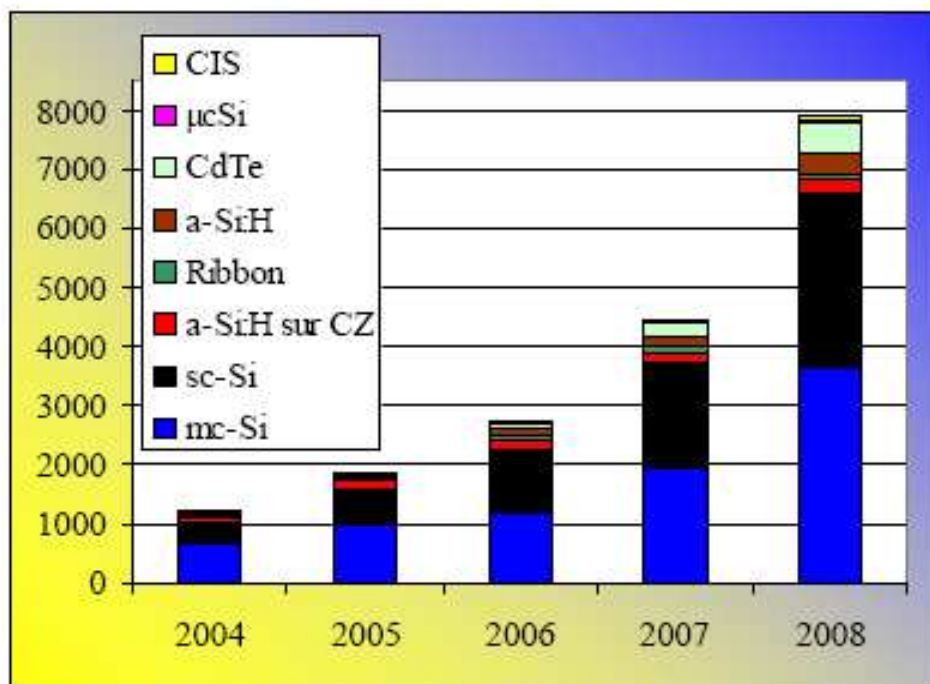
- ✓ Coût de production bien plus bas,
- ✓ Faible rendement,
- ✓ Fonctionne sous très faible éclaircissement,



**Figure 3.8 :** Evolution temporelle des coûts de fabrication des modules (1993-2012) en Europe [02].

Types de silicium	Rendement théorique	Rendement en laboratoire	Rendement commercial	Domaine d'application
Silicium monocristallin	27,0 %	24,7 %	12,0 - 18,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades ; pour appareils de faibles puissances ; pour l'espace (satellites)
Silicium polycristallin	27,0 %	19,8 %	11,0 – 15,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades ; pour générateurs de toutes tailles
Silicium amorphe	25,0 %	13,0 %	5,0 – 8,0 %	Modules de grandes dimensions pour intégration dans les bâtiments ; pour appareils de faibles puissances (calculatrices, montes)

**Figure 3.1 :** Rendement et domaines d'application de diverses cellules photovoltaïques.



**Figure 3.9 :** Production mondiale de cellules par technologie MWc (2004-2008) [02].

Avec

$\mu$ s-Si : les films minces de silicium cristallin,

CIS : le diséliniure de cuivre et d'indium,

CdTe : le tellure de cadmium,

a-Si :H : le silicium amorphe hydrogéné.

### 3.8.6 La conversion photovoltaïque

La conversion de la lumière en électricité met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- ✓ L'absorption de la lumière (photons) dans le matériau,
- ✓ La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres,
- ✓ La collecte de ces charges dans un circuit électrique extérieur.

La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption des photons donnant lieu à la création de paires électron-trou. Un champ électrique permanent, au sein du matériau, assure une séparation rapide de ces paires pour éviter des phénomènes de recombinaison et attirés les charges libérées hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique. L'épaisseur nécessaire de la cellule photovoltaïque pour réaliser ce phénomène n'est que de quelques dizaines de microns, mais pour des raisons mécaniques, les cellules atteignent généralement des épaisseurs de 200 à 400  $\mu$ m [38].

Enfin, le couplage de ce dispositif avec des électrode collectrices ou grilles, en face avant et arrière, permet la connexion de la cellule à un circuit électrique externe. Cette grille métallique doit présenter une résistance de contact petite en comparaison avec les différentes résistances du dispositif (résistance de base et de front).

Des recherches pour « énergie de future », ont un objectif général de développement de nouveaux concepts de cellules photovoltaïques exploitant les potentialités de l'ingénierie photonique à l'échelle micro-nanométrique :

- ✓ Pour capturer les photons incidents,
- ✓ Pour augmenter leur absorption [11].

### **3.8.7 Constitution d'un générateur photovoltaïque**

Le générateur photovoltaïque est composé particulièrement par :

#### **3.8.7.1 Les cellules solaires**

La cellule solaire photovoltaïque est l'unité de base d'un système photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur), capable de convertir directement la lumière en électricité. Le courant obtenu est un courant continu.

#### **3.8.7.2 Les modules**

La cellule individuelle, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement 2 W avec une tension de 0,5 V [34]. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module [D].

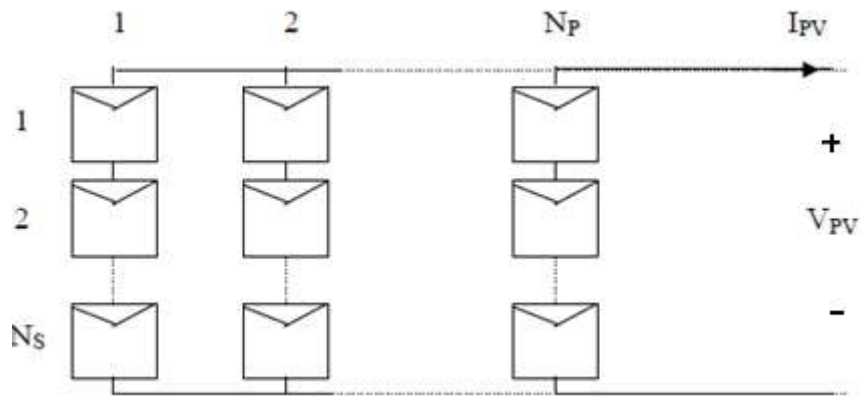
#### **3.8.7.3 Le générateur photovoltaïque**

Afin de fournir la tension puissance photovoltaïque désirée à une tension à CC indiquée, des modules photovoltaïques sont typiquement assemblés selon une combinaison série et parallèle. L'ensemble des modules dans un système photovoltaïque s'appelle un champ photovoltaïque.

Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ photovoltaïque et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, comprend tous les équipements entre le champ photovoltaïque et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque et des équipements de consommation (charge).

Il y a des recherches dont l'objectif est de proposer un système permettant de détecter et de localiser les défauts dans des installations photovoltaïques, pour superviser et diagnostiquer leurs installations [17].



**Figure 3.10 :** Champ photovoltaïque de  $N_s$  modules en séries et de  $N_p$  branches en parallèles.

Un champ photovoltaïque se compose de plusieurs cellules photovoltaïques des recherches ont l'objectif de proposer un système permettant de détecter et de localiser les défauts dans des installations photovoltaïques pour superviser et diagnostiquer leurs installations.

#### 3.8.7.4 Dimensionnement du générateur

Le dimensionnement des générateurs photovoltaïques est primordial. Il s'agit de trouver le meilleur compromis entre les besoins en électricité et les coûts encore élevés des générateurs. C'est pourquoi des logiciels de dimensionnement ont été élaborés afin d'optimiser la taille des générateurs, tout en tenant compte des paramètres externes (climat, masques...).

A partir des données (besoins, autonomie, saison d'utilisation...), le logiciel détermine la puissance crête du générateur photovoltaïque à installer [38].

### 3.9 Les différents paramètres d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont :

#### 3.9.1 La courbe courant-tension

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque depuis le court-circuit (tension nulle, correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

La courbe I-V d'une cellule photovoltaïque est non linéaire et dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température [07].

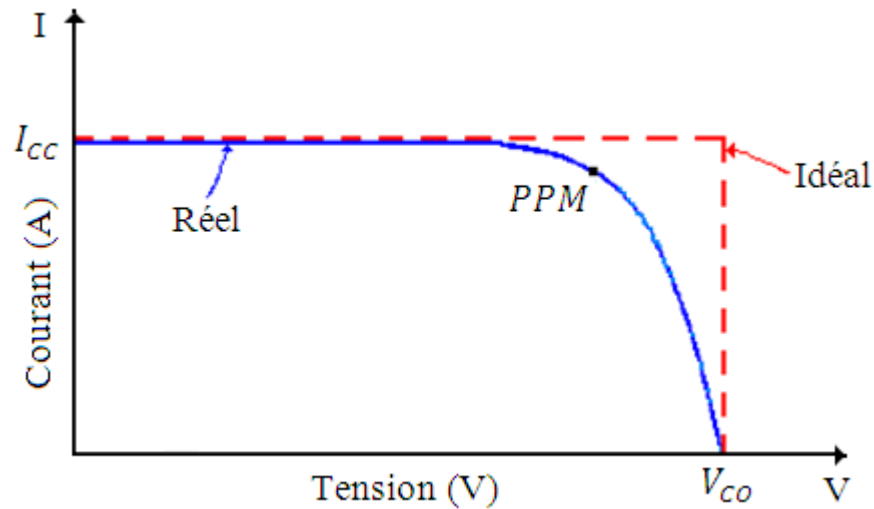


Figure 3.11 : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque [05].

### 3.9.2 Tension de circuit ouvert $V_{CO}$

Elle représente la tension aux bornes de la cellule en l'absence de tout courant, sous éclairement sans circuit de charge.

### 3.9.3 Courant de court-circuit $I_{CC}$

C'est le courant débité par une cellule en court-circuit sous éclairement.

### 3.9.4 Le point de fonctionnement optimal (PPM)

Il existe une valeur de photo courant correspondant à une tension aux bornes de la cellule pour laquelle cette puissance électrique générée est optimale. Ce point s'appelle le  $PPM(V_m, I_m)$  en anglais (Maximum Power Point). C'est le point de la puissance maximale de la cellule.

Avec

$V_m$ : Tension correspondant à la puissance maximale,

$I_m$ : Courant correspondant à la puissance maximale.

### 3.9.5 Facteur de forme

Il détermine la qualité électrique de la cellule, c'est le rapport :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{CO} \cdot I_{CC}} \quad (3.4)$$

### 3.9.6 Le rendement

L'énergie est conservée, il n'y a pas de production d'énergie, mais il y a des transformateurs d'énergie qui convertissent des formes d'énergie inutiles vers des formes utiles. Ces transformateurs peuvent être caractérisés par leur rendement qui est la fraction de l'énergie effectivement transformée en la forme utile recherchée[B].

Le rendement de conversion énergétique d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre la puissance électrique fournie par la cellule et la puissance incidente.

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{inc}} \quad (3.5)$$

Avec

$P_{inc}$ : la puissance lumineuse totale incidente sur la cellule.

### 3.10 Caractéristique P-V d'une cellule photovoltaïque

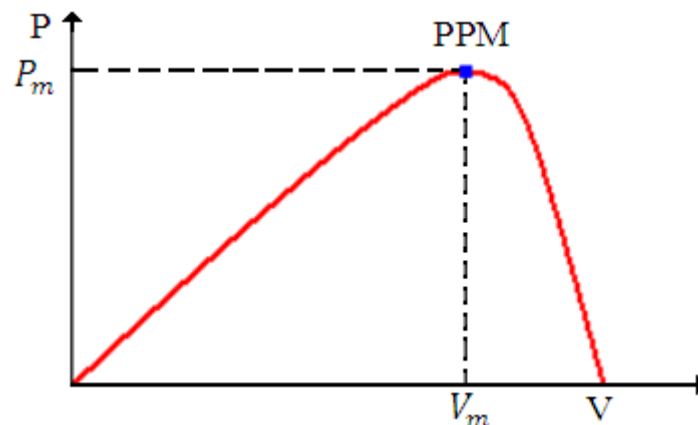
La puissance générée par une cellule photovoltaïque est donnée par la relation :

$$P = V \cdot I \quad (3.6)$$

La puissance maximale est obtenue lorsque :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (3.7)$$

La caractéristique P-V d'une cellule photovoltaïque peut être obtenue à partir de la caractéristique I-V et la relation de la puissance ( $P = V \cdot I$ ) .



**Figure 3.12 :** Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque.

La puissance crête d'une cellule photovoltaïque s'exprime en  $W_C$  (watt crête). C'est la puissance qu'il peut fournir s'il est branché sur sa charge optimale et soumis à un éclairement de  $1000 W/m^2$  (spectre  $AM_{1,5}$ ) alors que la température est de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ .

### **3.11 Conclusions**

Le soleil est à l'origine de la plupart des sources d'énergie présentes sur terre : chaleur, lumière, croissance des végétaux, élévation des masses d'eau, vents, courants marins,...

