

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie  
**Filière :** Electromécanique  
**Parcours :** Master  
**Spécialité :** Maintenance Industrielle

**Thème**

**Contribution à l'étude du comportement des  
plaques  
déformées dans les panneaux photovoltaïques**

Préparé par :

- BENDAOUD Adbelrahmane

- IHDDADEN Adel Amine

Soutenu publiquement le : 19 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

M <sup>r</sup> ABED Belkacem	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M <sup>r</sup> . MOULGADA Abedlmadjid	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examinateur
M <sup>r</sup> . ZAGANE Mohamed El Salah	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examinateur
M <sup>me</sup> BENARBIA Djamila	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrante

Année universitaire : 2022 - 2023

## REMERCIEMENT

---

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH qui nous a donné la capacité et le courage d'achever ce travail, et qui nous a aidés à surmonter toutes les difficultés et les épreuves que nous ayons pu rencontrer au cours de ce travail.

Nos respectueux remerciements s'adressent :

**A D. BENARBIA**, notre encadrant qui, en dépit de ses nombreuses occupations, a bien voulu nous encadrer et diriger notre travail, qui nous a fait profiter de son expérience et qui maintes fois a été à notre disposition, pour ses hautes qualités humaines, nous lui sommes très reconnaissants et qu'il veuille bien trouver ici, l'assurance de notre profondes gratitude et estime.

Nous remercions infiniment aussi les membres de jury

A l'ensemble des enseignants et des responsables de notre université.

Nous ne pouvons mentionner tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail que ceux qui m'ont aidé d'un simple encouragement à un appui continu trouvent ici l'expression de ma reconnaissance très sincère.

Nos remerciements ne pourraient être clos si nous oublions toutes nos familles pour nous avoir soutenues

**Merci**

## Dédicace

---

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes très chers **parents** et **A.H**, qui ont toujours été là pour moi,*

*« Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni  
santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle  
de labeur et de persévérance.*

*Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».*

*À mes sœurs pour leur encouragement.*

*Enfin*

*À tous (es) qui ont contribué de près ou de loin à ma réussite*

## 1. Résumé

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une contribution à l'auscultation de la discontinuité générée suite à la propagation des fissures d'origine mécanique dans les couches de contact de la plaque solaire, en estimant les valeurs caractéristiques de la ténacité des matériaux en question.

Le principe de cette investigation est fondé sur le développement analytique des formules empiriques permettant à déterminer les valeurs des facteurs d'intensité de contraintes en faisant appel à la relation entre les fonctions de complaisance et les conditions géométriques.

Cette analyse s'est basée principalement sur les critères de mécanique de la rupture en calculant les valeurs des facteurs d'intensité de contraintes à l'aide de l'approche analytique basée sur les fonctions poids pour évaluer les coefficients géométriques correspondants. Le calcul mathématique s'effectue à l'aide de Maple, pour l'étude paramétrique.

Les résultats de calcul analytique effectué mathématiquement sur Maple sont validés et comparés, avec ceux obtenus de la simulation numérique du modèle étudié à l'aide du code de calcul Abaqus, en utilisant la méthode des éléments finis.

## 2. Mots clés

Plaque photovoltaïque, Propagation des fissures, facteur d'intensité de contraintes, couche de contact.

## 1. Abstract

The present work is part of a contribution to the auscultation of the discontinuity generated following the propagation of cracks of mechanical origin in the contact layers of the solar plate, in estimating the characteristic values of the toughness of the materials in question.

The principle of this investigation is based on the analytical development of empirical formulas making it possible to determine the values of the stress intensity factors by recalling the relationship between the convenience functions and the geometric conditions.

This analysis was based mainly on fracture mechanics criteria by calculating the values of stress intensity factors using the analytical approach based on weight functions to evaluate the corresponding geometric coefficients. The mathematical calculation is carried out using Maple, for the parametric study.

The results of the analytical calculation carried out mathematically on Maple are validated and compared with those obtained from the numerical simulation of the model studied using the Abaqus computer code, using the finite element method.

## 2. Keywords

Photovoltaic plate, crack propagation, stress intensity factor, contact layer.

### 1. الملخص

يعتمد مبدأ هذا البحث على التطوير التحليلي للصيغ التجريبية التي تجعل من الممكن تحديد قيم عوامل شدة الإجهاد من خلال استدعاء العلاقة بين وظائف الراحة والظروف الهندسية. اعتمد هذا التحليل بشكل أساسي على معايير ميكانيكا الكسر من خلال حساب قيم عوامل شدة الإجهاد باستخدام النهج التحليلي القائم على وظائف الوزن لتقييم المعاملات الهندسية المقابلة. تم إجراء الحساب الرياضي باستخدام Maple ، للدراسة البارامترية. تم التحقق من صحة نتائج الحساب التحليلي الذي تم إجراؤه رياضياً على Maple ومقارنتها مع تلك التي تم الحصول عليها من المحاكاة العددية للنموذج المدروس باستخدام كود الكمبيوتر Abaqus ، باستخدام طريقة العناصر المحدودة.

### 2. الكلمات المفتاح

الصفحة الكهروضوئية ، انتشار الشقوق ، عامل شدة الإجهاد ، طبقة التلامس.

# TABLE DES MATIERES

---

Résumé.....	iv
Abstract.....	v
المخلص.....	vi
Table des matières.....	vii
Liste des tableaux .....	x
Liste des figures.....	xi
Liste des notations et abréviations.....	xiii
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES PANNEAUX SOLAIRES .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2 L'ENERGIE SOLAIRE.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.1 Rayonnement solaire .....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.2 Energie solaire photovoltaïque .....</b>	<b>7</b>
<b>I.3 LES PANNEAUX SOLAIRES.....</b>	<b>10</b>
<b>I.3.1 Types de panneaux solaires .....</b>	<b>10</b>
<b>I.4 LES CELLULES SOLAIRES.....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.1 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.2 Composition d'une cellule solaire.....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.3 Les Différents types de cellules photovoltaïques.....</b>	<b>19</b>
<b>I.4.4 Avantages et inconvénients de Systèmes photovoltaïques.....</b>	<b>23</b>
<b>I.5 CONCLUSION.....</b>	<b>23</b>
<b>CHAPITRE II : DEFORMATION DES PLAQUES PHOTOVOLTAÏQUES.....</b>	<b>24</b>
<b>II.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>25</b>

<b>II.2</b>	<b>DEFAUTS DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUES.....</b>	<b>25</b>
II.2.1	Décoloration.....	25
II.2.2	Délaminage.....	26
II.2.3	Les points chauds ou Hot-spots.....	28
II.2.4	Présence des fissures dans les cellules.....	29
II.2.5	Module arraché au cassé.....	29
II.2.6	Défaut de revêtement anti -reflet (ARC).....	30
II.2.7	Corrosion et oxydation.....	31
II.2.8	Traces escargot ‘Snail tracks’.....	32
II.2.9	Présence de bulles d’air.....	32
II.2.10	Défauts de la diode de by-pass et diode anti-retour.....	33
II.2.11	L’augmentation de la résistance série $R_s$ .....	33
II.2.12	Diminution de la résistance parallèle $R_p$ .....	34
II.2.13	Défaut de Mismatch et l’effet d’ombrage.....	34
II.2.14	Autres Défauts.....	35
<b>II.3</b>	<b>CLASSIFICATION DES DEFAUTS.....</b>	<b>36</b>
<b>II.4</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>37</b>
<b>CHAPTRE III : APPROCHES MECANIQUES APPLIQUEE.....</b>		<b>38</b>
<b>III.1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>39</b>
<b>III.2</b>	<b>MECANIQUE DE LA RUPTURE APPLIQUEE.....</b>	<b>39</b>
III.2.1	MODES ELEMENTAIRES DE FISSURATION.....	40
III.2.2	CRITERES DE RUPTURE.....	43
III.2.3.1	CRITERE DU FACTEUR D’INTENSITE DE CONTRAINTES.....	43
III.2.3.2	CRITERE DU TAUX DE RESTITUTION D’ENERGIE $G$ OU DE	45



<b>L'INTEGRALE J.....</b>	
<b>III.3 CONCLUSION.....</b>	<b>48</b>
<b>CHAPTRE IV : RESULTATS DE CALCUL ET DISCUSSION.....</b>	<b>49</b>
<b>IV.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>50</b>
<b>IV.2 PRESENTATION DE L'APPROCHE ANALYTIQUE.....</b>	<b>50</b>
<b>IV.3 PROPAGATION DES FISSURES DANS LES PLAQUES SOLAIRES         (REULTATS ET DISCUSSION).....</b>	<b>54</b>
<b>A. EVALUATION DES CONTRAINTES MAXIMALES .....</b>	<b>55</b>
<b>B. ANALYSE DE LA PROPAGATION DES FISSURES DANS LES PLAQUES             SOLAIRES.....</b>	<b>56</b>
<b>B.1 ETUDE PARAMETRIQUE.....</b>	<b>56</b>
<b>B.2 ETUDE COMPARATIVE.....</b>	<b>63</b>
<b>B.3 ANALYSE NUMERIQUE ET VALIDATION.....</b>	<b>65</b>
<b>IV.4 CONCLUSION.....</b>	<b>66</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>67</b>
<b>1. Conclusion.....</b>	<b>68</b>
<b>2. Perspectives de la recherche.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERENCES BIBLIGRAPHIQUES.....</b>	<b>70</b>

# LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau II. 1</b> : Classification de défauts .....	<b>37</b>
<b>Tableau II. 2</b> : impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule.....	<b>37</b>
<b>Tableau IV.1</b> : Fonction géométrique $F_t.(1-a/w)^{3/2}$ .....	<b>53</b>
<b>Tableau IV.2</b> : Fonction géométrique $F_b.(1-a/w)^{3/2}$ .....	<b>54</b>

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure I.1:</b> Le rayonnement solaire .....	7
<b>Figure I.2 :</b> Système solaire photovoltaïque .....	8
<b>Figure I.3:</b> Schéma de l'effet photovoltaïque .....	9
<b>Figure I. 4 :</b> Panneau solaire thermique .....	11
<b>Figure I. 5 :</b> Principe de fonctionnement d'un panneau solaire thermique.....	12
<b>Figure I. 6 :</b> Panneau solaire hybride.....	13
<b>Figure I. 7 :</b> Panneau solaire hybride à air .....	14
<b>Figure I. 8 :</b> Panneau solaire hybride à eau.....	14
<b>Figure I. 9 :</b> Panneau solaire photovoltaïque .....	16
<b>Figure I. 10 :</b> Schéma de panneau solaire photovoltaïque.....	16
<b>Figure I. 11 :</b> Cellule photovoltaïque.....	17
<b>Figure I. 12 :</b> Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	18
<b>Figure I.13:</b> Structure générale d'une cellule photovoltaïque .....	18
<b>Figure I.14:</b> Monocristallin .....	19
<b>Figure I.15:</b> Polycristallin.....	20
<b>Figure I. 16 :</b> amorphe.....	20
<b>Figure I.18:</b> Cellule photovoltaïque au CIGS.....	21
<b>Figure I.19:</b> Les couches d'une cellule CdTe/CdS.....	22
<b>Figure I.20:</b> Cellule multijonction.....	22
<b>Figure II.1 :</b> Décoloration sur la surface de la cellule.....	26
<b>Figure II.2 :</b> défaut de délaminage .....	27
<b>Figure II. 3 :</b> défaut de délaminage 2.....	27
<b>Figure II. 4 :</b> Défaut de point chaud .....	28
<b>Figure II. 5:</b> fissures dans les cellules PV .....	29
<b>Figure II. 6:</b> Module cassé .....	30
<b>Figure II. 7:</b> défaut de revêtement anti –reflet.....	31
<b>Figure II. 8:</b> Corrosion dans les interconnexions de cellules de jeu de barre.....	31
<b>Figure II.9:</b> Traces d'escargot 'Snail tracks'.....	32
<b>Figure II.10:</b> Défaut de bulles d'air .....	32
<b>Figure II.11:</b> Défaut de la diode de by-pass .....	33
<b>Figure II.12:</b> Défaut d'augmentation de la résistance $R_s$ .....	34
<b>Figure II.13:</b> Défaut d'ombrage.....	35

<b>Figure III.1</b> : Propagation d'une fissure.....	<b>40</b>
<b>Figure III.2</b> : Modes de fissuration.....	<b>41</b>
<b>Figure III.3</b> : Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure.....	<b>41</b>
<b>Figure III.4</b> : Contour d'intégration.....	<b>47</b>
<b>Figure IV.1</b> Fissure superficielle dans une plaque rectangulaire chargée en traction pure....	<b>52</b>
<b>Figure IV.2</b> : Fissure superficielle dans une plaque rectangulaire chargée en flexion pure ....	<b>53</b>
<b>Figure IV.3</b> : Les contraintes maximales en couche de verre.....	<b>55</b>
<b>Figure IV.4</b> : Les contraintes maximales en couche d'Aluminium.....	<b>55</b>
<b>Figure IV.4</b> : Les contraintes maximales en couche d'Aluminium.....	<b>57</b>
<b>Figure IV.6</b> : Variation du FIC en fonction du rapport $a/w$ en mode II « Cisaillement ».....	<b>58</b>
<b>Figure IV.7</b> : Variation du FIC en fonction du rapport $a/w$ en mode I « Voilement».....	<b>58</b>
<b>Figure IV.8</b> : Variation du FIC en fonction du rapport $a/w$ en mode I « Traction pure ».....	<b>59</b>
<b>Figure IV.9</b> : Variation du FIC en fonction du rapport $a/w$ en mode II « Cisaillement ».....	<b>59</b>
<b>Figure IV.10</b> : Variation du FIC en fonction du rapport $a/w$ en mode I « Voilement».....	<b>60</b>
<b>Figure IV.11</b> : Variation du FIC en fonction du rapport $a/w$ en mode I « Traction pure »...	<b>61</b>
<b>Figure IV.12</b> : Variation du FIC en fonction du rapport $a/w$ en mode II « Cisaillement ».....	<b>61</b>
<b>Figure IV.13</b> : Variation du FIC en fonction du rapport $a/w$ en mode I « Voilement».....	<b>62</b>
<b>Figure IV.14</b> : Comparaison des FIC en mode I « Traction pure».....	<b>63</b>
<b>Figure IV.15</b> : Comparaison des FIC en mode I « Voilement».....	<b>63</b>
<b>Figure IV.16</b> : Comparaison des FIC en mode II « Cisaillement».....	<b>64</b>
<b>Figure IV.17</b> : Présentation du modèle numérique.....	<b>65</b>
<b>Figure IV.18</b> : Comparaison et validation des résultats.....	<b>65</b>

## LISTE DES NOTATIONS & ABBREVIATIONS

---

a	Longueur de la fissure (mm)
b	Hauteur de la plaque (mm)
w	Largeur de la plaque (mm)
L	Longueur de la plaque (mm)
E	Module d'élasticité longitudinale (module de Young) (MPa)
G, G <sub>C</sub>	Taux de restitution de l'énergie, Taux de restitution de l'énergie critique. (J)
J	Intégrale de contour.
K <sub>I</sub>	Facteur d'intensité de contraintes en mode I (Pa.mm <sup>1/2</sup> )
K <sub>II</sub>	Facteur d'intensité de contraintes en mode II (Pa.mm <sup>1/2</sup> )
K <sub>III</sub>	Facteur d'intensité de contraintes en mode III (Pa.mm <sup>1/2</sup> )
K <sub>C</sub>	Facteur d'intensité de contraintes critique (Pa.mm <sup>1/2</sup> )
U <sub>s</sub>	Energie interne de déformation (J).
U <sub>s</sub> <sup>e</sup>	Energie interne de déformation élastique (J).
U <sub>s</sub> <sup>p</sup>	Energie interne de déformation plastique (J).
W <sub>ext</sub>	Energie potentielle des forces extérieures (J)
W <sub>e</sub>	Energie de déformation élastique (J)
r, θ :	Le rayon et l'angle en coordonnées polaires.
α(a)	coefficient de correction géométrique
γ <sub>s</sub>	énergie superficielle caractéristique du matériau (J)
ω <sub>C</sub>	la séparation critique de fissure cohésive
ν	Coefficient de poisson.
μ :	Module de cisaillement.