La transformation directe de la lumière en électricité par l'effet photovoltaïque s'effectue sans bruit, sans émission de gaz : elle est donc par nature totalement propre. Par ailleurs, l'absence de mise en mouvement de pièces mécaniques lui confère un niveau de fiabilité inégalable (durée de vie moyenne d'un module estimée à plus de 30 ans).

Malgré les espoirs initiaux suscités par les nombreux avantages potentiels de cette nouvelle source d'énergie électrique, celle-ci ne s'est pas imposée en dehors du domaine spatial, en raison d'obstacles techniques, et surtout économiques (cout élevé, rendement faible).

## **Chapitre 4**

# **MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE**

## Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque

### 4.1 Introduction

Le générateur photovoltaïque est responsable de la conversion instantanée de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque est constitué a plusieurs modules photovoltaïque reliés en série et en parallèle selon la puissance requise, et chaque module est constitué a plusieurs cellules solaires photovoltaïques reliés aussi en série et en parallèle.

### 4.2 La modélisation d'une cellule photovoltaïque

#### 4.2.1 Cas idéal

Une cellule photovoltaïque peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction  $PN$  d'une diode classique.

A partir de la caractéristique  $I - V$  d'une cellule photovoltaïque, nous pouvons considérer que le courant d'une cellule photovoltaïque est la différence entre un courant  $I_{CC}$  proportionnel à la quantité de photons reçus par la cellule et le courant  $I_D$  d'une jonction non éclairée :

$$I = I_{CC} - I_D = I_{ph} - I_D \quad (4.1)$$

$$I = I_{ph} - I_S \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_D}{n \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (4.2)$$

Avec

$I$  : Le courant fourni par la cellule,

$V_D$  : La tension fournie par la cellule.

$$I_D = I_S \left[ \exp \left( \frac{q \cdot V_D}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

Avec

$I_S$ : le courant de saturation (courant inverse de la jonction),

$q$  : la charge de l'électron,

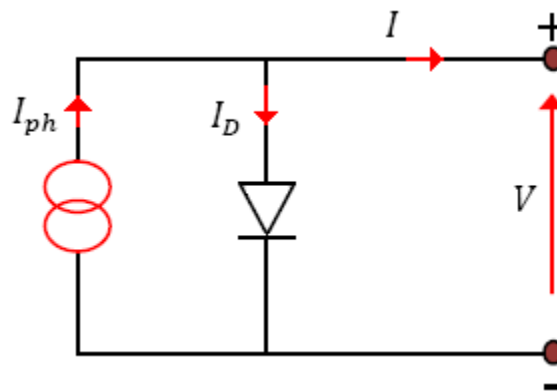
$n$  : un facteur d'idéalité de la diode, sa valeur est compris entre 1 et 2,

Le facteur d'idéalité  $n$  varie en fonction du semi-conducteur et des dimensions de la diode.

$K$ : la constante de Boltzmann,

$T$ : la température (en °K).

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule photovoltaïque est :



**Figure 4.1** : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéal.

#### 4.2.2 Cas réel

La performance d'une cellule photovoltaïque est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances ( $R_S$  et  $R_p$ ).

- ✓  $R_S$  : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contacts (Semi conducteur, électrodes). Elle s'exprime par :

$$R_S = \rho \frac{L}{S_g} + R_m \quad (4.4)$$

Avec

$\rho$  : la résistivité de la grille,

$L$  : la longueur de la grille,

$S_g$ : section des grilles collectrices,

$R_m$  : résistance propre du matériau, sa valeur est faible

(< 2  $\Omega$  pour les cellules au silicium),

- ✓  $R_p$  : résistance parallèle, provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'au non idéalité de la jonction.

Les résistances  $R_S$  et  $R_P$ , modifient le courant de court-circuit de la cellule en photocourant  $I_{ph}$ , on aura donc le montage électrique équivalent suivant :

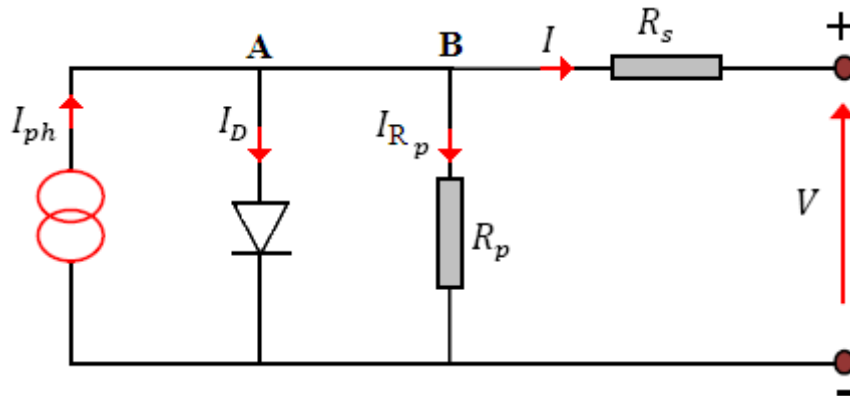


Figure 4.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [16].

Appliquons la loi de **Kirchoff** aux nœuds A, B :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{R_p} \quad (4.5)$$

Où :

$I$  est le courant débité par la cellule, qui est la somme algébrique de trois courants :

$I_{ph}$  est le photo courant indépendant de  $V$  (ou de  $R_S$ ), il est proportionnel au flux incident (taux de génération- recombinaison) et aux longueurs de diffusion des porteurs :

$$I_{ph} = q \cdot g(L_n + L_p) \quad (4.6)$$

$I_D$  est le courant diode, il est de même ordre de grandeur que  $I_{R_p}$  pour les faibles tensions et il devient très grand au voisinage de  $V_{CO}$ , il s'écrit sous forme :

$$I_D = I_S \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_D}{n \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (4.7)$$

$I_{R_p}$  est le courant traversant  $R_p$ , si  $R_p$  est très grande, il devient très faible est indépendant de la tension :

$$I_{R_p} = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (4.8)$$

Avec

$$V_D = R_p \cdot I_{R_p} = V + R_s \cdot I \quad (4.9)$$

En utilisant les relations (4.6) et (4.7) et (4.8), on obtient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{n \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (4.10)$$

La présentation graphique  $I - V$  de l'équation (4.10) est :

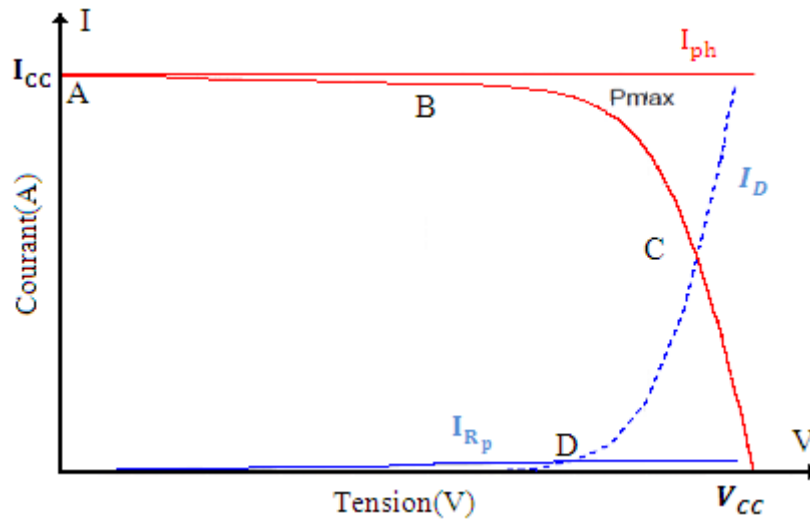


Figure 4.3 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.

### 4.3 Caractéristique $I - V$ d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique  $I - V$  représente la courbe de puissance, sachant que le courant généré est donné par la formule (4.10) et que la cellule photovoltaïque fonctionne sous un éclairement fixe  $E$  et une température constante  $T$ .

On remarque que la caractéristique  $I - V$  correspond à la soustraction de deux courbes, (courbe  $I_{ph}$  - courbe  $I_D$ ).

Le fonctionnement de la cellule est caractérisé essentiellement par trois zones :

**La zone AB :** dans cette région le courant  $I$  est donné presque constant, la cellule se comporte comme un générateur de courant (presque constant de valeur voisine de  $I_{cc}$ ). Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites,

**La zone CD** : c'est la région correspondant aux valeurs élevées de  $R_C$ . La cellule se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert  $V_{CO}$ . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées,

**La zone BC** : le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables.

#### 4.4 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque sont :

##### 4.4.1 Courant de court circuit $I_{CC}$

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation (4.10) :

$$I_{CC} = I_{Ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q \cdot R_S \cdot I_{CC}}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{R_S \cdot I_{CC}}{R_P} \quad (4.11)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ( $R_S = 0$  et  $R_P \rightarrow \infty$ )

$$I_{CC} = I_{Ph} = q \cdot g(L_n + L_p) \quad (4.12)$$

Tenant compte de l'effet des résistances  $R_S$  et  $R_P$  ; le courant de court circuit varie en fonction de ces deux résistances et il est proportionnel au flux incident.

##### 4.4.2 Tension en circuit ouvert $V_{CO}$

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (4.10) :

$$0 = I_{Ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q \cdot V_{CO}}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{CO}}{R_P}$$

Dans le cas d'une cellule idéal ( $R_S = 0, R_P \rightarrow \infty, I_{Ph} = I_{CC}$ ) :

$$V_{CO} = n \cdot \frac{KT}{q} \text{Log} \left[ \frac{I_{CC}}{I_0} + 1 \right] \quad (4.13)$$

Donc

$V_{CO}$  augmente quand  $I_0$  diminue, elle ne dépend que de la nature du cristal et de la jonction.

### 4.4.3 Facteur de forme FF

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{Opt}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{CC} \cdot V_{CO}} \quad (4.14)$$

Il caractérise l'influence mixte des résistances série et parallèle sur la caractéristique  $I - V$  de la cellule photovoltaïque.

### 4.4.4 Rendement ( $\eta$ )

Le rendement est le rapport entre la puissance électrique maximale de sortie ( $P_{max}$ ) et la puissance du rayonnement solaire incident ( $P_i$ ).

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{V_m \cdot I_m}{E \cdot S} \quad (4.15)$$

Avec

$P_i$ : puissance incidente sur la surface de la cellule photovoltaïque ( $W$ ),

$E$ : éclairement global incident sur la cellule photovoltaïque ( $W/m^2$ ),

$S$ : surface totale de la cellule photovoltaïque ( $m^2$ ),

$(I_m, V_m)$ : coordonnées du point de fonctionnement.

## 4.5 Groupement des cellules photovoltaïques

### 4.5.1 Module photovoltaïque

La tension générée par une cellule photovoltaïque au silicium monocristallin, fonctionnant au point de puissance maximale sous l'éclairement de référence  $1000 W/m^2$  est de l'ordre de  $0,55 V$  et le courant est fonction de la surface de la cellule. Il convient donc de grouper en série et parallèle des cellules élémentaires pour adapter la tension et le courant en fonction des contraintes de la charge à alimenter.

Le module photovoltaïque est un groupement de cellules photovoltaïques, constitué de  $N_{SC}$  cellules en séries, et  $N_{PC}$  branches en parallèles.

Donc le courant et la tension d'un module photovoltaïque est :

$$I_M = N_{PC} \cdot I_C \quad (4.16)$$

$$V_M = N_{SC} \cdot V_C \quad (4.17)$$

Où :

$I_M$  et  $V_M$  : sont le courant et la tension du module,

$I_C$  et  $V_C$  : sont le courant et la tension de la cellule.

Une association série - parallèle de cellules photovoltaïques donne une caractéristique  $I - V$  théorique semblable à la courbe de la cellule de base. En conséquence, tout ce qui a été dit pour une cellule individuelle restera valable pour un groupement.

#### **4.5.2 Champ photovoltaïque**

Le champ photovoltaïque est un groupement de modules photovoltaïques, constitué de  $N_{SM}$  modules en séries, et  $N_{PM}$  branches en parallèles. On suppose que les modules sont identiques et l'éclairement est le même sur tout les modules, alors le courant et la tension du champ peuvent être données par :

$$I_{Ch} = N_{PM} \cdot I_M \quad (4.18)$$

$$V_{Ch} = N_{SM} \cdot V_M \quad (4.19)$$

Où :

$I_{Ch}$  et  $V_{Ch}$  : sont le courant et la tension du champ photovoltaïque,

$I_M$  et  $V_M$  : sont le courant et la tension du module photovoltaïque.

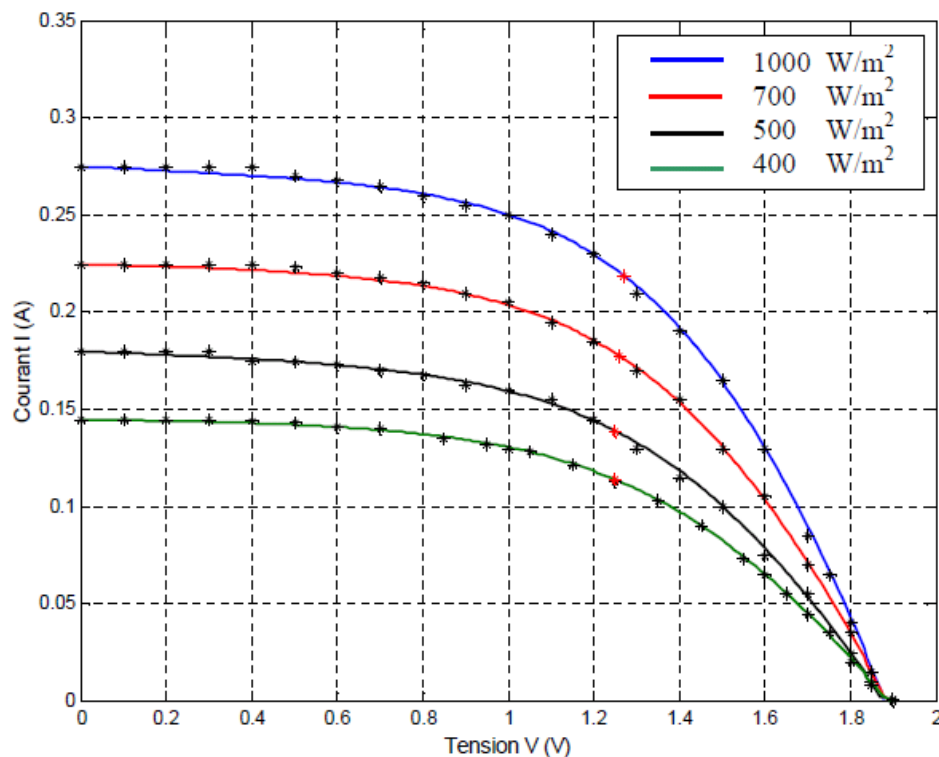
L'association série - parallèle de modules photovoltaïques aura de même une caractéristique  $I - V$  théorique semblable à la courbe du module de base, et obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes [25].

## 4.6 Facteurs limitatifs du rendement

La caractéristique  $I - V$  d'une cellule photovoltaïque dépend fortement de l'insolation et de la température.

### 4.6.1 Influence du flux

La caractéristique  $I - V$  d'une cellule photovoltaïque dépend fortement de l'insolation. A une température constante, l'augmentation du flux lumineux (ensoleillement) se traduit par un déplacement de la caractéristique  $I - V$  suivant le sens positif de l'axe des courants.



**Figure 4.4 :** L'influence du flux sur la caractéristique  $I - V$  de la cellule photovoltaïque à une température constante 25°C [24].

L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique.

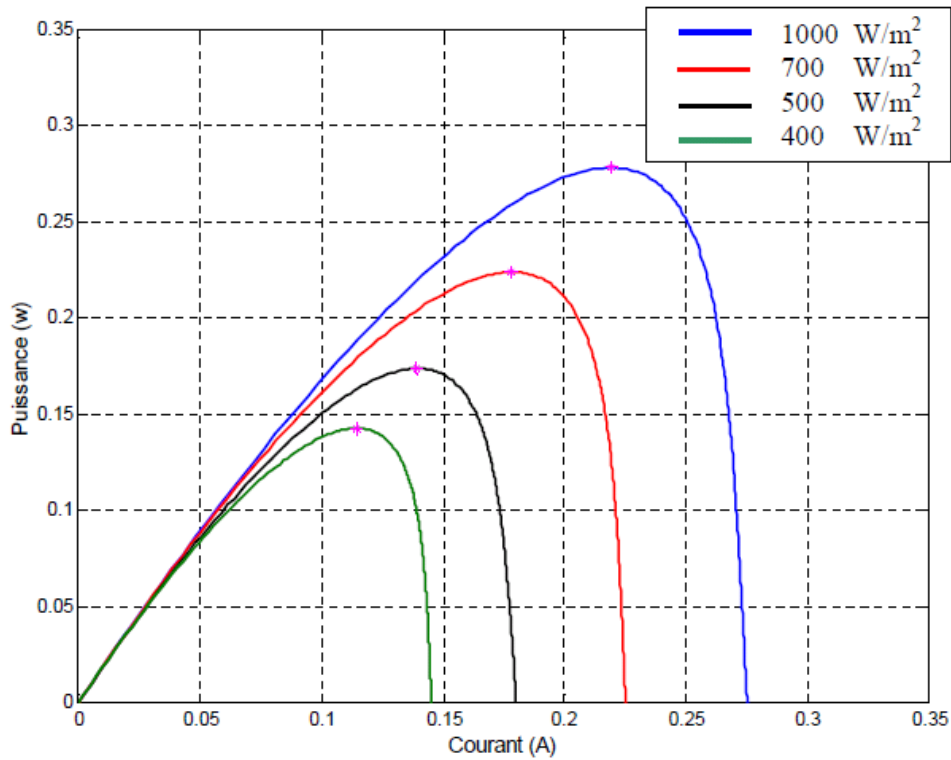


Figure 4.5 : L'influence du flux sur la caractéristique  $P - I$  de la cellule photovoltaïque à une température constante 25°C [24].

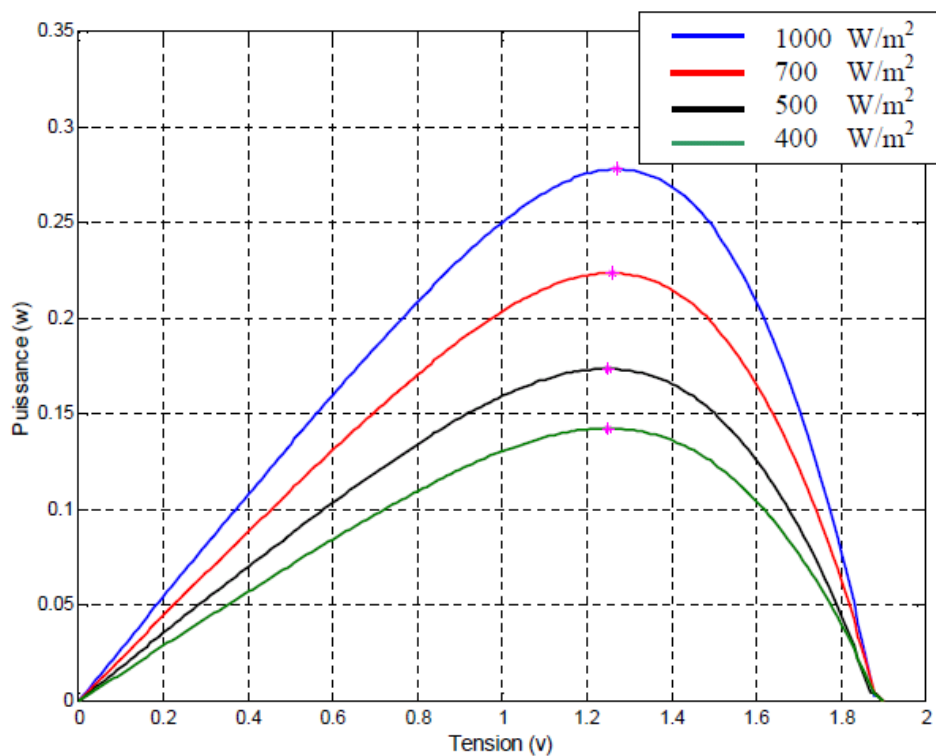
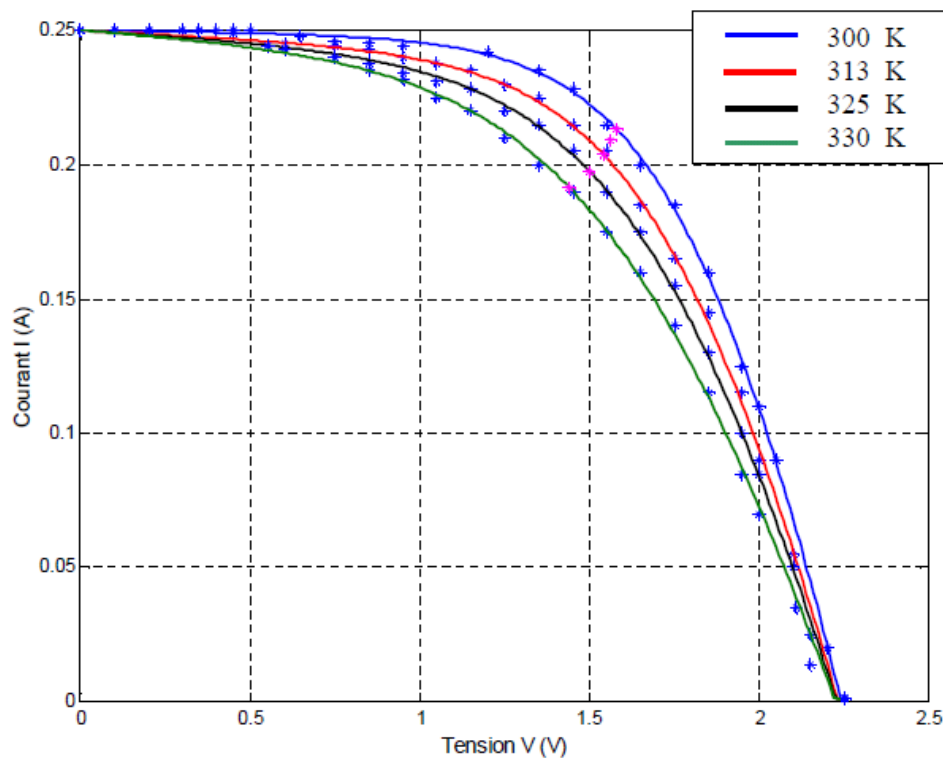


Figure 4.6 : L'influence du flux sur la caractéristique  $P - V$  de la cellule photovoltaïque à une température constante 25°C [24].

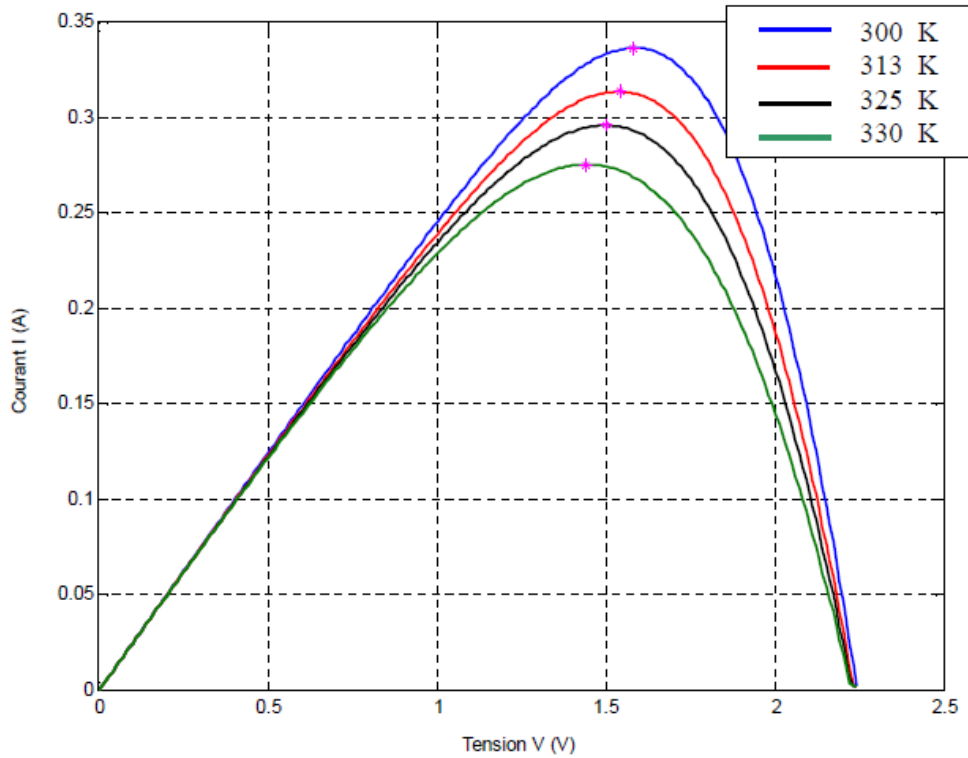
### 4.6.2 Influence de la température

Si la température de la cellule augmente, le photo-courant  $I_{ph}$  augmente également due principalement à la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Cette augmentation est de l'ordre de 0,1% par degré °C. Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite et entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 mV par cellule.