- $\sigma$  composantes normale du tenseur de contraintes (Pa)
- $\tau$  composantes tangentielle du tenseur de contraintes (Pa)



**INTRODUCTION  
GENERALE**

L'énergie solaire photovoltaïque fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années. Elle est basée sur l'effet photoélectrique permettant de créer le courant électrique continu à partir des rayonnements électromagnétiques.

Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

Comme toutes les installations industrielles existantes, la station solaire photovoltaïque pourra comporter plusieurs défauts et anomalies affectant négativement sa rentabilité et pouvant causer le dysfonctionnement total de la station.

Dans le cas général, l'amorçage de toute défaillance dans une structure mécanique soumise à des sollicitations diverses, est provoqué essentiellement par la naissance des fissures et l'apparition de déformations permanentes, ce qui constitue l'un des facteurs majeurs et les plus importants de la dégradation des modules PV.

Afin de pallier à ce problème sérieux auquel font face les différents mécanismes, particulièrement ceux liés au phénomène de rupture, des études de prédictions et des investigations liées à la maintenance industrielle préventive qui se poursuivent par maints chercheurs ont été abordées.

Le présent manuscrit exprime un travail de recherche qui s'inscrit dans le cadre d'une contribution à la maintenance préventive à travers une auscultation de la discontinuité générée suite à la propagation des fissures d'origine mécanique dans les couches de contact de la plaque solaire.

La recherche s'appuie principalement sur le développement du calcul analytique des formules empiriques permettant de déterminer les valeurs des facteurs d'intensité de contraintes en faisant appel à la relation entre les fonctions de complaisance et les propriétés géométriques.



L'objet principal de cette étude est de développer une recherche analytique afin d'établir une solution crédible qui conduit à prédire la nocivité de la discontinuité engendrée suite au phénomène de la propagation des fissures au niveau des milieux constituant les couches de contact de la plaque solaire.

Le travail entrepris se divise en quatre chapitres :

Dans les trois premiers chapitres, une synthèse bibliographique, a été faite dont le but est d'enrichir les connaissances sur la nature et le comportement des matériaux en question, développée et dirigée à la fin vers une description du cas proposé à l'étude.

Au début, et en premier chapitre, on présentera un aperçu sur les concepts généraux de l'énergie solaire ainsi de notions principales sur l'utilisation des systèmes solaires en se basant sur les différents types de panneaux et leur principe de fonctionnement. En deuxième chapitre une synthèse sur les défauts rencontrés dans les panneaux photovoltaïques et leur classification selon leur impact sur les paramètres de panneau PV.

Ensuite, un rappel théorique, décrit les principales approches mécaniques et critères de ruptures adoptés pour le modèle étudié, est abordé dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre sera axé sur l'étude du phénomène de la propagation des fissures dans les couches de la structure de la liaison d'appuis, en présentant les résultats de calcul analytique élaboré sur Maple suivie d'une validation et comparaison avec ceux obtenus numériquement en utilisant la méthode des éléments finis.

A la fin, une conclusion générale, a résumé l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail, en mettant en exergue les points les plus essentiels de cette recherche afin d'aboutir à quelques perspectives d'études dans l'avenir.

# **CHAPITRE I**

---



## **GENERALITES SUR LES PANNEAUX SOLAIRES**

## I.1 INTRODUCTION

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre.

Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés. La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre, de la biomasse humide ou sèche à une échelle de temps compatible avec l'histoire de l'humanité.

Nombreux concepts relatifs aux énergies renouvelables sont trouvés dans de différentes sources. L'énergie renouvelable peut être définie comme une énergie produite à partir de sources naturelles renouvelables est toujours disponible c'est-à-dire sont des sources qui se renouvellent assez rapidement de telle sorte que l'utilisation actuelle n'ait pas d'impact sur la disponibilité future, dans ce sens on appelle les énergies renouvelables ou énergies vertes toutes énergies qui ne nuit pas à l'environnement.

Parmi les énergies renouvelables, on trouve :

- L'énergie solaire ;
- L'énergie éolienne ;
- La biomasse ;
- L'énergie hydraulique ;
- L'énergie géothermique.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à présenter une synthèse bibliographique à propos des concepts généraux de l'énergie solaire ainsi de notions principales sur l'utilisation des systèmes solaires en se basant sur les différents types de panneaux et leur principe de fonctionnement.

## I.2 L'ENERGIE SOLAIRE

Le soleil est une étoile, située à environ 150 millions Km de la terre. Le soleil a un diamètre de 1 39 000 Km, soit plus de 100 fois notre planète. Il est composé d'hydrogène et d'hélium. La terre décrit autour du soleil dans un plan dit "plan de l'écliptique", la terre tourne sur elle-même, selon un axe incliné de 23 270 sur le plan de l'écliptique. [1]

### I.2.1 Rayonnement solaire

Le soleil tire son énergie de réactions thermonucléaires se produisant dans son noyau.

L'énergie émise par le soleil est sous forme d'ondes électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement va subir des transformations par absorption et par diffusion, on distingue pour cela. [2]

➤ **Le rayonnement direct :**

Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère). Les rayons restent parallèles entre eux. [2]

➤ **Le rayonnement diffus :**

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de répartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions. [2]

### ➤ Le rayonnement réfléchi

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple : la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée.

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure suivante :

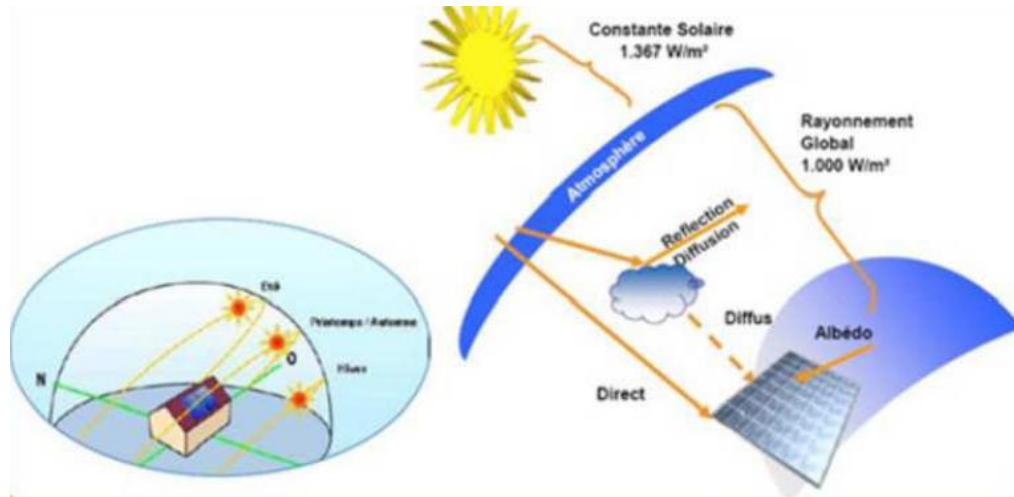


Figure I.1: Le rayonnement solaire

## I.2.2 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années. Elle est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire.

Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

Dans un isolant électrique : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.

Dans un conducteur électrique (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.

Dans un semi-conducteur : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes.

Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il y a donc courant électrique sous l'exposition à la lumière. [3]

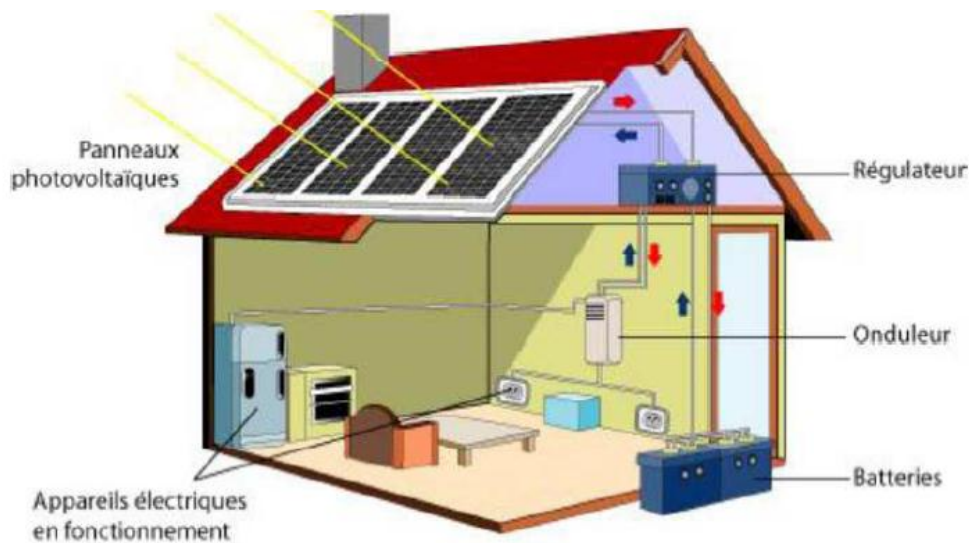


Figure I.2: Système solaire photovoltaïque

### I.2.2.1 L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage [4], un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand

un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse.

Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure. [5]

La puissance du champ photovoltaïque est directement proportionnelle aux nombres de cellules employées dans une installation. Seulement, une exposition au rayonnement homogène de l'ensemble de la surface est exigée pour une meilleure rentabilité. Pailleurs, l'obtention de puissance maximale peut être assurée par observation des trois critères : l'orientation, l'inclinaison et la température. Cette dernière doit être maintenue à un niveau minimal au sein du dispositif par une ventilation importante [6].

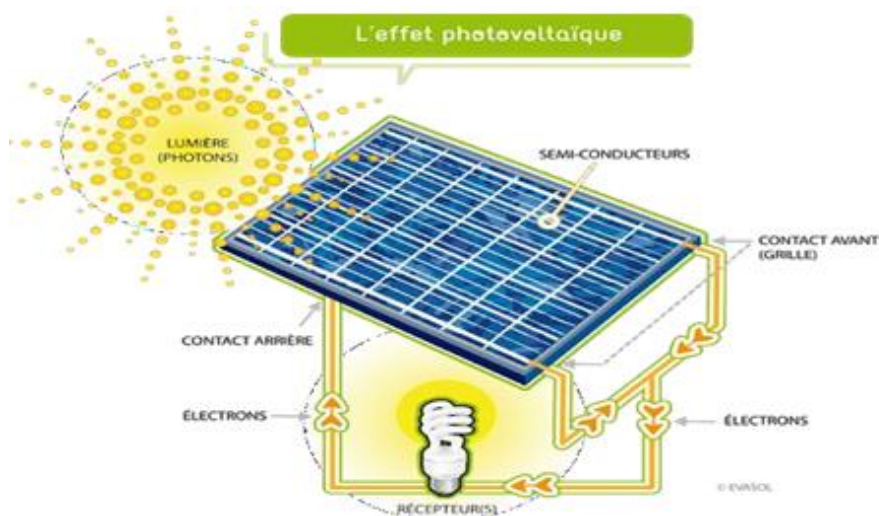


Figure I.3: Schéma de l'effet photovoltaïque

### I.2.2.2 Eléments d'un système photovoltaïque

Afin de bien comprendre le fonctionnement d'un système photovoltaïque, il est utile d'analyser les principaux composants. Les éléments d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée.

Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque :

- Modules.
- Batteries.
- Régulateurs de charge.
- Convertisseurs.
- Générateurs.
- Stockage

### **I.3 LES PANNEAUX SOLAIRES**

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série ou en parallèle afin d'obtenir une tension souhaitée [7].

#### **I.3.1 Types de panneaux solaires**

Un panneau solaire est destiné à récupérer une partie du rayonnement solaire pour le convertir en énergie. Ces panneaux solaires peuvent être classés sous deux catégories distinctes : les panneaux photovoltaïques et les panneaux thermiques. La différence est fondamentale, alors que les premiers transforment le rayonnement solaire en chaleur, les seconds la convertissent en électricité. Chaque modèle a des caractéristiques spécifiques et un impact qui diffère. Lorsque l'on s'intéresse à leur rendement, on peut constater l'existence de fortes disparités selon les technologies utilisées [7].

##### **a) Le panneau solaire thermique**

Le panneau solaire thermique est un dispositif qui transforme l'énergie solaire en énergie calorifique. Il est utilisé pour avoir de l'eau chaude sanitaire, mais aussi pour alimenter le système de chauffage.

Sachez que contrairement au panneau photovoltaïque, il ne permet pas d'obtenir de l'électricité.



Dans un premier temps, le panneau va capter et absorber le rayonnement solaire et la chaleur pour réchauffer un fluide caloporteur.

Ensuite, ce liquide, de l'eau glycolée la plupart du temps, va circuler et réchauffer l'eau dans un ballon de stockage qui est généralement équipé d'un appoint. En ce qui concerne son installation, le panneau solaire thermique doit être orienté Sud et présenter une inclinaison de 45° [7].



Figure I.4: Panneau solaire thermique

## Principe de fonctionnement d'un panneau solaire thermique

Des capteurs de rayons solaires composent le panneau solaire thermique. Les plaques sur lesquelles elles sont disposées sont fixées sur les toits. Un échangeur thermique se charge de transmettre la chaleur captée au sein d'un réseau d'eau sanitaire ou de chauffage. Ce principe est le même pour tout panneau solaire thermique. Cependant, selon le type de capteur utilisé, le fonctionnement peut varier. À ce titre, on distingue plusieurs sortes de capteurs.

Les capteurs plans vitrés Une plaque en métal noir qui absorbe les rayons solaires compose ces capteurs. Elle est en contact avec un des tubes qui renferment le fluide caloporteur. Un isolant se charge de garder la chaleur dans les tubes, tandis que du verre en

acier trempé veille à la protection de l'installation. De plus, ce vitrage assure l'effet de serre nécessaire pour produire encore plus de chaleur.

Les capteurs plans non vitrés Leur mode de fonctionnement est similaire à celui des modèles suscités. Néanmoins, ils n'ont pas une grande résistance à cause de l'absence de protection par une vitre. Ces capteurs sont sollicités surtout pour le chauffage d'une piscine.

Les capteurs tubaires sous vide Ils sont constitués de tubes en verre disposés côte à côte. L'absorption de la chaleur est effectuée via une plaque en métal noir. Ces capteurs sont conçus sous vide afin de minimiser la déperdition de chaleur. Ils sont largement plébiscités dans les régions aux conditions climatiques extrêmes. Pour éviter le gel du fluide caloporteur ou sa surchauffe, il est nécessaire d'investir dans des fluides antigel ou dans un système auto-vidangeable.

Les capteurs monobloc Ces modèles sont dotés d'un ballon de stockage qui est fixé également sur le toit. Le seul désavantage de ce capteur réside dans le fait que le ballon est en contact direct avec l'air extérieur. Cela entraîne plus facilement une perte de chaleur [7].

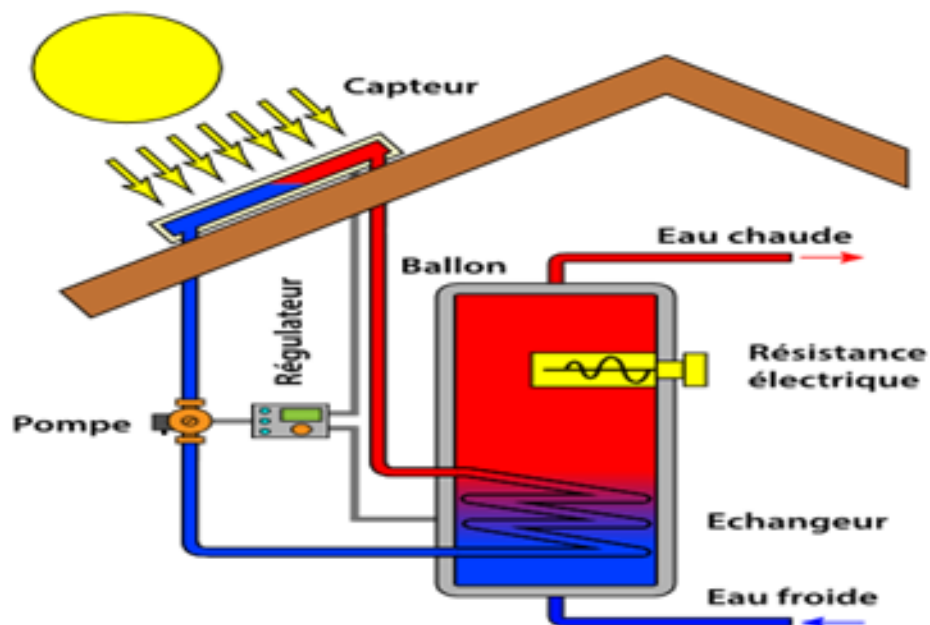


Figure I.5: Principe de fonctionnement d'un panneau solaire thermique

## b) Le panneau photovoltaïque hybride

Sont des dispositifs qui combinent l'énergie solaire photovoltaïque et thermique. Il est possible d'obtenir de l'électricité et de la production de chaleur en même temps. Autrement dit, un panneau PVT est capable de produire de l'électricité et de l'eau chaude.



Figure I.6: Panneau solaire hybride

### ➤ Les différents types

On distingue deux types de systèmes : les panneaux hybrides à air, également appelés panneaux aérovoltaiques, et les panneaux solaires hybrides à eau [8].

#### - Les panneaux solaires hybrides à air

Avec cette technologie, un dispositif de ventilation est installé à l'arrière de vos panneaux photovoltaïques. Il permet de récupérer l'air chaud, puis de le diffuser à l'intérieur de votre habitation ou d'un ballon thermodynamique.

La chaleur produite naturellement sous vos panneaux est donc utilisée pour chauffer votre logement. Elle a également une autre fonction : celle d'aérer vos panneaux

photovoltaïques et donc de faire baisser leur température. En effet, ceux-ci sont moins efficaces lorsqu'ils sont soumis à une chaleur trop importante [8].

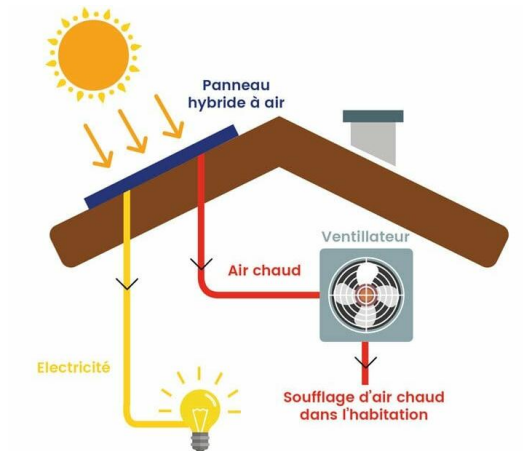


Figure I.7: Panneau solaire hybride à air

### - Les panneaux solaires hybrides à eau

Avec un fonctionnement similaire, certains panneaux mixtes utilisent l'eau à la place de l'air pour produire de la chaleur. Cela crée donc de l'eau chaude sanitaire, que vous pouvez utiliser dans votre logement. Si vous êtes équipés de radiateurs à eau, vous pouvez également vous chauffer de cette façon.

Un tel système permet également de refroidir efficacement les panneaux photovoltaïques, ce qui augmente leur rendement [8].

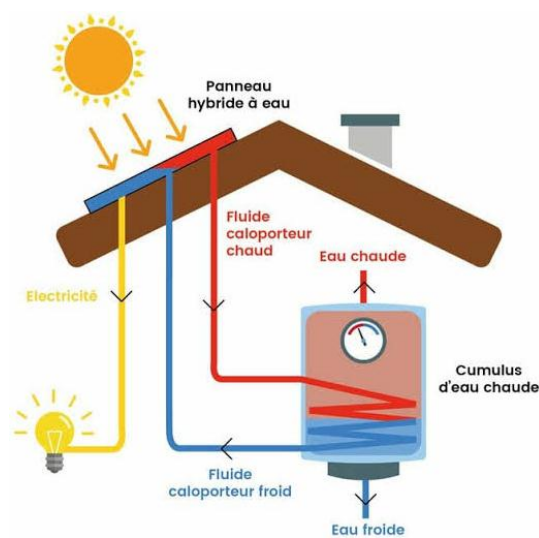


Figure I.8: Panneau solaire hybride à eau

## Principe de fonctionnement de panneaux solaires hybrides

Le panneau solaire hybride, aussi appelé mixte, est un système qui fonctionne à la fois avec des capteurs photovoltaïques (pour produire de l'électricité) et avec des capteurs thermiques (pour produire de la chaleur).

Sur la face supérieure des panneaux, côté soleil, des cellules photovoltaïques produisent de l'électricité à partir des rayons solaires. Sur la face inférieure, des capteurs solaires thermiques captent la chaleur émise par le soleil. Grâce à un fluide caloporteur, ils la transportent jusqu'à un ballon de stockage.

Un panneau solaire hybride permet donc de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur [8].

### c) Panneaux solaires photovoltaïques

Le panneau solaire photovoltaïque est le capteur solaire qui convertit les rayons solaires en électricité.

Grâce aux technologies de ses cellules, le panneau PV capte les photons contenus dans le rayonnement solaire pour produire du courant.

Il est formé par un matériau semi-conducteur avec des cellules photovoltaïques en jonction PN : une couche positive et une autre négative.

C'est ce courant continu qui sera transformé en courant alternatif par l'onduleur qui fait, bien entendu, partie de l'installation.

Ce courant alternatif sera par la suite utilisé par votre installation domestique.

Le panneau photovoltaïque est le type de panneau le plus utilisé actuellement grâce à son efficacité et à son prix largement plus accessible que celui du panneau hybride. Il est également très facile à installer [9].

Pour avoir une efficacité optimale, il faut observer une pente comprise entre 30 et 35°, idéalement sur un toit orienté Sud.



Figure I.9: Panneau solaire photovoltaïque

### Principe de fonctionnement de panneaux solaires photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques capables de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, et ceci grâce à l'effet photovoltaïque. Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, ce phénomène est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils reçoivent un rayonnement solaire. En effet, lorsque les photons de la lumière du soleil rentrent en contact avec ces matériaux particuliers, ils transmettent leur énergie aux électrons des semi-conducteurs qui génèrent alors une tension électrique. Le matériau semi-conducteur le plus massivement employé à l'heure actuelle par les fabricants de modules photovoltaïques demeure le silicium [9].

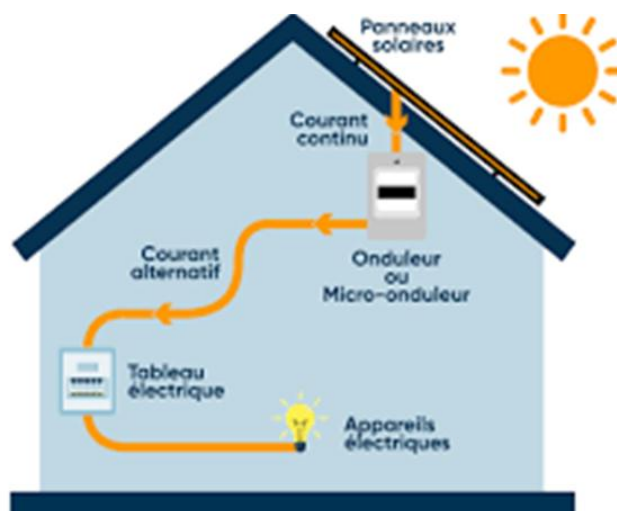


Figure I.10: Schéma de panneau solaire photovoltaïque

## I.4 LES CELLULES SOLAIRES

La cellule photovoltaïque est un dispositif électronique destiné à transformer la lumière en électricité, sa structure est une jonction PN c'est-à-dire composée de deux couches : une couche P et une couche N [10].

La cellule solaire est basée d'un semi-conducteur qui est en général le silicium, c'est un investisseur instantané fournissant de l'énergie électrique s'il reçoit une énergie solaire sous forme de rayonnement. Il se comporte alors comme en génération de courant continue.

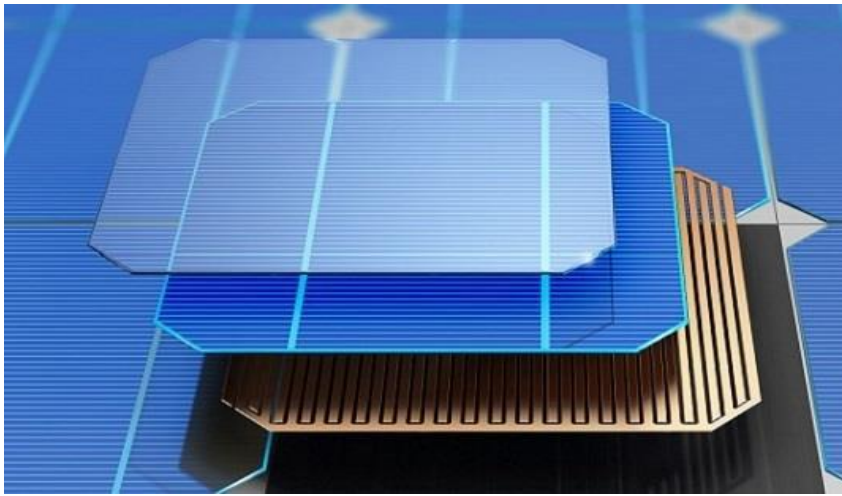


Figure I.11: Cellule photovoltaïque

### I.4.1 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p [10].

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule [10].