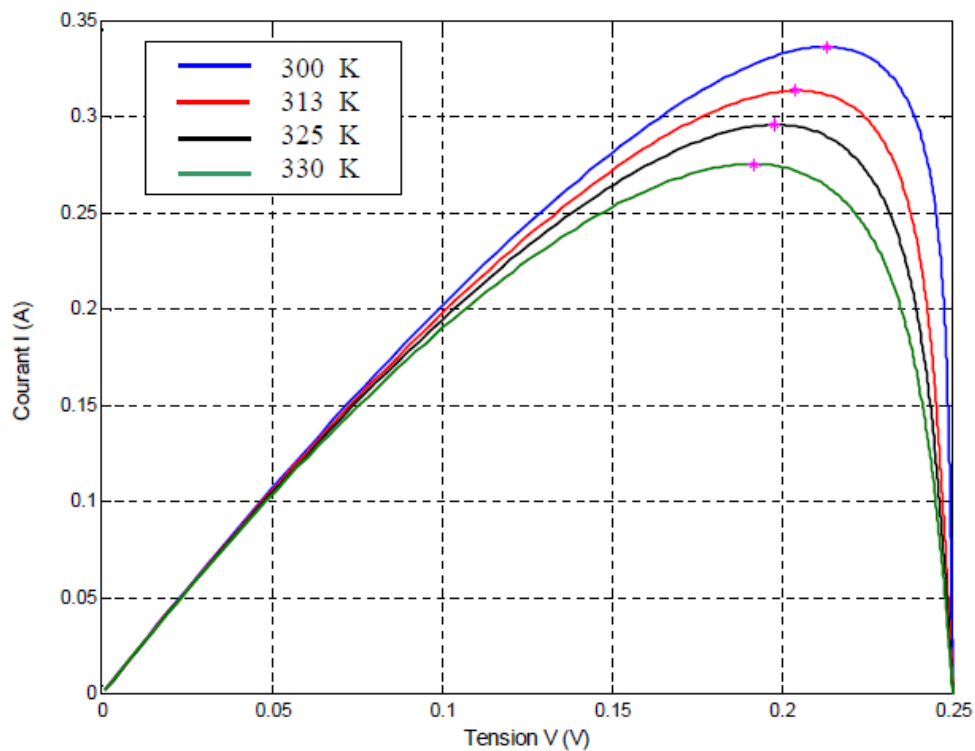


**Figure 4.7 :** L'influence de la température sur la caractéristique  $I - V$  de la cellule photovoltaïque sous un éclairage fixe  $E = 1000 \text{ W/m}^2$  [24].

La diminution de la puissance fournie est estimée environ de 0,5% par degré pour un module.



**Figure 4.8 :** L'influence de la température sur la caractéristique  $P - V$  de la cellule photovoltaïque sous un éclairement fixe  $E = 1000\text{W/m}^2$  [24].

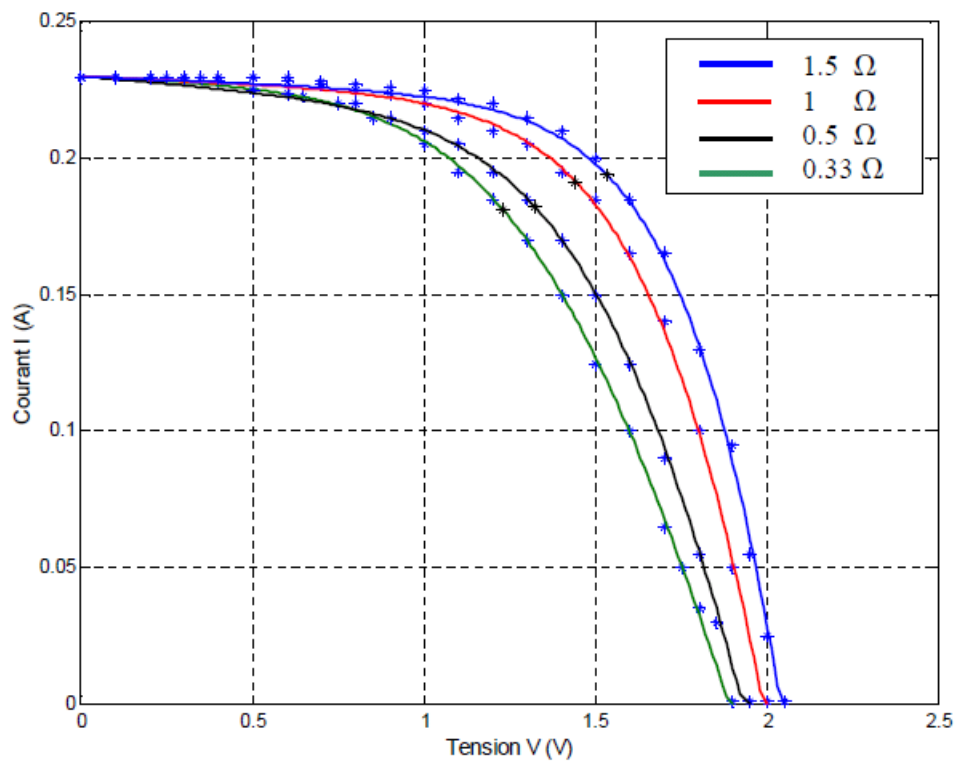


**Figure 4.9 :** L'influence de la température sur la caractéristique  $P - I$  de la cellule photovoltaïque sous un éclairement fixe  $E = 1000\text{W/m}^2$ .

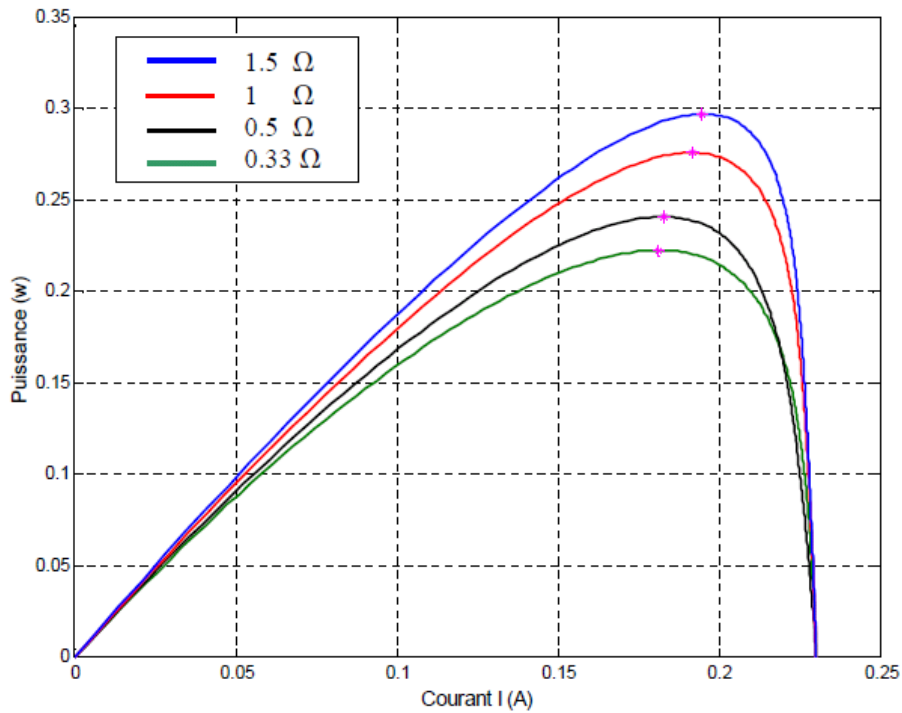
### 4.6.3 Influence de la résistance série $R_S$

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

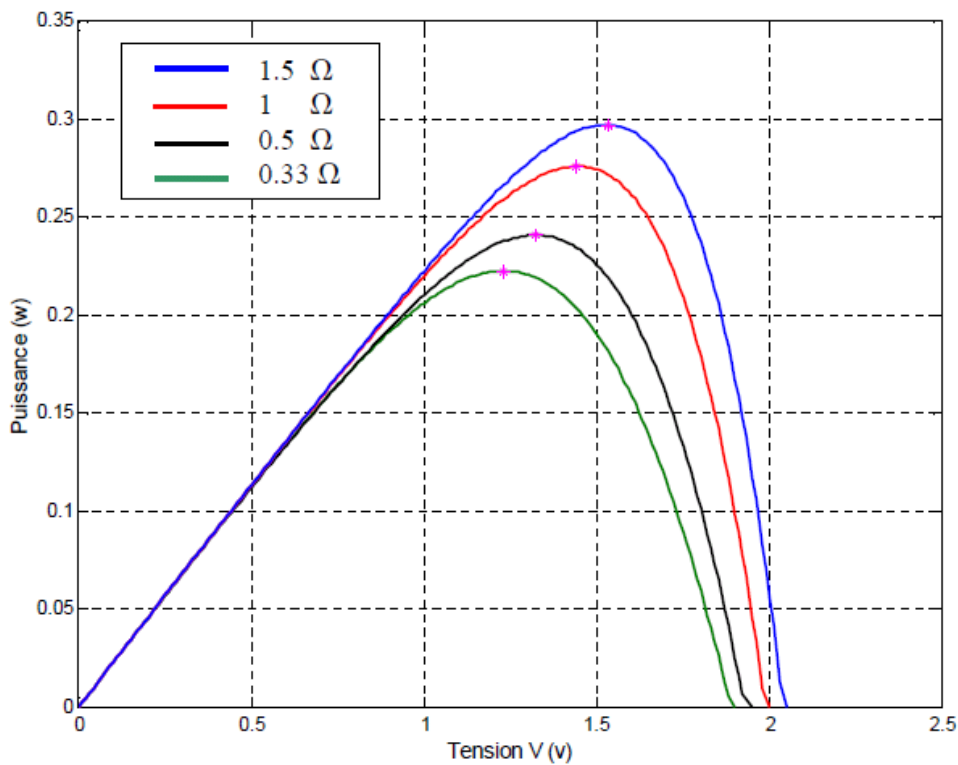
Les contacts semi conducteur – électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion.



**Figure 4.10 :** L'influence de la résistance en série sur la caractéristique  $I - V$  de la cellule photovoltaïque sous un éclairement  $E = 1000 \text{ W/m}^2$  et à une température  $T = 25^\circ\text{C}$  [24].



**Figure 4.11 :** L'influence de la résistance en série sur la caractéristique  $P - I$  de la cellule photovoltaïque sous un éclairement  $E = 1000 \text{ W/m}^2$  et à une température  $T = 25^\circ\text{C}$  [24].



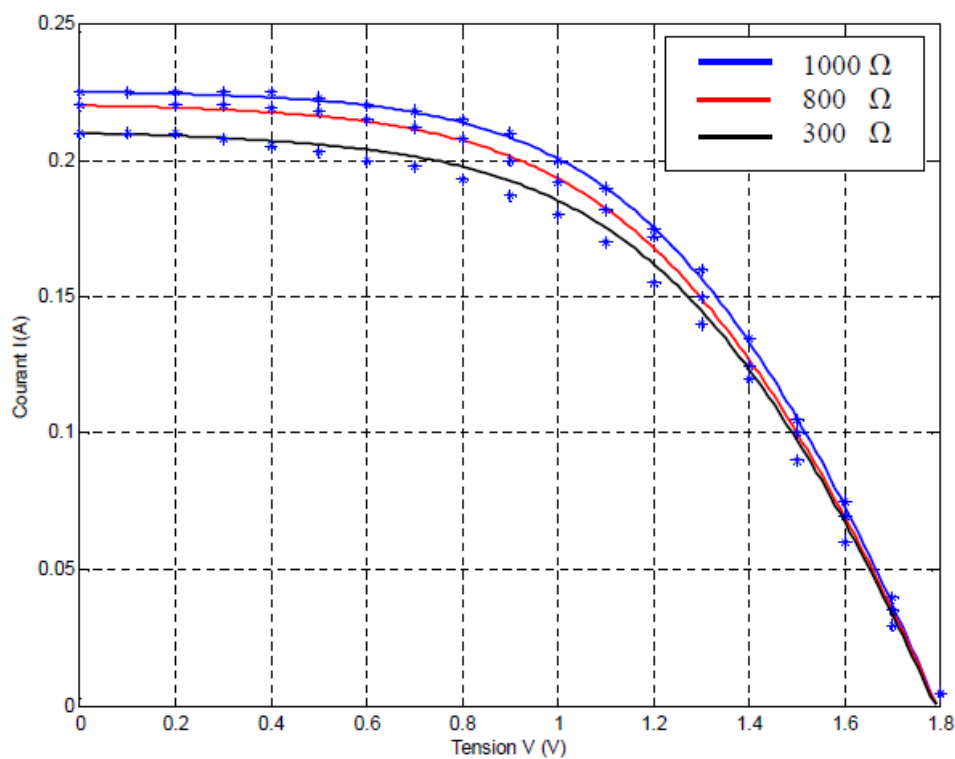
**Figure 4.12 :** L'influence de la résistance en série sur la caractéristique  $P - V$  de la cellule photovoltaïque sous un éclairement  $E = 1000 \text{ W/m}^2$  et à une température  $T = 25^\circ\text{C}$ .