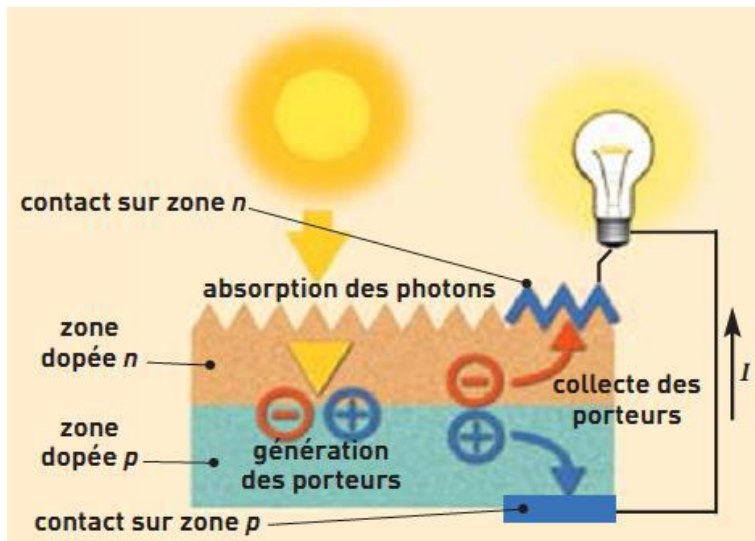


Figure I.12: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

#### I.4.2 Composition d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque de base est constituée d'une ou plusieurs couches actives entourées par des électrodes. Chaque couche de l'empilement doit vérifier certains critères. La représentation de cet empilement est schématisée sur la figure suivante

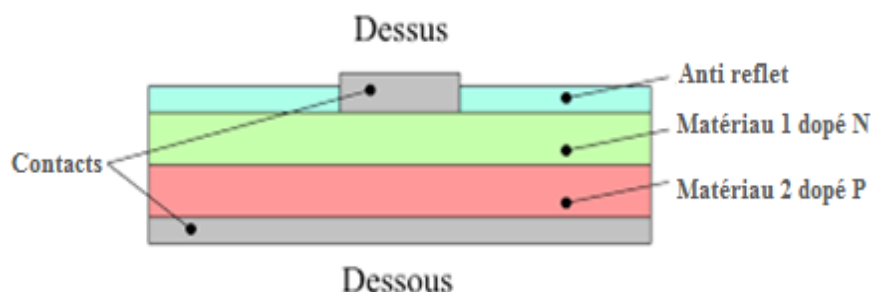


Figure I.13: Structure générale d'une cellule photovoltaïque



Les cellules photovoltaïques peuvent être vues comme un empilement de matériaux :

- **La couche active :** ou l'absorbeur constituée d'un premier matériau accepteur d'électrons et d'un second matériau donneur d'électrons, formant une jonction donneur-accepteur.
- **Les contacts métalliques :** avant et arrière constituant les électrodes positive (+) et négative (-) chargées de collecter le courant généré.
- **Des couches supplémentaires :** comme un anti-reflet ou une couche plus fortement dopée permettant d'améliorer les performances de la cellule : meilleure absorption de la lumière, meilleure diffusion des porteurs de charges dans le matériau etc [11].

### I.4.3 Les Différents types de cellules photovoltaïques

#### ✓ La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

La réalisation de nombreux dispositifs commence par la production d'une matière monocristalline de grande pureté. En particulier la fabrication de puces microélectroniques nécessite des substrats monocristallins semi-conducteurs. La fusion de zone et le tirage en creuset (méthode de Czochralski) sont les deux méthodes utilisées couramment pour obtenir des lingots monocristallins de grande pureté longs de plusieurs mètres et d'un diamètre allant jusqu'à 300mm [12].



Figure I.14: Monocristallin

#### ✓ La cellule photovoltaïque en silicium polycristallin

On peut réaliser d'un seul coup un lingot de grandes dimensions par refroidissement directionnel d'une masse de silicium en fusion. Le lingot obtenu est composé de plusieurs gros cristaux, séparés par des joints de grain. Ce matériau, moins homogène que le silicium

monocristallin, a de ce fait un rendement énergétique légèrement moins bon dans le commerce, mais sa fabrication est plus facile. Ces lingots de silicium multicristallin doivent être coupés en tranches de 200 à 400 mm.

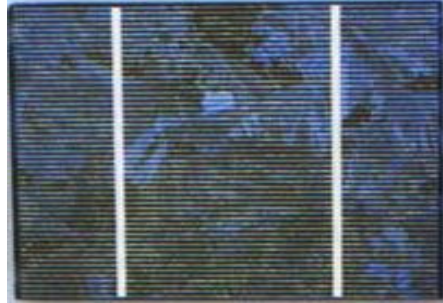


Figure I.15: Polycristallin

### ✓ La cellule photovoltaïque en silicium amorphe

La cellule photovoltaïque au silicium amorphe est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les poly cristallines. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires.

Cette cellule solaire présente de nombreux avantages. Elle est tout d'abord peu chère à fabriquer. Elle peut aussi être intégrée sur tout type de support, flexible ou rigide. Un autre point positif est qu'elle capte les rayons solaires même par temps nuageux. Son principal inconvénient est qu'elle offre un faible rendement, environ 7 % au maximum. Pour être rentable, il faut donc que la surface du panneau solaire soit conséquente. De même, ses performances diminuent dans le temps.



Figure I.16: amorphe

### ✓ La cellule photovoltaïque tandem

La cellule photovoltaïque tandem est quant à elle conçue à partir de deux couches semi-conductrices simples. Cela peut être une couche de silicium amorphe et une autre de silicium cristallin (mono ou poly) par exemple. Elle montre tout son intérêt pour une utilisation industrielle.

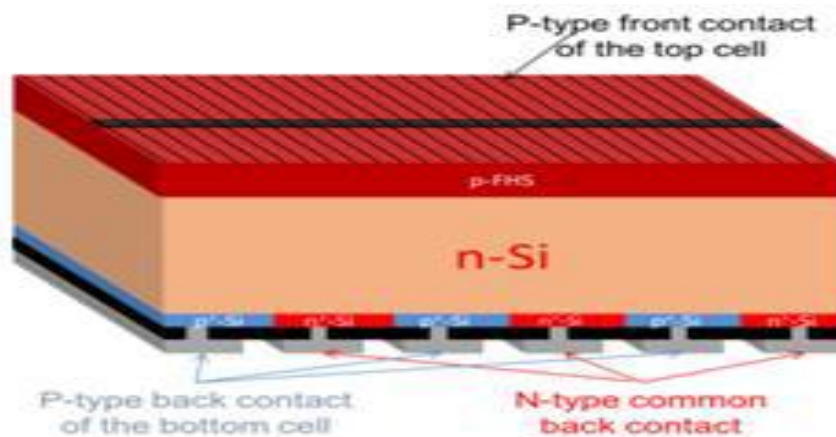


Figure I.17: Cellule tandem à hétérojonction à 3 terminaux

### ✓ La cellule photovoltaïque CIGS

Ce type de cellule photovoltaïque utilise un matériau semi-conducteur fait d'un alliage de cuivre, d'indium, de sélénium et de gallium. Ce mélange est disposé en couche très fine sur un support.

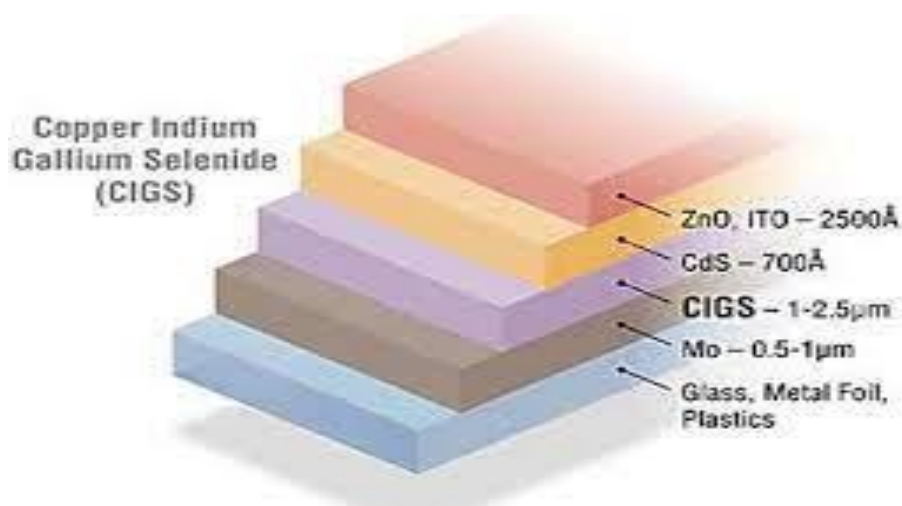


Figure I.18: Cellule photovoltaïque au CIGS

✓ **La cellule en couche mince de tellure de cadmium**

Ce modèle de cellule photovoltaïque est composé lui aussi à partir d'un matériau autre que le silicium. Ici, c'est du tellure de cadmium qui est employé en une seule couche scellée entre deux plaques de verre.

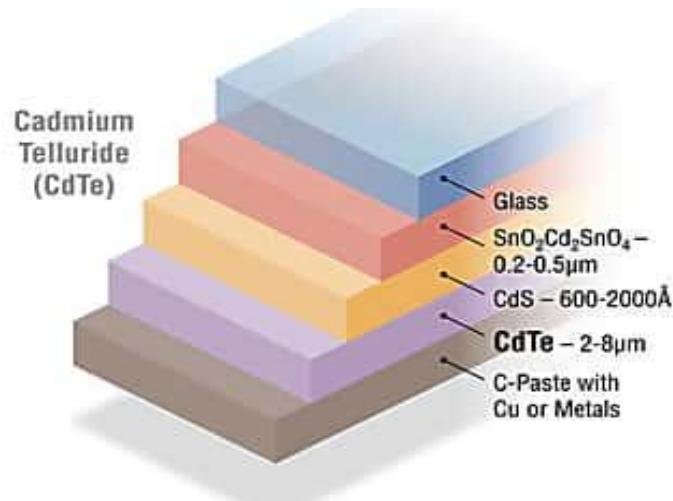


Figure I.19: Les couches d'une cellule CdTe/CdS

✓ **La cellule photovoltaïque multi-jonction**

La cellule photovoltaïque multi-jonction se compose de différentes couches de matériaux semi-conducteurs qui convertissent chaque rayon solaire, quelle que soit l'exposition. Les couches sont empilées, formant la cellule photovoltaïque multi-jonction

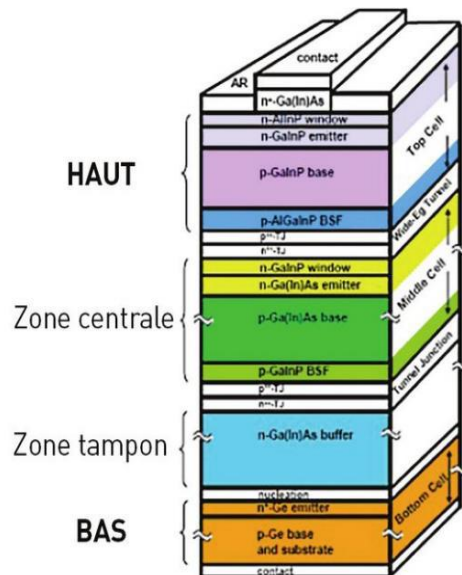


Figure I.20: Cellule multijonction.

## I.4.4 Avantages et inconvénients de Systèmes photovoltaïques

### Les avantages

- Les panneaux solaires utilisent une énergie verte et inépuisable
- Ils ne nécessitent que peu d'entretien
- Les systèmes d'autoconsommation solaire sont fiables et permettent d'avoir une visibilité sur le long terme
- Les panneaux solaires sont généralement garantis 20 ans
- Contrairement à d'autres systèmes utilisant les énergies renouvelables, les panneaux photovoltaïques sont parfaitement silencieux

### Les inconvénients

- Le prix d'achat de base qui peut être élevé pour un certain nombre de ménages
- L'esthétisme des panneaux qui peut parfois être un frein lorsque la maison se situe dans certaines zones où le design des maisons est particulier.

## I.5 CONCLUSION

A travers notre étude de ce chapitre, nous concluons que les énergies renouvelables ont une grande importance. Chaque type d' (EnR) à caractéristiques distinctives et un principe de fonctionnement qui diffère de l'autre; cela a poussé la plupart des pays développés à en dépendre pour produire de l'électricité et répondre à leurs besoins, Selon les capacités disponibles

L'énergie solaire modifie le système énergétique mondial car c'est la source d'énergie à la croissance la plus rapide au monde ; Il a récemment assisté à une baisse des coûts de production d'une manière qui le qualifie pour concurrencer le pétrole et le gaz, à l'heure actuelle, avec le faible coût des énergies renouvelables nous pouvons convertir des maisons ordinaires en maisons avec de l'énergie propre (ce qui signifie que le toit de la maison devient des cellules solaires et les murs de la maison sont des batteries) .

# **CHAPITRE II**

---



## **DEFORMATION DES PLAQUES PHOTOVOLTAÏQUES**

## **II.1 INTRODUCTION**

Dans une station solaire photovoltaïque, des centaines voire des milliers de panneaux photovoltaïques sont installées et placées selon les exigences du site, et pour avoir de l'énergie électrique utilisable, plusieurs dispositifs rentrent en vigueur (convertisseurs, câblages, système de protection ...) afin de réaliser un système complet qui permet de produire le maximum d'électricité et d'assurer une bonne distribution et stockage de cette dernière. Et comme toutes installations industrielles existantes une station solaire photovoltaïque comporte plusieurs défauts et anomalies affectant négativement la rentabilité de la station, ils sont liés aux défauts des différents composants de la station et aux perturbations liées aux conditions naturelles, parfois ces perturbations et défauts peuvent causer le dysfonctionnement total de la station.

Dans ce chapitre nous présentons des défauts rencontrés dans les panneaux photovoltaïques et leur classification selon leur impact sur les paramètres de panneau PV [13].

## **II.2 DEFAUTS DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUES**

### **II.2.1 Décoloration**

La décoloration du module photovoltaïque se traduit par un changement de couleur du matériau utilisé pour son encapsulation qui est généralement en Ethylène Vinyl Acétate (EVA) ou du matériau adhésif entre le verre et les cellules. Ce changement de couleur peut se traduire soit par un jaunissement soit par un brunissement du matériau encapsulant. Elle provoque une modification de la transmittance de l'encapsulant des cellules et par conséquent la puissance générée par le module est diminuée [14].

La décoloration peut apparaître dans des zones différentes et non adjacentes d'un même module. Ceci peut être dû d'une part, à des polymères encapsulant d'origine ou de caractéristiques différentes et d'autre part à l'EVA qui n'est pas déployée dans les mêmes zones du module de la même manière [15-16]. Oreski et Wallner avancent que les causes principales de la décoloration de l'EVA sont les rayons ultraviolets combinés à l'eau sous

des températures d'exposition supérieures à 50°C et provoquant ainsi un changement de la structure chimique du polymère.