#### 4.6.4 Influence de la résistance parallèle $R_p$

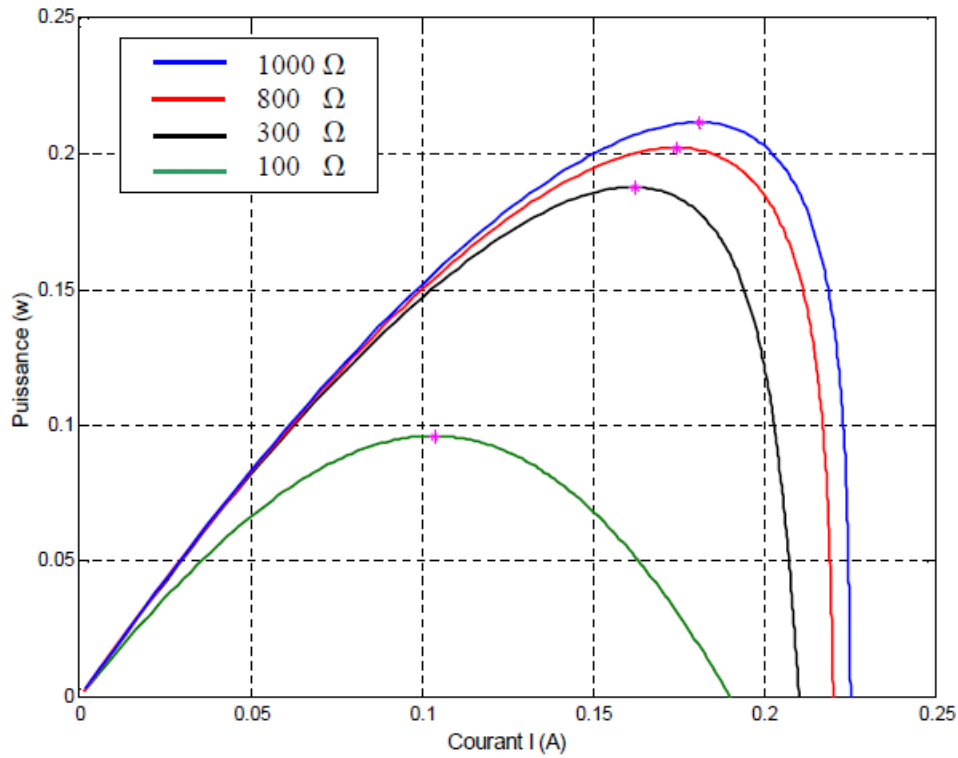
La résistance parallèle caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle.

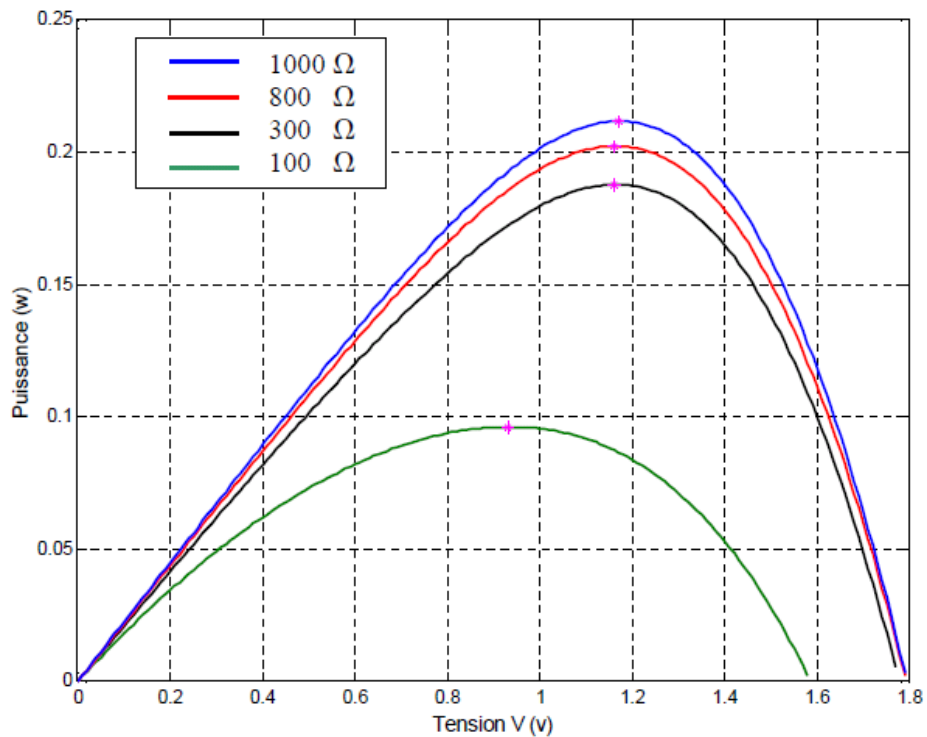
Ordre de grandeur de  $R_p$  pour une cellule au Si :  $R_p = 10^2$  à  $10^4$  alors  $R_p$  augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle.



**Figure 4.13** : L'influence de la résistance en parallèle sur la caractéristique  $I - V$  de la cellule photovoltaïque sous un éclairement  $E = 1000 \text{ W/m}^2$  et à une température  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  [24].



**Figure 4.14 :** L'influence de la résistance en parallèle sur la caractéristique  $P - I$  de la cellule photovoltaïque sous un éclairement  $E = 1000 \text{ W/m}^2$  et à une température  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  [24].



**Figure 4.15 :** L'influence de la résistance en parallèle sur la caractéristique  $P - V$  de la cellule photovoltaïque sous un éclairement  $E = 1000 \text{ W/m}^2$  et à une température  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  [24].

Tout ce qui a été dit pour une cellule élémentaire, concernant son comportement avec l'éclairement et la température ou l'influence des résistances série et parallèle, est directement transportable au cas de groupement.

#### **4.7 Conclusions**

Nous avons vu dans ce chapitre, que plusieurs paramètres peuvent influencer la caractéristique  $I - V$  d'une cellule photovoltaïque :

- ✓ l'influence de l'éclairement et la température : du fait de l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement (importance de la situation géographique).
- ✓ les résistances en série, en parallèle : ce qui conduit à l'importance de la technologie d'élaboration des cellules photovoltaïques et de fabrication des modules.

Les performances d'un système photovoltaïque dépendent de plusieurs facteurs, spécialement les conditions météorologiques telles que l'irradiation solaire, la température et la technologie d'élaboration des cellules photovoltaïques.

## **Chapitre 5**

# **PERFORMANCE DES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES UTILISÉS DANS LA CONVERSION D'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE**

## **Performances des composants électroniques utilisés dans la conversion d'énergie photovoltaïque**

### **5.1 Introduction**

L'évolution considérable de l'électronique de puissance et de la micro informatique a conduit à utiliser des convertisseurs statique à semi-conducteurs de puissance, qui sont très étendus est très diversifiés d'une part et d'autre part du nombre important de dispositif semi-conducteurs aux propriétés très diverses (diodes, thyristor, GTO, IGBT, ...).

La mise en œuvre de ces systèmes à l'aide de composant semi-conducteur, qui fonctionnant en commutation (interrupteurs), permet par des séquences convenables, un transfert d'énergie entre un générateur et un récepteur possédant des caractéristiques différentes.

### **5.2 Transformation d'énergie électrique**

L'électronique de puissance a pour but de modifier la présentation de l'énergie électrique avec un rendement maximum. Modifier la présentation de l'énergie électrique veut dire que :

- ✓ on transforme l'alternatif en continu : montages redresseurs,
- ✓ on transforme le continu en alternatif : montages onduleurs,
- ✓ on modifie la valeur efficace d'une tension alternative : montages gradateurs,
- ✓ on modifie la valeur moyenne d'une tension continue : montages hacheurs,
- ✓ on modifie la fréquence d'une tension alternative : montage cycloconvertisseurs.

L'électronique de puissance ayant le souci de travailler à rendement maximum ne peut être qu'une électronique de commutation où les composants ne fonctionnent qu'en interrupteurs ouverts ou fermés.

Les interrupteurs de l'électronique de puissance travaillent jusqu'à plusieurs dizaines de kHz. Seuls les interrupteurs statiques à base de semi conducteurs, supporterait de telles fréquences de fonctionnement.

Les interrupteurs statiques à base de semi conducteurs qui sont utilisés, on trouve :

- ✓ La diode,
- ✓ Le transistor bipolaire,
- ✓ Le transistor à effet de champ à grille isolé (MOS),
- ✓ L'IGBT (insulated gate bipolar transistor),
- ✓ Le thyristor,
- ✓ Le GTO (gate turn off).

### **5.3 Le système photovoltaïque**

Un système photovoltaïque est constitué du générateur, des charges à alimenter. Ces charges sont de type courant continu ou courant alternatif.

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes.

### **5.4 Les type de systèmes photovoltaïques**

Il y a trois types de systèmes photovoltaïques :

- ✓ Autonomes,
- ✓ Hybrides,
- ✓ Reliés au réseau.

#### **5.4.1 Systèmes autonomes**

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique.

Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie.

#### **5.4.2 Systèmes hybrides**

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés.

### **5.4.3 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau**

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur, convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA).

L'énergie produite est consommée sur place, l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires.

## **5.5 Avantages et inconvénients du système photovoltaïque**

Chaque système de production d'énergie a ces avantages et ces inconvénients :

### **5.5.1 Les avantages**

Les avantages d'un système photovoltaïque sont :

- ✓ La haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées,
- ✓ Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers,
- ✓ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé,
- ✓ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu,
- ✓ Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales,
- ✓ Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux besoins en matière d'électricité,
- ✓ Temps de réalisation d'une centrale photovoltaïque minimum,
- ✓ Il a une longue durée de vie,
- ✓ On élimine les frais et les risque de transport associé des énergies fossiles.

### **5.5.2 Les inconvénients**

Les inconvénients d'un système photovoltaïque sont :

- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé,
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible,
- ✓ Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées,

- ✓ Tributaire des conditions météorologiques,
- ✓ Il faut beaucoup de place pour installer une centrale,
- ✓ Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur photovoltaïque est unidirectionnelle et de faible voltage, elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur,
- ✓ Le stockage de l'énergie électrique dans des accumulateurs qui sont les plus souvent des batteries au Plomb. Sachant que les batteries ne doivent pas se décharger à plus de 60% (70% maximum) de leur capacité maximale. En outre, les batteries ont une faible durée de vie (3 à 5 ans), ce qui entraîne un surcoût au fonctionnement.

## **5.6 Les convertisseurs statiques d'énergie électrique**

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance en régime de découpage pour traiter l'énergie électrique à haut rendement et assurer les fonctionnalités suivantes :

- ✓ Transformation : génération d'une tension alternative à partir d'une source continue et vice versa,
- ✓ Régulation : alimentation constante d'une charge à partir d'une source variable,
- ✓ Adaptation : alimentation d'une charge basse tension à partir d'une source haute tension et vice versa.

La fonction de conversion d'énergie permet par des séquences de fonctionnement appropriées, de transférer l'énergie entre un générateur et un récepteur en changeant ou en adaptant les grandeurs qui les caractérisent.

Un convertisseur d'énergie est un équipement de conditionnement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge pour une charge continu (sans stockage avec une charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu, ou hacheur), soit entre la batterie et la charge (après stockage, il portera le nom de convertisseur continu- alternatif, ou onduleur).

La structure de base des convertisseurs repose sur des composants électroniques (interrupteurs), ces interrupteurs utilisés doivent être commandés à l'ouverture et à la fermeture tels que :

- ✓ Transistor bipolaire,
- ✓ Transistor MOSFET,

- ✓ Transistor IGBT,
- ✓ Thyristor GTO.

Le fonctionnement en commutation de ces composants fait que ces derniers seront souvent symbolisés par de véritables interrupteurs pour faire abstraction de la technologie employée qui dépend du niveau de puissance du montage considéré.

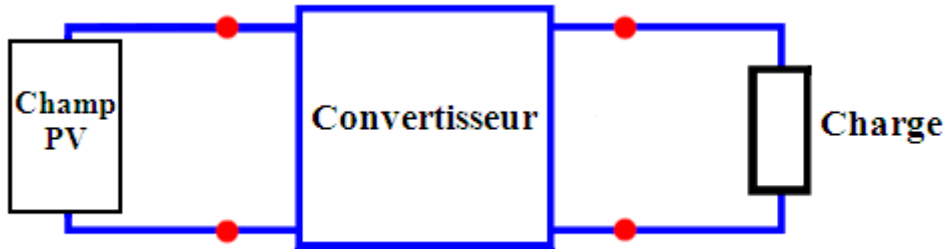


Figure 5.1 : La position d'un convertisseur.

## 5.7 Les différents types de convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont les dispositifs à composants électriques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique. Suivant le type de charge à commander et suivant la nature de la source de puissance, il y a plusieurs familles de convertisseurs :

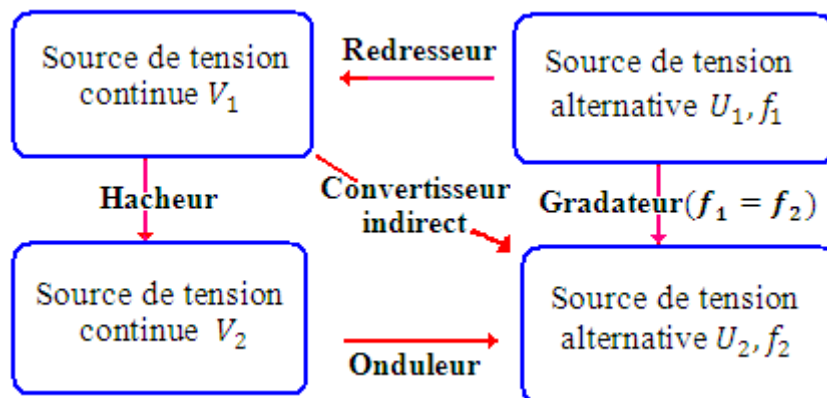


Figure 5.2 : Les différents convertisseurs statiques.