Ces dernières années, la plupart des publications sur la dégradation des modules PV en silicium cristallin ont principalement porté sur la décoloration de l'EVA



**Figure II.1 :** Décoloration sur la surface de la cellule

Le délaminage est la conséquence de la perte d'adhérence entre les différentes couches du module PV et le détachement subséquent de ces couches. Il peut apparaître entre encapsulant et cellules polymères ou entre les cellules et la vitre avant. Le délaminage est un problème majeur, car il peut conduire à deux effets : une diminution de la lumière, où la réflexion augmente, ainsi que la pénétration de l'eau à l'intérieur de la structure de module [17].

Le délaminage est plus grave s'il se produit dans les extrémités du module car, outre les pertes de puissance, il entraîne des risques électriques sur le module et l'installation. La figure présente un exemple de la façon dont un décollement extrême peut détruire un module PV.

## **II.2.2 Délaminage**

Le délaminage est la conséquence de la perte d'adhérence entre les différentes couches du module PV et le détachement subséquent de ces couches. Il peut apparaître entre encapsulant et cellules polymères ou entre les cellules et la vitre avant. Le délaminage est un



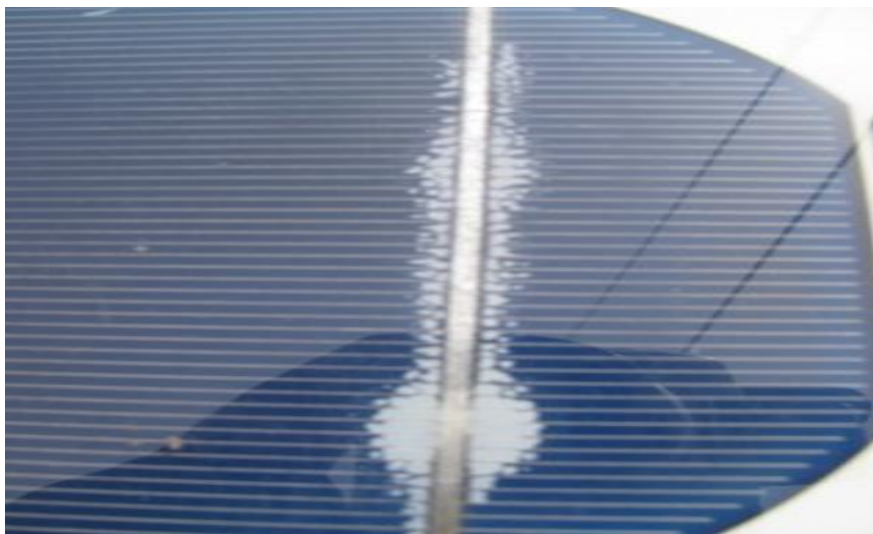
problème majeur, car il peut conduire à deux effets : une diminution de la lumière, où la réflexion augmente, ainsi que la pénétration de l'eau à l'intérieur de la structure de module [18].

Le délaminage est plus grave s'il se produit dans les extrémités du module car, outre les pertes de puissance, il entraîne des risques électriques sur le module et l'installation. La figure présente un exemple de la façon dont un décollement extrême peut détruire un module PV.



**Figure II.2** : défaut de délaminage

Jansen et Delahoy ont montré que la pénétration du sel et de l'humidité dans le module photovoltaïque constitue un facteur favorisant la délamination. D'autre part, ils avancent que la liaison interfaciale peut être attaquée chimiquement par l'acide fluorhydrique formé par le fluor et l'oxyde d'étain contenus dans le module.



**Figure II.3** : défaut de délaminage 2

### II.2.3 Les points chauds ou Hot-spots

Le phénomène des points chauds est un problème relativement fréquent dans les générateurs photovoltaïques actuels. Il comporte à la fois un risque pour la durée de vie du module photovoltaïque et une diminution de son efficacité opérationnelle lorsque des cellules PV sont associées en série, le courant circulant dans l'ensemble est limité par le courant généré par la cellule la moins performante ou la moins éclairée. Ainsi, une cellule qui ne recevrait pas la même quantité de lumière que le reste de l'ensemble, produirait un courant plus faible c'est ce qu'on appelle l'ombrage partiel. Si l'une d'elles était partiellement ombragée le courant ne pouvait plus circuler. La cellule accumulait alors le courant produit en amont et se comportait comme un récepteur. Elle dissipait une puissance sous forme de chaleur pouvant dépasser les 100°C ce qui pouvait la faire griller si le point chaud est causé par un shunt (court-circuit d'une cellule) ou une erreur dans l'interconnexion entre les cellules générant également un shunt. Le point chaud est directement lié à une erreur de fabrication de la cellule ou du module PV. En outre, si une cellule génère un courant plus faible que le reste des cellules (appelée mésappariement) [19].

Un point chaud apparaît sous la forme d'une cellule entière fonctionnant à une température plus élevée que le reste des cellules. La figure elle peut être considérée aussi comme une erreur de fabrication du module photovoltaïque. Le hot spot Figure (II.4) pourrait causer des dommages à la cellule ou l'encapsulant dans un court laps de temps de fonctionnement.

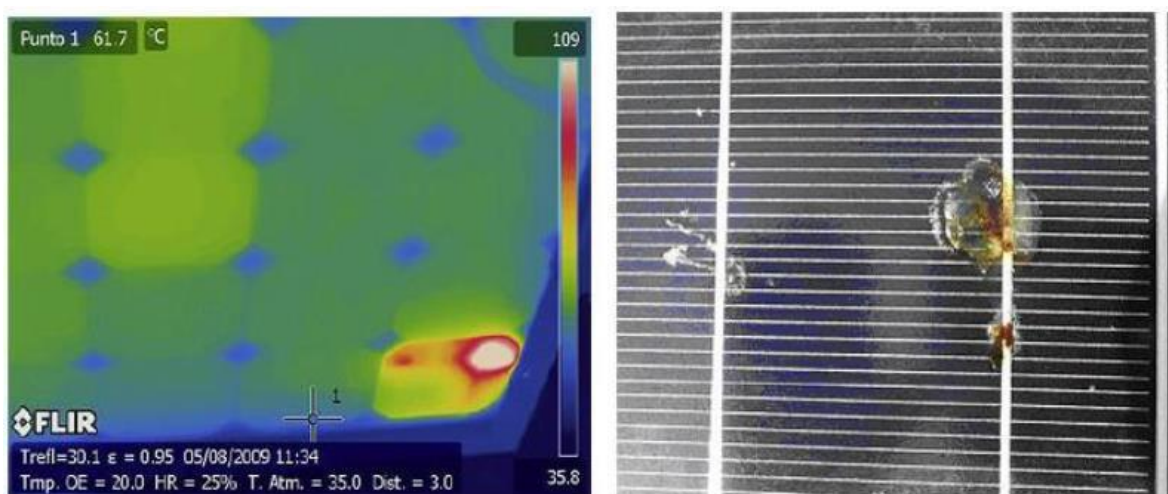
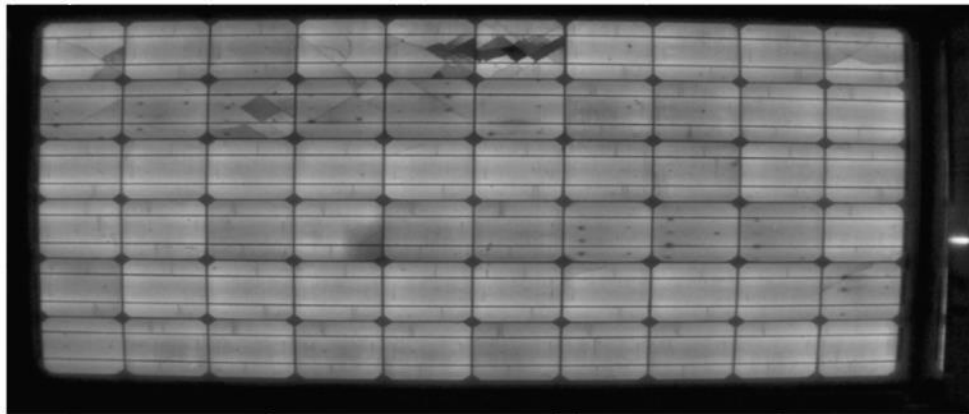


Figure II.4 : Défaut de point chaud

### **II.2.4 Présence des fissures dans les cellules**

Les fissures constituent un facteur important de dégradation des modules PV. À cause de réduire le cout de fabrication des panneaux PV pour économiser le silicium l'épaisseur et la surface du silicium de cellules sont modifiées (de 300  $\mu\text{m}$  à moins de 200  $\mu\text{m}$ ) donc cette modification rendait les cellules plus fragiles et sensibles aux fractures au cours de leur manipulation et au cours du stockage.

Cependant, le risque de choc électrique et de pénétration de l'humidité devient plus élevé. Les casses, les bris de verre et les fissures sont généralement suivies des autres types de dégradation tels que la corrosion, la décoloration, la délamination...etc.



**Figure II.5:** fissures dans les cellules PV

### **II.2.5 Module arraché au cassé**

La raison principale est les facteurs externes qui peuvent endommager une cellule solaire et en faire des panneaux solaires cassés.

Dommmages au module interne sont un problème lorsqu'il n'y a pas d'impact externe, comme une tempête qu'ont endommagée les panneaux solaires. Ce problème peut être causé par une production défectueuse ou une mauvaise sélection d'un ou de tous les composants.

Endommagement du module dû à des facteurs externes ce type de dommage se produit dans la plupart des cas pour des raisons météorologiques. La tempête, la grêle, la foudre et les surtensions ou la pression de la neige peuvent endommager un module solaire, mais

également le feu, une chaleur excessive ou une morsure d'animal peuvent également causer des dommages.

L'avantage de ces dommages est que vous pouvez souvent les réparer. Mais avec les dégâts externes décide déjà la force des dégâts Pièces volantes, branches cassées, grêlons de la taille de balles de tennis et bâtiments effondrés. Les tempêtes causent souvent d'énormes dégâts aux panneaux solaires. La conséquence : Bris de verre, micro fissures et rupture de cellule, Cadre de module rayé.



**Figure II.6 :** Module cassé

### **II.2.6 Défaut de revêtement anti -reflet (ARC)**

En dehors des stratégies telles que la texturation des surfaces cellulaires, les performances des cellules qui forment un module PV peut être amélioré par l'ajout d'un revêtement anti-réfléchissant de manière à maximiser la lumière qui atteint la zone active de la cellule. Pendant l'exposition du module PV au soleil, le revêtement anti -reflet (ARC) reçoit un rayonnement qui pourrait induire un changement de la coloration ARC (figure II.7). Les propriétés anti- réfléchissantes peuvent subir des modifications, dans ce cas. La lumière qui atteint les cellules peut être plus faible que prévues [20].



Figure II.7 : défaut de revêtement anti –reflet.

## II.2.7 Corrosion et oxydation

La corrosion (décoloration) et l'oxydation des contacts métalliques tels que les doigts, les barres omnibus, les interconnexions de ruban et de chaîne, le lien de soudure et les bornes de sortie sont causés par plusieurs facteurs tels que la pénétration d'humidité, une absorption plus importante de l'agent d'encapsulation, une combinaison de tension du système, ce défaut augmente la résistance série et dégrade le facteur de remplissage, conduit à une puissance de sortie réduite.

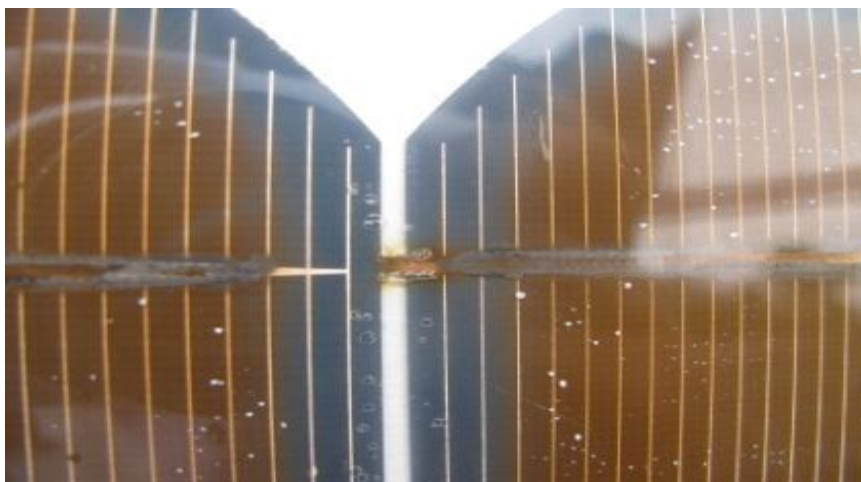


Figure II.8 : Corrosion dans les interconnexions de cellules de jeu de barre

### II.2.8 Traces escargot ‘Snail tracks’

Les traces d’escargots (voir figure II.9), sont un phénomène généralisé de défauts des modules PV, que l’on observe chez différents fabricants de modules installés sur le terrain après plusieurs mois ou plusieurs années, ce défaut est une décoloration des lignes argentées de la grille le long du bords de cellules ou microfissures



Figure II.9 : Traces d'escargot ‘Snail tracks’

### II.2.9 Présence de bulles d’air

Ces bulles dus à une réaction chimique où des gaz sont libérés et le mal adhérence entre les couches de panneau PV. La formation d'une bulle rend la dissipation de la chaleur des cellules plus difficiles, et par conséquent réduit le refroidissement ce qui minimise la durée de vie des PV. Parfois, une bulle peut être seulement détectée en utilisant des techniques de RI ou IR Infrarouge? car elle n'est pas visible par l'inspection visuelle seule. Il peut arriver que le détachement de la cellule du verre soit à l'origine des bulles. Les bulles situées sur la face avant du module peuvent produire une réduction de l'éclairement arrivant sur le module. Elles provoquent la réflexion d'une partie de la lumière qui atteint le module.