### 5.7.1 Le convertisseur alternatif – continu (redresseur)

Le redresseur est un convertisseur qui assure directement la conversion alternatif – continu, alimenté par une source de tension alternatif monophasé. Il permet d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie.

Donc le redresseur permet de transformer l'énergie alternative provenant en général du réseau en une énergie unidirectionnelle quasi-continue que l'on peut diriger vers les charges à courant continu.

### **5.7.2 Le convertisseur continu – continu (hacheur)**

Le hacheur ou le variateur de vitesse est un convertisseur statique à commutation forcée qui permet à partir d'une source à tension continu constant d'obtenir une tension continu variable (réglable).

Le hacheur est un convertisseur statique continu – continu permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

### **5.7.3 Le convertisseur continu- alternatif (Onduleur)**

Puisque les générateurs photovoltaïques fournissent des tensions continues, et comme la plupart des dispositifs commerciaux ont besoin d'une tension alternative. Alors, un élément de conditionnement de puissance est nécessaire entre les deux cotes CC et CA.

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure la conversion de l'énergie continu en énergie alternatif à tension et fréquence fixe ou variable sous forme d'un réseau monophasé ou triphasé.

Un onduleur doit accomplir trois fonctions :

- ✓ La transformation d'un courant continu (CC) en un courant alternatif (AC),
- ✓ Donner la forme sinusoïdale au courant alternatif,
- ✓ Amplifier la tension du champ PV au niveau de la charge.

### **5.7.4 Le convertisseur alternatif – alternatif (gradateur)**

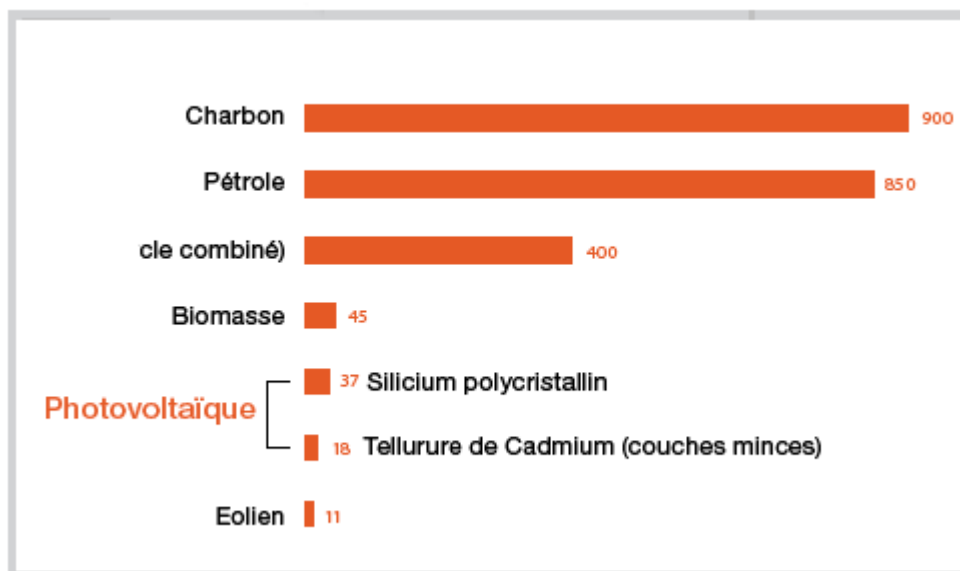
Un gradateur est un convertisseur qui alimenté par une source de tension alternatif, permet de faire varier la tension aux bornes du récepteur placé à sa sortie. Les tensions d'entrée et de sortie sont de même fréquence.

## **5.8 Avantages de l'électricité solaire photovoltaïque**

Plusieurs bonnes raisons de passer à l'électricité photovoltaïque grâce à ses nombreux avantages environnementaux et économiques, ainsi qu'à sa fiabilité avérée, le photovoltaïque s'affirme comme une source majeure d'électricité :

**Son carburant est gratuit.** Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire. Et le soleil brillera jusqu'à la fin des temps. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non toxique.

**L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants.** La combustion de ressources naturelles pour fabriquer de l'énergie engendre de la fumée, provoque des pluies acides, pollue l'eau et l'air. Cela génère aussi du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), l'un des principaux gaz à effet de serre. L'électricité solaire utilise seulement l'énergie du soleil comme carburant. Elle ne crée aucun coproduit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique.



**Figure 5.3 :** Gaz à effet de serre (en grammes d'équivalent  $CO_2$  par kilowattheure produit) [03].

**Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité.**

L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Au-delà, la puissance d'une cellule reste néanmoins supérieure à 80% de la puissance initiale. Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme.

**Les modules photovoltaïques sont recyclables** et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés. Le recyclage

n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.

**L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance.** Les modules photovoltaïques ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.

**L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.** Les systèmes photovoltaïques apportent une valeur ajoutée aux zones rurales. L'éclairage domestique, les systèmes de réfrigération des hôpitaux et le pompage de l'eau font partie des nombreuses applications possibles des systèmes non connectés au réseau. Les systèmes de télécommunications en zones isolées utilisent également des panneaux solaires.

**L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments.** Les modules solaires peuvent couvrir toits et façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique.

**L'électricité solaire photovoltaïque peut être gérée** dans les logements suivant des critères écologique, économique tout en respectant le confort pour l'utilisateur [30].

## **5.9 Historique du développement**

L'énergie solaire c'est un important potentiel à concrétiser, matière première "gratuite" mais énergie encore relativement coûteuse à collecter et à utiliser ; l'énergie solaire dispose en dépit de ses limitations intrinsèques d'un potentiel énorme que les progrès technologiques tentent encore d'élargir, particulièrement dans la filière photovoltaïque [29].

La solaire photovoltaïque source d'énergie verte par excellence est en plein essor. Sa production double tous les deux ans depuis 2002, ce qui en fait la branche la plus dynamique du secteur de l'énergie. Grâce au soutien de subventions gouvernementales, l'industrie progresse fortement et la recherche ouvre de nouvelles avenues tout en réduisant les coûts [32].

Le développement historique de la capacité photovoltaïque installée cumulée en Europe et dans le monde :

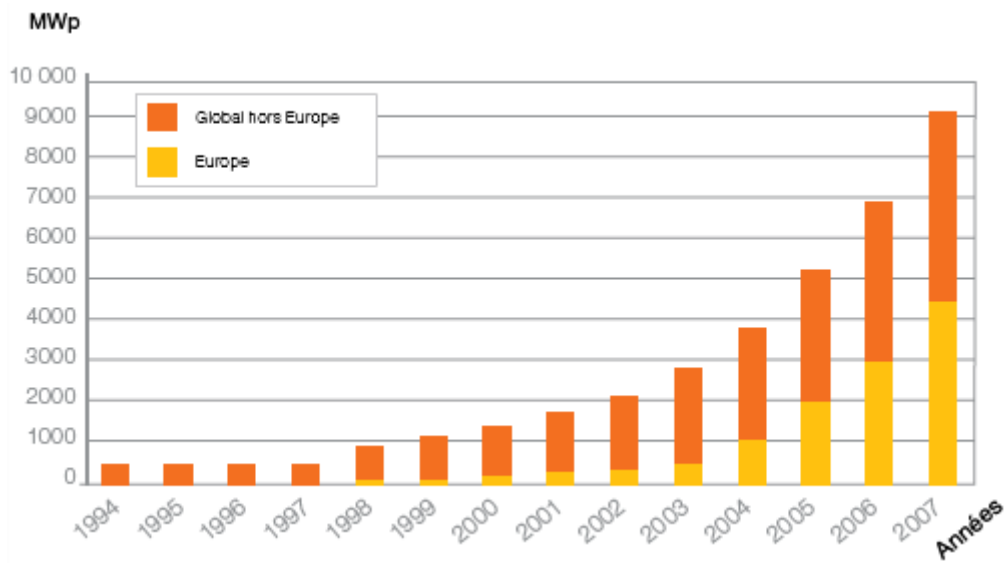


Figure 5.4 : L'évolution de la capacité photovoltaïque installée en Europe et dans le monde [15].

### 5.10 Potentiel de l'électricité photovoltaïque a long terme

En 2004, l'homme produisait et consommait 11,7 trillions de kWh/an d'énergie. Cette quantité croît très rapidement (augmentation de 2% de la production par an) [18].

Sur le long-terme, l'estimation mondiale, l'électricité solaire pourrait contribuer de façon significative à la consommation totale d'énergie.

Les efforts à mettre en œuvre pour réaliser ce potentiel doivent commencer dès maintenant. En passant aujourd'hui à l'énergie verte.

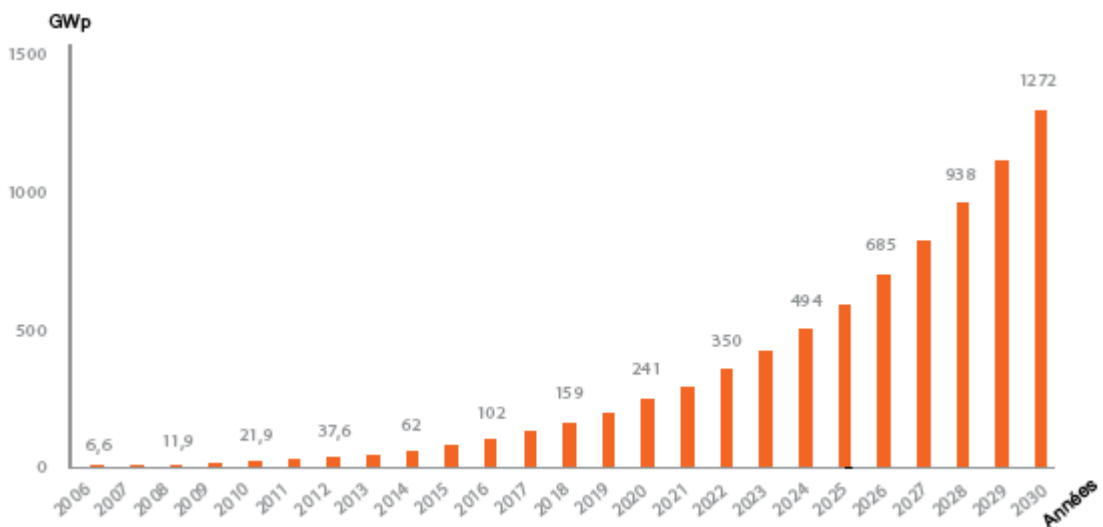


Figure 5.5 : Capacité mondiale cumulée jusqu'en 2030 – Scénario avancé [15].

## 5.11 Simulation des convertisseurs

### 5.11.1 Simulation d'un hacheur

La simulation d'un hacheur en série avec un transistor à partir d'une source photovoltaïque.

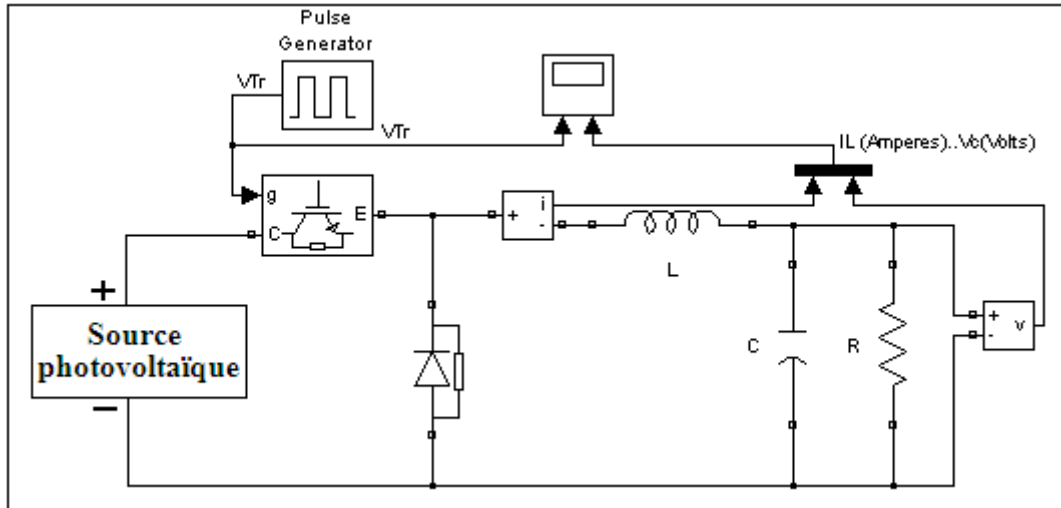


Figure 5.6 : Schéma du montage (simulation d'un hacheur).