Figure II.10 : Défaut de bulles d’air

### II.2.10 Défauts de la diode de by-pass et diode anti-retour

La diode de by-pass est une des solutions pour protéger les cellules de l'ombrage partiel elle évite la polarisation inverse, le hot spot et destruction du module. Cette diode se place, en général, en parallèle avec une branche de dix-huit cellules. On peut constater plusieurs défauts de cette dernière, ces défauts sont en général des défauts de fabrication ces défauts peuvent être apparus suite à la rupture de la connexion de la diode. Donc dans un panneau photovoltaïque on peut trouver une diode déconnectée, une diode équivalente à une impédance quelconque, une diode court-circuitée et une diode inversée. De la même manière que pour la diode de by-pass, la diode anti-retour est exposée aux mêmes types de défauts envisagés pour la diode anti-retour : court-circuit, impédance quelconque, circuit ouvert et diode inversée [21].

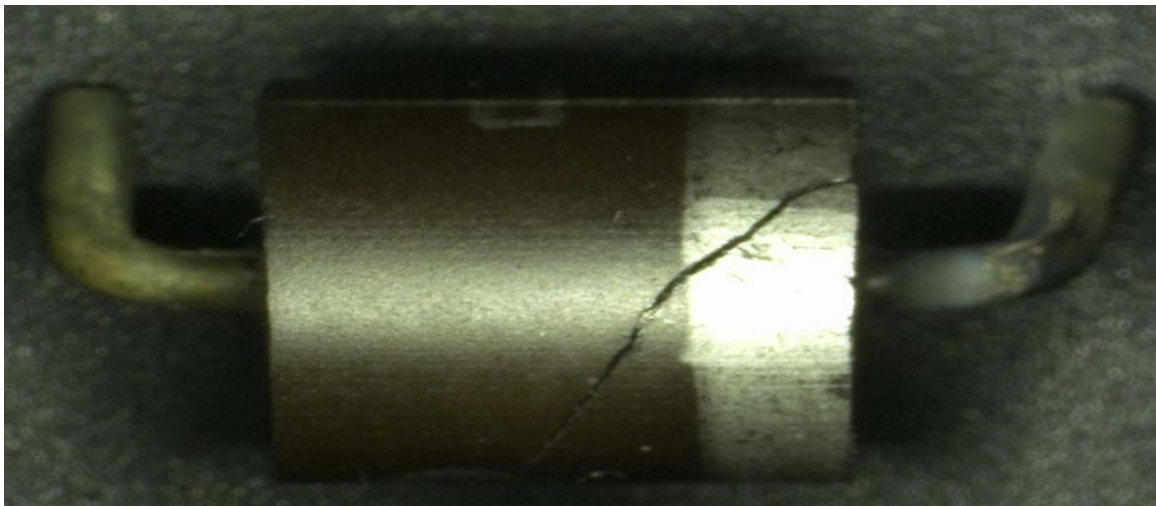


Figure II.11 : Défaut de la diode de by-pass

### II.2.11 L'augmentation de la résistance série R

La résistance en série est l'un des plus importants facteurs influençant les performances des cellules solaires. Généralement l'augmentation de la résistance série est causée généralement par la corrosion de la connectique entre deux modules PV, une vis de connexion mal serrée, la corrosion de point de soudure entre cellules..., etc. En fonctionnement normal, cette résistance de connectique est quasi nulle.

La valeur de cette résistance peut être augmentée dans plusieurs cas anormaux. Au fur et à mesure que la résistance série augmenté, le facteur de forme diminue. Cela conduit à une diminution de l'efficacité des cellules.

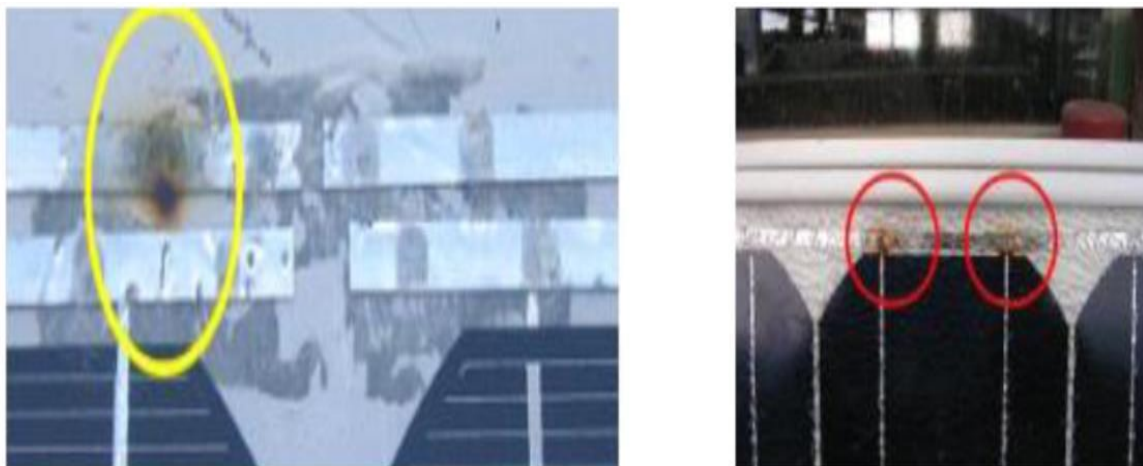


Figure II.12 : Défaut d'augmentation de la résistance  $R_s$

### II.2.12 Diminution de la résistance parallèle $R_p$

Les pertes d'énergie importantes causées par la présence d'une résistance shunt  $R_p$  sont généralement dues à d'une mauvaise conception des cellules solaires [22], elle caractérise un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière « bornes opposées d'une photopile ». Elle est généralement très supérieure à la résistance série  $R_s$ .

Une résistance série trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile, en outre une photopile dont la résistance shunt trop faible ne donnera plus de tension sous faible

### II.2.13 Défaut de Mismatch et l'effet d'ombrage

Le défaut Mismatch est le défaut causé par l'association des cellules photovoltaïques qui ne sont pas homogènes ou mal assorties (ces cellules photovoltaïques possèdent une caractéristique non identique), ce déséquilibre dégrade le point de puissance maximum, et conduit à une baisse de production du module PV

On doit donc veiller à ce que les paramètres de l'équation soient identiques pour l'ensemble des cellules, car le changement dans l'un des paramètres de l'équation conduira à



la dissemblance de caractéristique des cellules [23]. Il existe deux types de défauts de mismatch : mismatch statique et mismatch dynamique.

Le défaut de mismatch statique est lié à la tolérance de fabrication et au vieillissement des cellules PV.

Le défaut de mismatch dynamique est causé par le changement de niveau d'irradiance et appelé l'ombrage partiel.

Le défaut du l'effet d'ombrage est un cas particulier du défaut Mismatch car sa présence conduit à une diminution de l'ensoleillement reçu par les cellules PV. Le défaut Mismatch peut être dû à une légère variance des caractéristiques des cellules PV à la fabrication mais aussi aux différentes conditions de fonctionnement causées par les différents défauts



Figure II.13 : Défaut d'ombrage

### II.2.14 Autres Défauts

Dans un string PV, on peut rencontrer plusieurs défauts tels que :

Défaut de connexion du module : module court-circuité, module connecté en parallèle avec une impédance et inversion de la polarité du module, ou module arraché.

Défauts dans la boîte de jonction PV : rupture du circuit électrique, court-circuit du circuit électrique, destruction de la liaison, corrosion des connexions. Les insectes, la poussière et/ou l'humidité à l'intérieur des boîtes [24].

### II.3 Classification des défauts

Les défauts présentés dans le tableau (II.1) ont été classés suivant l'emplacement de leur apparition dans une installation PV (panneau, connexion, câblage, système de protection).

Composant du champ	Nature des défauts	Dénomination de défauts
Cellules	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Module arraché ou cassé</li> <li>• Pylônes, cheminée, sable, neige etc.</li> <li>• Echauffement des cellules</li> <li>• Dégradation des interconnexions</li> <li>• Fissure</li> </ul>	Défaut de mismatch et l'effet d'ombrage
Groupes de cellules	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absence de diodes</li> <li>• Inversion de la polarité des diodes</li> <li>• Diode mal connectée</li> <li>• Diode court-circuitée</li> </ul>	Défaut de diode de by-pass
Module	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modules court-circuités</li> <li>• Modules shuntés</li> </ul>	Défaut de module

Tableau II.1 : Classification de défauts

Par contre, selon la démarche de modélisation retenue, on cherche à classer les défauts selon l'étape à laquelle ils interviennent et s'ils peuvent modifier le comportement du composant de cette étape [25] ;

Nature des Défauts	Paramètres affectés
Module arraché ou cassé Ombrage : Feuille d’arbre, déjections, Sable, pollution, neige etc.	Variation de photo courant ( $I_{ph}$ )
Echauffement des cellules	Variation de la température (T)
Dégradation des interconnexions, Fissure, Corrosion des liaisons entre cellules	Variation de la résistance série ( $R_s$ )
Modules de performances différentes Détérioration des cellules Pénétration de l’humidité	Variation de tous les paramètres des cellules

**Tableau II.2:** impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule

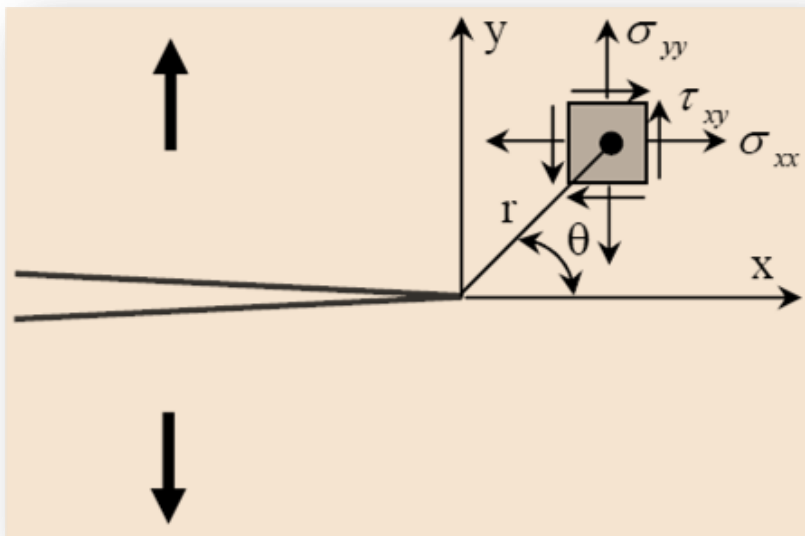
## II.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents défauts affectant les panneaux PV. On a montré que ces défauts peuvent être divisés en général aux défauts de fabrication, et aux défauts dus aux conditions climatiques et aux conditions d’exploitation. On a aussi constaté que la plupart des défauts dits électriques, sont dus aux conditions climatiques telles que l’augmentation de la résistance série. En plus des défauts électriques, certaines discontinuités sont venues d’origine mécanique notamment la présence des fissures qui peuvent être s’amorcer sous l’effet de la charge du poids propre du système et qui pourrait se développer au cours du temps.

Dans la plus part des cas, une plaque solaire subira, des déformations qui sont dues au voilement. Si la plaque est affectée par la présence de fissures, le phénomène de propagation de cette dernière deviendra préjudiciable et risque à endommager le système.

# CHAPITRE III

---



APPROCHES MECANIKES APPLIQUEES

### III.1 INTRODUCTION

En service, où les conditions climatiques varient, les panneaux photovoltaïques sont constamment sollicités par des chargements dynamiques qui sont susceptibles d'endommager la structure par la propagation de fissures.

Comprendre la rupture des matériaux n'est pas une mince affaire. Lorsqu'une fissure commence à apparaître, on peut en effet montrer qu'elle concentre les forces à sa pointe. C'est donc au voisinage de ce point, sur une zone d'extension très petite, que les processus physicochimiques de rupture et d'endommagement sont activés. Ceux-ci dépendent crucialement de la structure du matériau à des échelles très petites. Les théories classiques rendent compte de ces mécanismes à travers des lois de comportement phénoménologiques, et distinguent les modes de rupture « fragiles » [26] et « ductiles » [27].

Notre étude s'inscrit dans une démarche d'investigation du phénomène de la propagation des fissures dans les deux couches de contact constituant le sandwich dont le comportement mécanique des deux matériaux se diffère, en faisant appel à des critères basés sur la mécanique de la rupture appliquée, tout en identifiant les différents paramètres qui se manifestent et influencent sur le comportement mécanique du matériau vis-à-vis des risques de la rupture.

### III.2 MECANIQUE DE LA RUPTURE APPLIQUEE

La mécanique de la rupture a été introduite par Griffith [28] en 1920, dont le but était de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide des paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau.

Les premiers développements théoriques d'analyse des champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure ont été entrepris vers 1940, puis l'extension de la discipline a été amorcée par Irwin [29] en 1960. Le développement de la mécanique de la rupture s'étend aux problèmes non linéaires matériellement et géométriquement, aux problèmes de bifurcation des fissures en modes mixtes et plus récemment aux composites, aux techniques numériques de résolution et à l'état de l'art relatif au dimensionnement de diverses structures complexes.

La rupture par fissuration est la création d'une surface de discontinuité. Il s'agit de considérer que les liaisons atomiques se comportent l'une après l'autre plutôt que toutes en même temps, en formant un trou qui s'agrandit : on dit que la fissure se propage (Figure III.1).

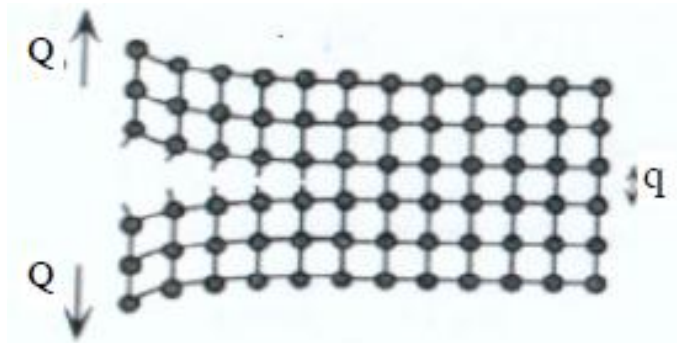


Figure III.1 Propagation d'une fissure

Le mécanisme de rupture par fissuration peut intervenir selon deux types de fissuration:

- **La fissuration brutale:** pour les solides, ou pour les matériaux à très haute résistance, les contraintes de travail sont très élevées, une énergie potentielle considérable est ainsi créée ; la présence de petites fissures peut alors conduire à une rupture brutale qui souvent ne s'accompagne pas de déformations plastiques macroscopiques par suite de la très faible ductilité.
- **La fissuration successive:** il s'agit d'une succession de mécanismes (fragile-ductile) qui, sous contraintes répétées, entraîne la fissuration successive, appelée la rupture par fatigue.

### III.2.1 MODES ELEMENTAIRES DE FISSURATION

D'un point de vue macroscopique, on peut considérer deux modes principaux de rupture : la rupture plate et la rupture inclinée. La rupture plate correspond à une surface de rupture globalement perpendiculaire à la direction de la contrainte principale maximale. La rupture inclinée dans le sens transversal par rapport à la direction de propagation s'accompagne souvent de grandes déformations. L'examen du faciès de rupture permet bien souvent de détecter, après rupture, le mécanisme de rupture et le type de fissuration produit.

On remarque généralement :

- Une zone lisse et soyeuse correspondant à la propagation en fatigue ou,
- Une zone à grains cristallins ou moins apparents, correspondant à la fissuration brutale.

On montre que toute fissuration peut être ramenée à l'un des trois modes simples ou à leur superposition. Il existe donc trois modes de fissuration élémentaires (Figure III.2).

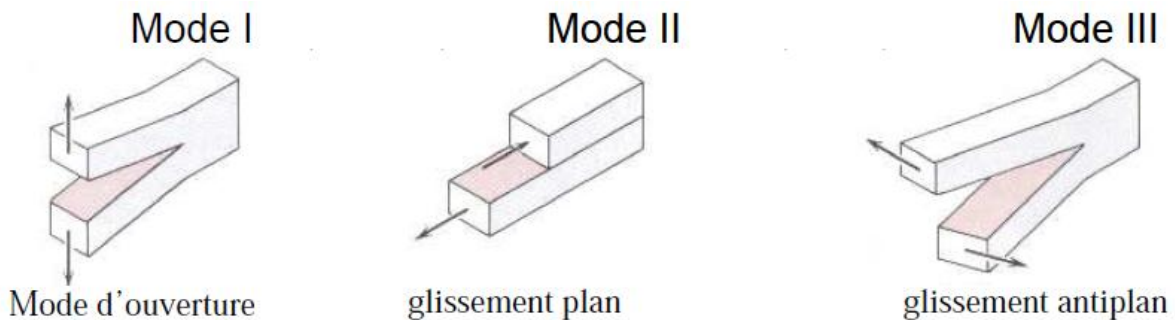


Figure III.2 : Modes de fissuration

La mécanique de la rupture étudie l'interaction entre la discontinuité géométrique (fissure) et le milieu continu avoisinant, ainsi que l'évolution de cette discontinuité. D'un point de vue mécanique, on peut distinguer schématiquement, dans un milieu fissuré, trois zones successives (Figure: III.3) [30].

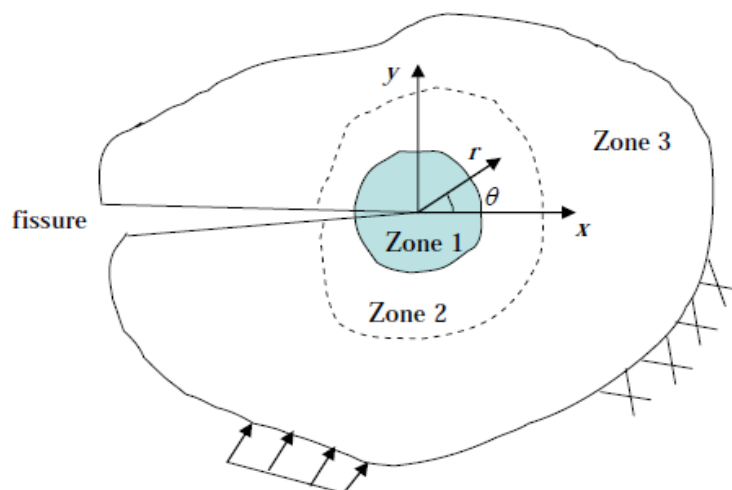


Figure III.3: Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure

➤ **La zone d'élaboration 1:** elle se trouve à la pointe de fissure et dans le sillage laissé par la fissure au cours de sa propagation. L'étude de cette zone est très complexe à cause des contraintes importantes qui ont fortement endommagé le matériau. Elle est discontinue au

sens de la mécanique des solides. La théorie classique de la mécanique de la rupture réduit cette zone à un point pour les problèmes plans et à une courbe pour les problèmes tridimensionnels.

➤ **La zone singulière 2:** dans laquelle les champs de déplacements, déformations et contraintes sont continus et possèdent une formulation indépendante de la géométrie lointaine de la structure. On démontre que dans cette zone, les composantes de champ de contraintes sont infinies au voisinage du front de fissure ( $r \rightarrow 0$ ).

Plus exactement, la singularité est en  $(1/r)$  en milieu élastique linéaire. Le matériau ayant une limite élastique, il existe un rayon  $r_p$  autour de la pointe de fissure qui détermine la forme de la zone plastique. En fonction de la valeur de  $r_p$ , on dira que la rupture est fragile pour  $r_p$  petit et qu'elle est ductile pour  $r_p$  grand. Cette distinction sur la base du paramètre  $r_p$  est très importante car elle conditionne la validité de la théorie utilisée:

- La Mécanique Linéaire de la Rupture pour les ruptures fragiles.
- La Mécanique Non Linéaire de la Rupture dans le cas de zone plastique non négligeable (rupture ductile).

➤ **La zone 3 extérieure** comprenant les champs lointains se raccordant d'une part, à la zone singulière, et d'autre part aux conditions aux limites en charges et en déplacements. Dans cette zone, les champs de déplacements, déformations et contraintes varient peu et peuvent être approximés par des polynômes communément utilisés dans la méthode des éléments finis.

Diverses méthodes d'analyse permettent d'étudier les champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure. On regroupe l'ensemble de ces méthodes sous deux types d'approches :

- Approches directes : qui sont fondées sur l'utilisation des fonctions d'Airy ; ces approches résolvent des problèmes plans et font appel à la recherche de fonctions analytiques.
- Approches énergétiques qui sont basées sur l'analyse énergétique du milieu continu contenant une fissure, il s'agit d'un bilan énergétique global intégrant le taux de restitution d'énergie dû à un accroissement virtuel de la fissure.



### III.2.2 CRITERES DE RUPTURE

En général, trois paramètres peuvent être utilisés pour étudier les caractéristiques de la zone singulière: le facteur d'intensité de contrainte  $K$ , le taux de restitution d'énergie  $G$ , et l'intégrale  $J$ .  $K$  est le paramètre de l'approche locale directe.  $G$  et  $J$  sont les paramètres de l'approche énergétique globale.

#### III.2.2.1 CRITERE DU FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTES

D'une manière générale, le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  en mode I est exprimé selon l'équation :

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \alpha(a) \quad (1)$$

Avec:  $\sigma$  est la contrainte appliquée,  $\alpha(a)$  est le coefficient de correction géométrique,  $a$  est longueur de la fissure.

Dans la zone singulière, le champ de contraintes présente une singularité en  $r^{-1/2}$  à la pointe de fissure. L'intensité de la singularité est caractérisée par les paramètres appelés facteurs d'intensité de contraintes, notés  $K_I$ ,  $K_{II}$  et  $K_{III}$  pour chacun des modes élémentaires.

A l'aide de la théorie de l'élasticité, Irwin a montré que, en déformation ou en contrainte plane, les déplacements  $u_i$  et les contraintes  $\sigma_{ij}$  dans cette zone singulière peuvent être exprimés en fonction des facteurs d'intensité de contraintes :

$$u_1 = \frac{K_I}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\theta}{2} (K - \cos \theta) + \frac{K_{II}}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} (K + \cos \theta + 2) \quad (2)$$

$$u_2 = \frac{K_I}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} (K - \cos \theta) - \frac{K_{II}}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\theta}{2} (K + \cos \theta - 2) \quad (3)$$

$$\sigma_{11} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) - \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right) \quad (4)$$

$$\sigma_{12} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad (5)$$

$$\sigma_{22} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \sin \frac{\theta}{2} + \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right) \quad (6)$$

Avec  $K = 3 - 4\nu$  en déformation plane

$K = \frac{3 - \nu}{1 + \nu}$  en contrainte plane

$r, \theta$ : Le rayon et l'angle en coordonnées polaires.

$\mu$  : Module de cisaillement.

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$\nu$  : Coefficient de poisson.

E : module de Young.

Dans le cas d'un chargement hors du plan, la seule composante du déplacement est  $u_3$ .

Les déplacements et les contraintes ont les expressions suivantes :

$$u_3 = \frac{2K_{III}}{\mu} \left( \frac{r}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

$$\sigma_{13} = - \frac{2K_{III}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (8)$$

$$\sigma_{23} = - \frac{2K_{III}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (9)$$

Les facteurs  $K_I$ ,  $K_{II}$  et  $K_{III}$  sont indépendants de  $r$  et  $\theta$ . Ils ne dépendent que de la répartition des efforts extérieurs d'un solide donné et de la géométrie de la fissure. Ils sont proportionnels à la discontinuité du déplacement des lèvres de la fissure. On a les expressions suivantes qui constituent leurs définitions pour les milieux fissurés :

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left( \frac{E}{8C} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_2] \right) \quad (10)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \left( \frac{E}{8C} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_1] \right) \quad (11)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \left( \frac{E}{8(1+\nu)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_3] \right) \quad (12)$$

avec :  $C=1$  en contrainte plane

$C=1 - \nu^2$  en déformation plane

$[u_i]$  étant les déplacements des lèvres de fissure correspondant aux trois modes.

La contrainte critique est une valeur qui est donnée pour chaque matériau, elle représente la contrainte qu'un matériau peut supporter avant la formation d'une fissure ou avant la propagation d'une fissure préexistante. Le critère de contrainte critique peut s'écrire:

$$\sigma \geq \sigma_C \text{ ou } (\tau \geq \tau_C)$$

Où  $\sigma$  et  $\tau$  sont les composantes normales et tangentielles du tenseur de contraintes qui agit sur une surface. D'où il ne faut pas choisir un matériau seulement au sens de sa résistance à la ruine classique, mais aussi au sens de son comportement vis-à-vis d'une forme d'entaille géométrique particulière ou d'une fissure.

Ceci nécessite donc la recherche de nouveaux critères de ruine pour les structures fissurées qui associent la géométrie de l'entaille à la résistance à rupture.

D'un point de vue énergétique, l'énergie nécessaire à engendrer une fissure de  $da$ , qui provoquera la rupture est appelée taux de restitution d'énergie critique. Les valeurs des facteurs d'intensité de contraintes sont calculées analytiquement ou par éléments finis pour différentes conditions aux limites, et géométries de pièces et de fissures. Le facteur critique d'intensité de contraintes  $K_C$  correspond à la force maximale d'instabilité.

Cette valeur caractéristique de la ténacité à la rupture du matériau traduit la ruine par fissuration brutale. Le critère de rupture associé correspond à une distribution critique des contraintes au voisinage de la fissure : la rupture aura lieu pour une valeur du facteur d'intensité des contraintes supérieure à la valeur critique:  $K_I \geq K_{IC}$ . Ce critère est essentiellement utilisé pour un état de déformations planes. Dans le cas de l'état de contraintes planes, le critère d'instabilité  $K_C$  dépend fortement de l'épaisseur.

### III.2.2.2 CRITERE DU TAUX DE RESTITUTION D'ENERGIE G OU DE L'INTEGRALE J

Griffith [28] est le premier à aborder le problème des corps fissurés d'un point de vue énergétique. Par l'analyse du bilan énergétique, le taux de restitution d'énergie, noté  $G$ , a été introduit. C'est l'énergie nécessaire pour faire progresser une longueur unitaire de la fissure.

Elle correspond à la décroissance de l'énergie potentielle totale  $W$  du milieu fissuré pour passer d'une configuration initiale avec une longueur de fissure  $a$ , à une autre où la fissure se trouve augmentée d'une unité de longueur  $da$ :

$$G = -\frac{dW}{da} \quad (13)$$

Où

$$W = W_e + W_{ext} \quad (14)$$

Avec

$W_{\text{ext}}$  énergie potentielle des forces extérieures

$W_e = \int_V W_e dV$  Energie de déformation élastique

$W_e = \int_0^\varepsilon \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$  Densité d'énergie de déformation élastique

Pour une fissure en milieu bidimensionnel, d'épaisseur  $b$ , on écrit :

$$G = \frac{1}{b} \frac{dW}{\Delta a} \quad (15)$$

Avec  $\Delta a$  est la variation de longueur de fissure.

En utilisant le champ des contraintes dans la zone singulière et la loi de comportement élastique linéaire, on peut relier  $G$  aux facteurs d'intensité de contraintes par :

$$G = \frac{(K_I^2 + K_{II}^2)}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \quad (16)$$

avec  $E' = E$  en contrainte plane

$E' = E/(1 - \nu^2)$  en déformation plane

$G$  est une valeur négative parce que l'énergie potentielle diminue lors de l'accroissement de la fissure.

Selon Griffith, "la rupture se produit lorsque l'énergie restituée par l'extension de la fissure est supérieure à l'énergie nécessaire à créer la surface relative à cette extension". Si l'on considère les conditions initiales d'une structure chargée dans le domaine élasto-plastique, et après la propagation de la fissure a d'une quantité  $\delta a$ , la condition d'équilibre est caractérisée par la condition énergétique suivante :

$$\delta W + G_C \delta a = 0 \quad (17)$$

$\delta W$  est la variation de l'énergie potentielle et  $G_C$  est l'énergie de rupture par unité de surface. La condition de la rupture devient :

$$-\frac{\partial W}{\partial a} \geq G_C \quad (18)$$

Si l'on considère  $\delta a \rightarrow 0$  on obtient la forme différentielle de Griffith :

$$-\frac{\partial W}{\partial a} = G \geq G_C \quad (19)$$

Où  $G$  est le taux de restitution de l'énergie.