La simulation a été réalisée à partir des données suivantes :

La tension de la source :  $V = 150 \text{ V}$ .

$R = 4,0 \Omega$ ,

$L = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ H}$ ,

$C = 10,0 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ .

Pour la diode :

$R = 0,001 \Omega$ ,

$V_F = 0,8 \text{ V}$ .

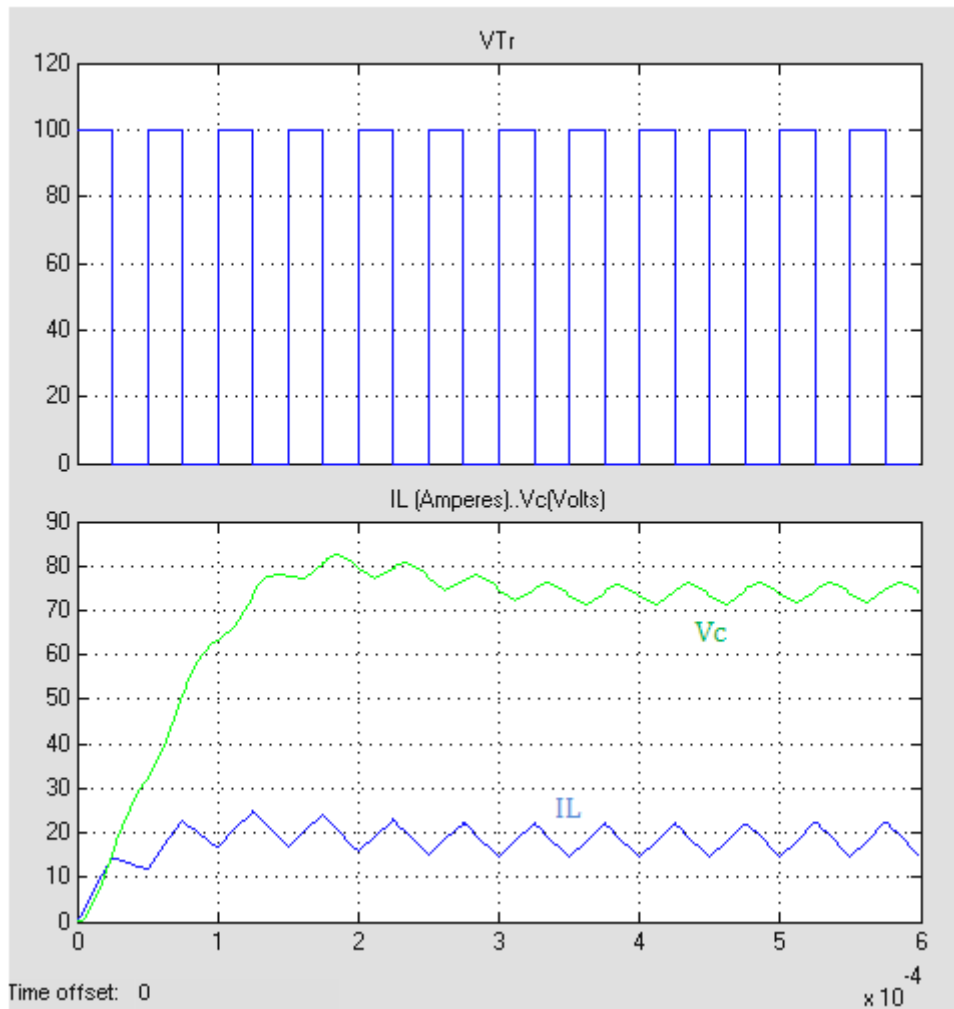
Pour le transistor :

$R = 0,001 \Omega$ ,

$V_F = 1,0 \text{ V}$ ,

Temps de chute de courant à 10% :  $T_f = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ .

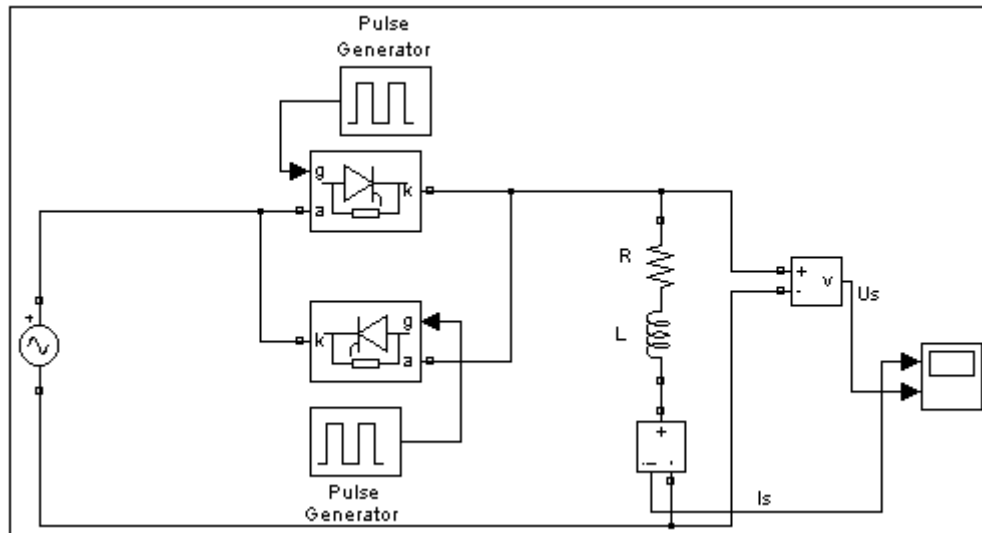
Résultats de la simulation :



**Figure 5.7 :** Courbes obtenues par simulation (hacheur) montrant la variation de  $V_{Tr}$ ,  $V_c$  et  $I_L$  en fonction du temps.

### 5.11.2 Simulation d'un gradateur monophasé

La simulation d'un gradateur monophasé à partir d'une source alternatif.



**Figure 5.8 :** Schéma du montage (simulation d'un gradateur monophasé).

La simulation a été réalisée à partir des données suivantes :

La source alternative :

- ✓ L'amplitude :  $311\text{ V}$ ,
- ✓ La phase initiale (degré) : zéro,
- ✓ La fréquence :  $f = 50\text{ Hz}$ .

La branche RL :

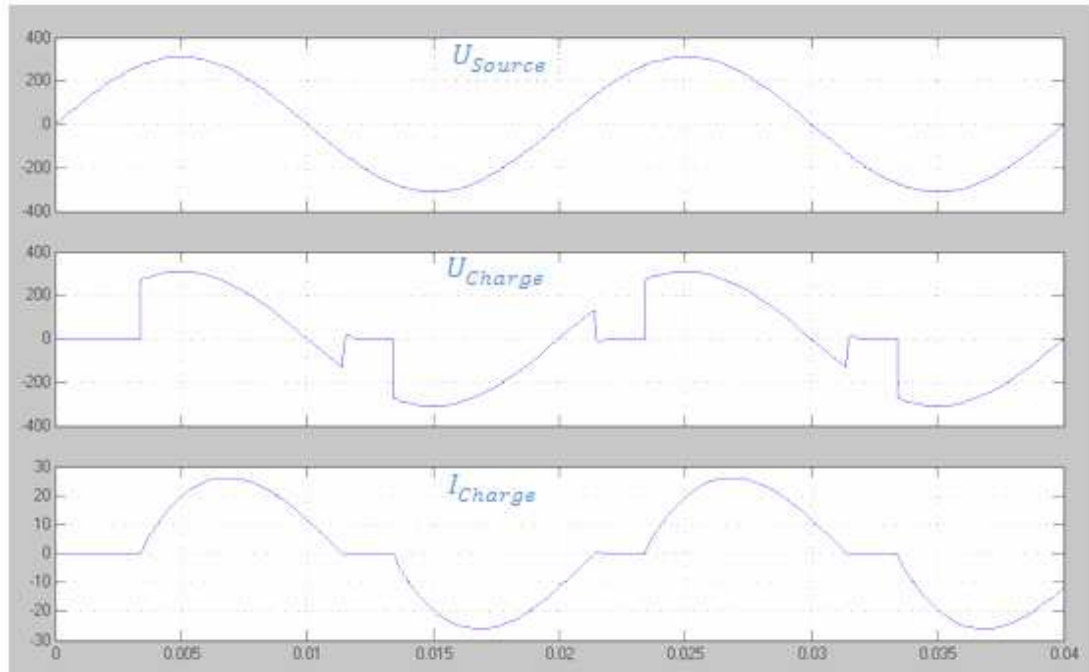
- ✓  $R = 10\ \Omega$ ,
- ✓  $L = 0,015\text{ H}$ .

Les deux thyristors sont identiques, ces caractéristiques sont :

$$R = 0,001\ \Omega,$$

$$V_F = 0,8\text{ V}.$$

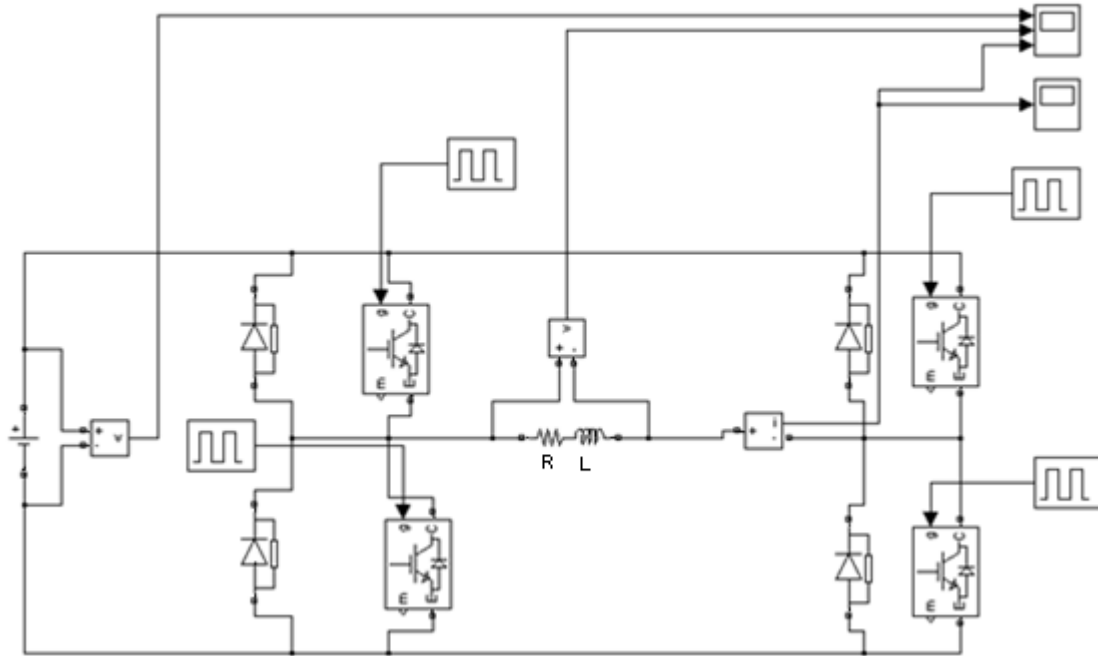
Résultats de la simulation :



**Figure 5.9 :** Courbes obtenues par simulation (gradateur monophasé) montrant la variation de  $U_{Source}$ ,  $U_{Charge}$  et  $I_{Charge}$  en fonction du temps.

### 5.11.3 Simulation d'un onduleur monophasé

La simulation d'un onduleur monophasé à partir d'une source photovoltaïque.



**Figure 5.10** : Schéma du montage (simulation d'un onduleur monophasé).

La simulation a été réalisée à partir des données suivantes :

La tension de la source :  $V = 100 \text{ V}$ ,

Les quatre diodes sont identiques tel que :

La résistance interne :  $R = 0,001 \Omega$ ,

$V_F = 0,8 \Omega$ ,

Les quatre IGBT sont identiques tel que :

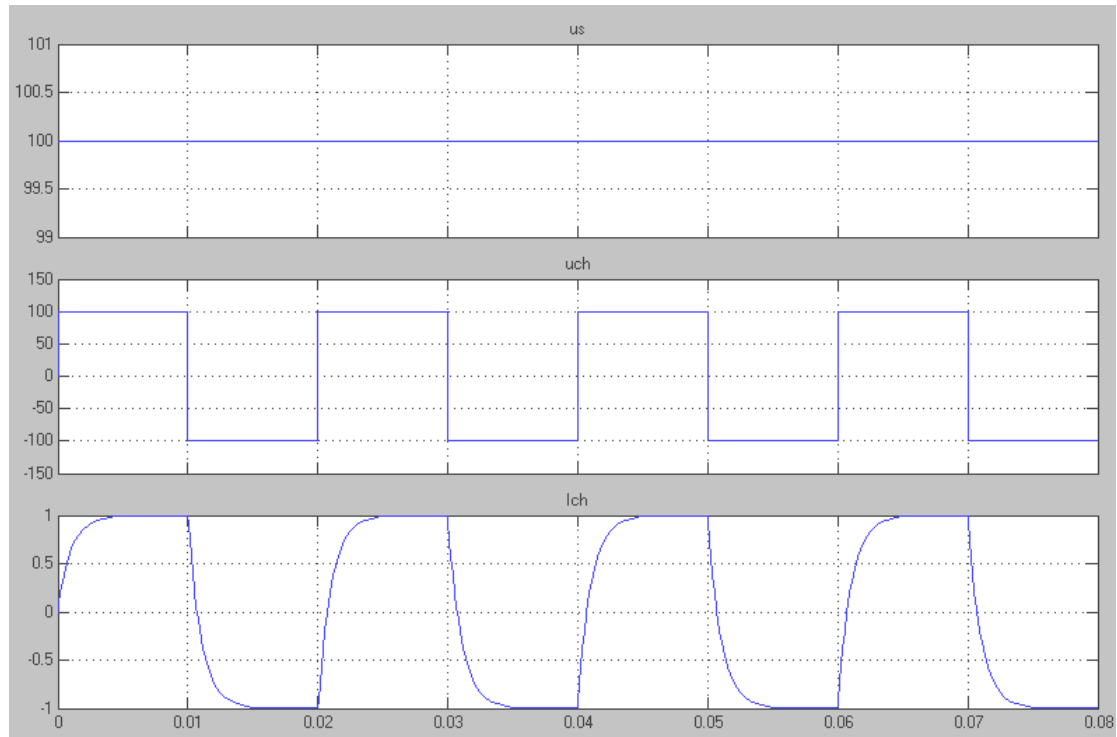
La résistance interne :  $R = 0,001 \Omega$ ,

La branche RL :

$R = 100 \Omega$ ,

$L = 0,1 \text{ H}$ .

Résultats de la simulation :



**Figure. 5. 11 :** Courbes obtenues par simulation (onduleur monophasé) montrant la variation de  $U_S$ ,  $U_{Ch}$  et  $I_{Ch}$  en fonction du temps.

### **5.11.5 Conclusions**

Les courbes sont obtenues à partir du logiciel Matlab.

#### **Conclusion 1**

Le logiciel Matlab a été conçu pour satisfaire les qualités suivantes :

- ✓ La simulation sans analyse préalable,
- ✓ La facilité d'utilisation.

Les applications présentées ont permis de valider notre model mathématique et montrer l'intérêt qu'il y avait de disposer d'un outil de CAO performant et souple appliqué à la modélisation du composant électronique et circuit électrique on appliquant les théories de graphes.

Cet outil permet de :

- ✓ Tester les idées du concepteur,
- ✓ Vérifier les séquences de fonctionnement des composants électroniques,
- ✓ Pré dimensionner les composants des futurs convertisseurs.

#### **Conclusion 2**

Nous avons présenté une méthode pour réduire les harmoniques des courants, les résultats obtenus lors des vérifications expérimentales par simulation concordes avec ceux de l'étude théorique et montrent l'efficacité de cette nouvelle technique.

## **Conclusions générales**

## **Conclusions générales**

Dans le cadre de l'utilisation des matériaux (monocristallins, polycristallins, amorphes) pour l'exploitation de l'énergie solaire à partir de l'effet photovoltaïque, on a présenté une contribution à l'amélioration des performances des composants électroniques utilisés dans la conversion d'énergie.

Cette contribution étant sous forme d'une simulation des différents composants électroniques et convertisseurs avec une attention particulière à l'onduleur à partir d'une source photovoltaïque à cause du rôle de ce dernier.

Enfin, on a confronté les résultats obtenus à partir de la simulation avec les approches théoriques récentes.

Ce qui nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ D'abord l'utilisation du logiciel Matlab a donné plusieurs satisfactions grâce à la facilité d'utilisation et la simulation sans analyse préalable,
- ✓ Ensuite, l'importance de disposer d'un outil CAO performant et souple appliqué à la modélisation du composant électronique et circuit électrique,
- ✓ Aussi cet outil a permis de :
  - Tester les idées,
  - Vérifier les séquences de fonctionnement des composants électroniques,
  - Redimensionner les composants des futurs convertisseurs.

Enfin, les courbes obtenues lors des vérifications expérimentales par simulation concordent avec celles de l'étude théorique.

Notre recherche s'est focalisée sur l'amélioration des performances des composants électroniques utilisés dans la conversion d'énergie à partir de simulation. A la fin de cette recherche, on peut affirmer que notre objectif est atteint.

Ce pendant les conclusions formulées permettent la suggestion de quelques pistes pour la poursuite de ce travail.

Les propositions suivantes sont avancées pour un éventuel travail futur :

- ✓ Possibilité de recherche dans l'axe de commande et automatisation des systèmes physiques et électroénergétiques,
- ✓ Possibilité de modélisation de machines électriques associées à des convertisseurs.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **A.Ch.Rufer.(1999)**, Développement, performances et perspectives des composants de l'électronique de puissance. Laboratoire d'électronique industrielle LEI.EPFL.CH 1015 Lausanne.  
[leiwww.epfl.ch](http://leiwww.epfl.ch)
  
- [2] **Alain Ricaud. (2009)**, L'électricité photovoltaïque. Cythelia Expertise et Conseil.  
[www.cythelia.fr](http://www.cythelia.fr)
  
- [3] **APIA. European Photovoltaic Industry Association.** L'électricité du soleil.  
[www.solarcentury.fr](http://www.solarcentury.fr)
  
- [4] **B. Flèche & D. Delagnes. (2007)**, Production d'énergie électrique : Energie solaire photovoltaïque.  
[www.iufmrese.cict.fr](http://www.iufmrese.cict.fr)
  
- [5] **Bendjelloule Zakaria. (2009)**, Contribution à la modélisation d'une cellule solaire. Thèse de Magister de l'université de Bechar.
  
- [6] **Benjamin Khong. (2007)**, Fiabilité prédictive de composants de puissance soumis à des tests de fatigue accélérée. Thèse de Doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse
  
- [7] **Besra. A & Yousfi. A (2009)**, Réalisation et caractérisation d'une cellule solaire au silicium monocristallin. Une communication par affiche, Conférence « JIPMA2009/MATERIAUX2009 », Gafsa. Tunis
  
- [8] **Bruno Fleche. (2007)**, Le solaire thermique : Approche générale.  
[www.iufmrese.cict.fr](http://www.iufmrese.cict.fr)
  
- [9] **C. El Manaa, F. Kouki, H. Bouchriha. (2009)**, Photogénération de charges dans les semi-conducteurs organiques Application à la conversion photovoltaïque. 2<sup>ème</sup> Journées Internationales de la Physique des Matériaux et Application, JIPMA 2009, CA 063, 111. Gafsa - Tunis.
  
- [10] **Chenoufi Hakim. (2005)**, Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion. Thèse de Magister de l'université de Batna.

- [11] **Christian Seassal. (2009)**, Structures photoniques pour l'amélioration du rendement des cellules solaires photovoltaïques. Agence national de la recherche, ANR, Séminaire solaire photovoltaïque et 19-20 Novembre, Paris.  
[www-anr-pv.cea.fr](http://www-anr-pv.cea.fr)
- [12] **Claude Chevassu.** Composants de l'électronique de puissance.  
[www.mach.elec.free.fr](http://www.mach.elec.free.fr)
- [13] **Cristian Muresan. (2005)**, Etude des transferts thermiques rayonnement spectral – conduction – convection naturelle dans des systèmes photovoltaïques hybrides en vue de leur intégration au bâti. Thèse de Doctorat de l'Ecole doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique – Lyon.
- [14] **Eléna Bedel-Pereira. (2007)**, Cours maison solaire 3.  
[www.mairiejc.alias.domicile.fr](http://www.mairiejc.alias.domicile.fr)
- [15] **EPIA(L'Association Européenne de l'Industrie Photovoltaïque)**, Energie photovoltaïque, l'électricité du soleil.  
[www.epia.org](http://www.epia.org)
- [16] **F. Giamarchi. (2008)**, Cellule Solaire : Modèle Spice. Départ :GE2I IUT de Nîmes.  
[www.geii.iut-nimes.fr](http://www.geii.iut-nimes.fr)
- [17] **Franck Barruel. (2009)**, Détection et localisation de défauts dans les systèmes photovoltaïques. Agence national de la recherche, ANR, Séminaire solaire photovoltaïque et 19-20 Novembre, Paris.  
[www-anr-pv.cea.fr](http://www-anr-pv.cea.fr)
- [18] **Frédéric Morancho. (2007)**, Projet « MOreGaN »Les composants de puissances du futur pour des systèmes économes en énergie.  
[www.colloque-stic.org](http://www.colloque-stic.org)
- [19] **I. Hadjoubab, A. Doghmanea, S. Bouhedjac, Z. Hadjoubab. (2009)**, Influence des méthodes d'élaboration du silicium amorphe sur ses propriétés acoustiques. 2<sup>ème</sup> Journées Internationales de la Physique des Matériaux et Application, JIPMA 2009, CA 071, 117. Gafsa - Tunis.
- [20] **J.L Sanchez, Frédéric Morancho, Patrick Austin, Marie Breil. (1999)**, Etat de l'art et évolution des dispositifs semi-conducteurs de puissance pour une meilleure gestion de l'énergie électrique.  
[www.grepes.be](http://www.grepes.be)

- [21] **John Kessler. (2008)**, Le photovoltaïque qu'est-ce que c'est ? Atelier débat du pôle génie civil ouest. Université de Nante.  
[www.pole-geniecivil-ouest.fr](http://www.pole-geniecivil-ouest.fr)
- [22] **Louis braille. (2009)**, Journée mondiale de la propriété intellectuelle bicentenaire.  
[www.wipo.int](http://www.wipo.int)
- [23] **Luc Lasne. (2003)**, Rappels de physique des semi-conducteurs.  
[www.creea.u-bordeaux1.fr](http://www.creea.u-bordeaux1.fr)
- [24] **Maouedj Rachid. (2005)**, Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydrolique sur les sites de Tlemcen et de Bouzereah. Thèse de Magister de l'université de Abou Beker Belkaid - Tlemcen.
- [25] **Mohamed Djarallah. (2008)**, Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique. Thèse de Doctorat de l'Université de Batna.
- [26] **Mohamed Lakhdar Louazene. (2008)**, Etude technico – économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla. Thèse de Magister de l'université de Al-hadj Lakhdar - Batna.
- [27] **O. Benzaoui & C. Azizi. (2009)**, Optimisation des performances statiques I - V du MOSFET GaAs. 2<sup>ème</sup> Journées Internationales de la Physique des Matériaux et Application, JIPMA 2009, CA 054, 103. Gafsa - Tunis.
- [28] **Peter Y. Yu & Manuel Cardona. (2010)**, Fundamentals of Semiconductors, Physics and Materials Properties. Forth Edition, Springer Heidelberg Dordrecht London New York.86
- [29] **Philippe Malbranche. (2004)**, L'énergie solaire : un important potentiel à concrétiser. CEA centre de Cadarache CLEFS CEA - N°49 - PRINTEMPS 2004. Direction de la recherche technologique CEA centre de Cadarache-Genec.  
[www.cea.fr](http://www.cea.fr)
- [30] **Pierre Perichon. (2009)**, Optimisation des flux électriques dans un bâtiment photovoltaïque. Agence national de la recherche, ANR, Séminaire solaire photovoltaïque et 19-20 Novembre, Paris.  
[www-anr-pv.cea.fr](http://www-anr-pv.cea.fr)

- [31] **Pierre Vernier. (2006)**, Photovoltaïque (EFFET).  
[www.coba-energies-renouvelables.com](http://www.coba-energies-renouvelables.com)
- [32] **Robert Perret.** Interrupteurs électroniques de puissance. Avant-propos, 16, 19.  
[www.numilog.net](http://www.numilog.net)
- [33] **Sébastien Quoizola. (2003)**, Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas cout. Thèse de Doctorat de l'Ecole doctorale : Electronique, Electrotechnique et Automatisation – Lyon.
- [34] **Tadger Sidi – Ahmed. (2009)**, Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque. Thèse de Magister de l'Université de M'hamed Bougara – Boumerdes.
- [35] **Yousfi. A,** Semi-conducteur intrinsèque. Recherche en électronique appliqué.  
Université Badji Mokhtar. Annaba
- [36] **Yousfi. A, A. Besra, H. Benzamamouche, B. Yacine.(2009)**, Computer aided analysis of the thyristor feeder for the ion treatment process. 3<sup>rd</sup> International Conference on Electrical Engineering Design and Technologies ICEEDT'09. Sousse, Tunisia. [Journal.esrgroups.org/jes/iceedt](http://Journal.esrgroups.org/jes/iceedt)
- [37] **Yousfi. A. Benzamamouche. H. Besra. A. Benlalli. Y. Gasmi. A. (2009)**, Réparation du potentiel sur la revêtement semi-conducteur des enroulement des alternateurs à haute tension. 7<sup>ème</sup> Conférence Nationale sur la haute tension CNTH'09. L'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés. Sidi Bel Abbés
- [38] **Yves Jautard & Thierry Boudol. (2000)**, L'électricité photovoltaïque.  
[www.batirbio.org](http://www.batirbio.org)