Une autre façon de caractériser la singularité du champ des contraintes au voisinage de la pointe des fissures est l'étude de certaines intégrales de contour que l'on peut déduire de la loi de conservation de l'énergie. Dans un milieu élastique linéaire fissuré plan, Rice, en 1968 [31], a utilisé pour la première fois dans le cadre de la mécanique de la rupture une intégrale de contour, elle est définie comme suit:

$$J = \int_{\Gamma} \left\{ W_e n_1 \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right\} ds \quad (20)$$

Où  $W_e$  est la densité d'énergie de déformation élastique,  $\Gamma$  est un contour ouvert entourant la pointe de la fissure. Celle-ci est supposée rectiligne suivant l'axe de la fissure. On note par  $\vec{n}$  la normale extérieure au contour,  $\sigma_{ij}$ ,  $n_j$  la contrainte appliquée sur le contour et  $u_i$  le déplacement correspondant (figure III.4).

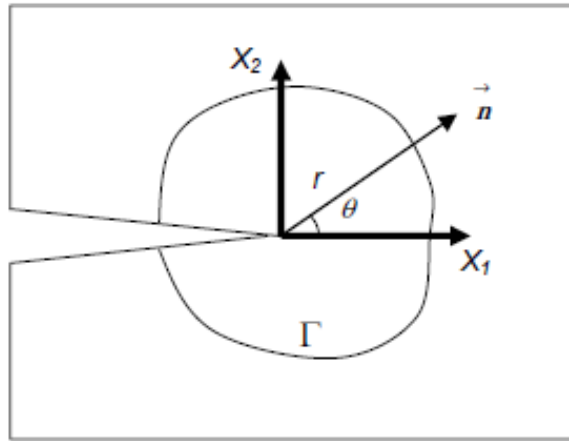


Figure III.4 : Contour d'intégration

Dans le cas d'un solide élastique homogène, linéaire ou non, cette intégrale est indépendante du contour d'intégration. Rice l'a interprétée comme la différence d'énergie potentielle  $W$  de deux corps fissurés chargés de la même façon mais dont les longueurs de fissures diffèrent d'une longueur  $\Delta a$ , ce qui s'exprime par:

$$J = - \lim_{\Delta a \rightarrow \infty} \frac{W(a+\Delta a) - W(a)}{\Delta a} = - \frac{dW}{\Delta a} \quad (21)$$

En comparant avec la grandeur  $G$  définie précédemment, on peut dire que dans le cas d'un matériau élastique ou dans le cas d'un corps subissant une très faible déformation plastique en fond de fissure, on a:

$$J = G = - \frac{dW}{\Delta a} \quad (22)$$

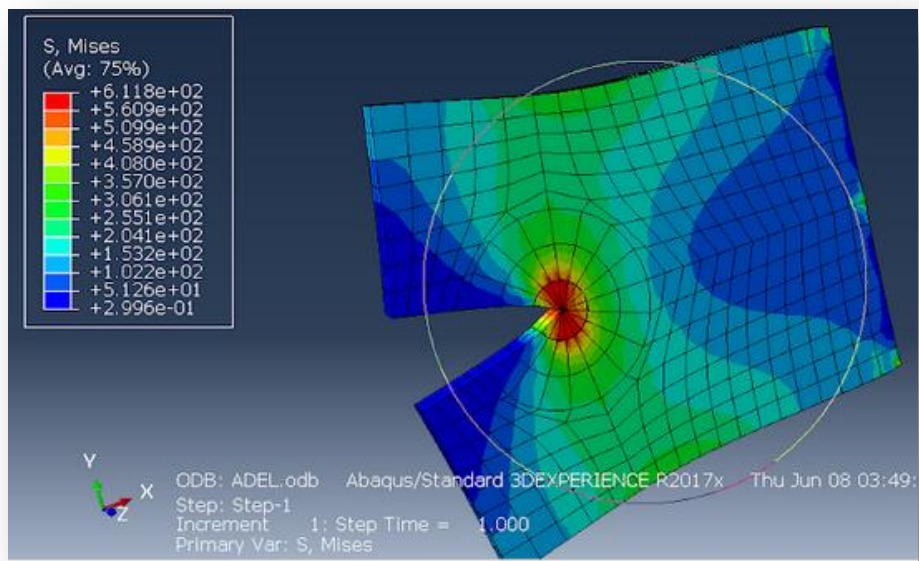
Le taux de restitution de l'énergie pouvant s'écrire sous forme d'une intégrale de contour, le critère deviendra alors :

$$- \frac{\partial W}{\partial a} = J \geq J_c \quad (23)$$

### III.3 CONCLUSION

Un rappel des concepts fondamentaux des approches mécaniques fréquemment utilisées face aux problèmes liés à la rupture par fissuration était nécessaire afin de désigner le critère de rupture à adopter pour faire l'analyse de la propagation des fissures dans deux matériaux de nature totalement différentes, à savoir le verre et l'aluminium où cela s'effectuera séparément.

# CHAPITRE IV



## RESULTATS DE CALCUL ET DISCUSSION

## IV.1 INTRODUCTION:

La rupture des composants fissurés est gouvernée par les contraintes au voisinage de la pointe de fissure. La contribution de contrainte singulière est caractérisée par le facteur d'intensité de contrainte  $K$ .

Les facteurs d'intensité de contrainte dépendent de la géométrie du composant et des conditions de chargement (traction, flexion, contraintes thermiques,...). Une procédure pour leur détermination est la technique de la fonction de poids où les fonctions de poids ne dépendent que sur la géométrie de la fissure.

Alors que les solutions de facteur d'intensité de contrainte sont rapportées dans les manuels [32-35] pour de nombreuses géométries de fissures et les cas de charge, les fonctions de poids sont rarement disponibles [36-38]. Dans [38] un grand nombre des solutions de facteur d'intensité de contraintes ont été données, des méthodes pour la détermination des fonctions de poids ont été rapportées et des résultats numériques pour un certain nombre de géométries de fissures ont été compilés.

Dans notre étude, de nouvelles solutions pour les facteurs d'intensité de contraintes et les fonctions de poids sont compilées sous forme de tableaux ou de relations approchées [39].

Le présent chapitre, est affecté à une étude analytique du phénomène de la propagation des fissures dans les deux couches de contact constituant le sandwich de la plaque solaire, en tenant compte des différents paramètres géométriques sous l'effet de chargement en traction pure et cisaillement, ainsi des contraintes résultantes du voilement thermique.

## IV.2 PRESENTATION DE L'APPROCHE ANALYTIQUE:

Pour la détermination des facteurs d'intensité de contrainte, la méthode BCM (Boundary Collocation Method) a été utilisée et pour la détermination de la fonction de poids, la méthode d'ajustement direct [38] a été appliquée. Le facteur d'intensité de contrainte  $K$  est une mesure du terme de contrainte singulier se produisant près de la pointe d'une fissure et défini par

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi a}} f_{ij}(\varphi) \quad (1)$$



Où  $r$  et  $\varphi$  sont les coordonnées polaires avec l'origine au fond de la fissure. Les fonctions angulaires sont :

Pour le mode I :

$$f_{xx} = \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \left[ 1 - \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{3\varphi}{2}\right) \right] \quad (2)$$

$$f_{yy} = \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \left[ 1 + \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{3\varphi}{2}\right) \right] \quad (3)$$

$$f_{xy} = \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{3\varphi}{2}\right) \quad (4)$$

Pour le mode II :

$$f_{xx} = \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \left[ 2 + \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{3\varphi}{2}\right) \right] \quad (5)$$

$$f_{yy} = \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{3\varphi}{2}\right) \quad (6)$$

$$f_{xy} = \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \left[ 1 - \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{3\varphi}{2}\right) \right] \quad (7)$$

$K$  est le facteur d'intensité de contrainte. Pour les modes de chargement considérés dans ce rapport, l'intensité de la contrainte les facteurs  $K_I$  et  $K_{II}$  sont exprimés comme

$$K_I = \sigma^* \sqrt{\pi a} F_I(a/W) \quad (8)$$

$$K_{II} = \tau^* \sqrt{\pi a} F_{II}(a/W) \quad (9)$$

Où  $a$  est la longueur de la fissure,  $W$  est la largeur du composant et  $\sigma^*$ ,  $\tau^*$  sont les contraintes caractéristiques dans le composant.  $F_I$  et  $F_{II}$  sont des fonctions géométriques en rapport de la longueur de la fissure à la largeur des éprouvettes ainsi que du type de chargement appliqué.

La plupart des méthodes numériques nécessitent un calcul séparé du facteur d'intensité de contrainte pour chaque distribution de contrainte donnée et chaque longueur de fissure. La procédure de fonction de poids développée de Bückner [39] simplifie la détermination des facteurs d'intensité de contraintes. Si la fonction de poids est connue pour une fissure dans un composant, le facteur d'intensité de contrainte peut être obtenu en multipliant cette fonction par la répartition des contraintes et en l'intégrant tout le long de la fissure.

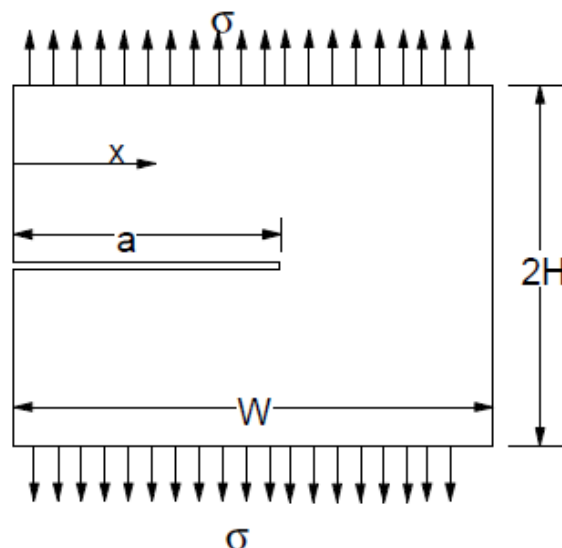
Si  $\sigma(x)$  est la distribution normale des contraintes et  $\tau(x)$  sont les contraintes de cisaillement dans le composant le long de la ligne de fissure potentielle d'une fissure de bord, les facteurs d'intensité de contrainte sont donné par

$$K_I = \int_0^a \sigma(x) h_I(x, a) dx \quad (10)$$

$$K_{II} = \int_0^a \tau(x) h_{II}(x, a) dx \quad (11)$$

L'intégration doit être effectuée sur la longueur de la fissure. La fonction de poids  $h(x,a)$  ne dépendent de la répartition spéciale des contraintes, mais uniquement de la géométrie du composant.

#### Facteur d'intensité de contraintes dans le cas d'une traction pure :



**Figure IV. 1:** Fissure superficielle dans une plaque rectangulaire chargée en traction pure

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} F_t \quad (12)$$

	H/W=1.5	1.25	1.00	0.75	0.5	0.4	0.3	0.25
$\alpha=0$	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215
0.1	1.0170	1.0172	1.0174	1.0182	1.0352	1.0649	1.1455	1.2431
0.2	0.9800	0.9799	0.9798	0.9877	1.0649	1.1625	1.3619	1.5358
0.3	0.9722	0.9723	0.9729	0.9840	1.0821	1.2134	1.4892	1.7225
0.4	0.9813	0.9813	0.9819	0.9915	1.0819	1.2106	1.5061	1.7819
0.5	0.9985	0.9986	0.9989	1.0055	1.0649	1.1667	1.4298	1.7013
0.6	1.0203	1.0203	1.0204	1.0221	1.0496	1.1073	1.2898	1.5061
0.7	1.0440	1.0441	1.0441	1.0442	1.0522	1.0691	1.1498	1.2685
0.8	1.0683	1.0683	1.0683	1.0690	1.0691	1.0734	1.0861	1.1201
1.0	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215

Tableau IV.1 : Fonction géométrique  $F_t.(1-a/w)^{3/2}$  [40]

Facteur d'intensité de contraintes dans le cas d'une flexion pure :

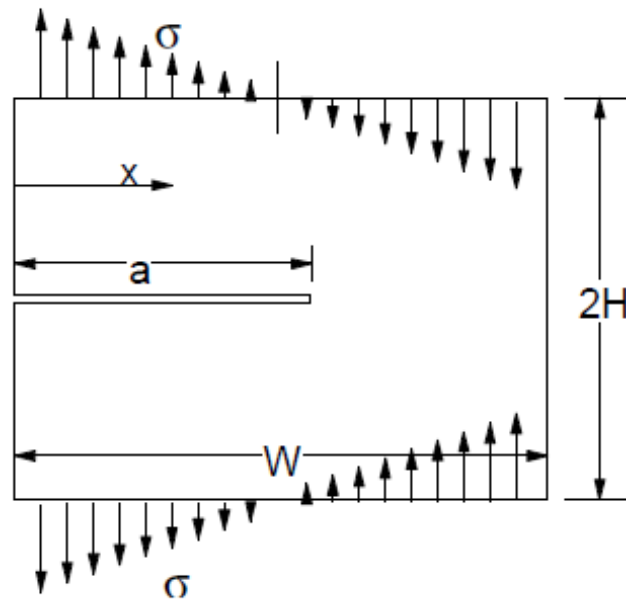


Figure IV. 2: Fissure superficielle dans une plaque rectangulaire chargée en flexion pure

$$\sigma(x) = \sigma_0(1 - 2x / W) \quad (13)$$

$$K = \sigma_0 \sqrt{\pi a} F_b \quad (14)$$

	$H/W=1.5$	1.25	1.00	0.75	0.5	0.4
$\alpha=0$	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215	1.1215
0.2	0.7561	0.7561	0.7562	0.7628	0.8279	0.9130
0.3	0.6583	0.6583	0.6589	0.6677	0.7444	0.8475
0.4	0.5861	0.5861	0.5865	0.5930	0.6567	0.7505
0.5	0.5293	0.5293	0.5296	0.5332	0.5717	0.6388
0.6	0.4842	0.4842	0.4842	0.4852	0.5022	0.5367
0.7	0.4481	0.4479	0.4478	0.4478	0.4514	0.4621
0.8	0.4203	0.4188	0.4191	0.4185	0.4180	0.4185
1.0	0.374	0.374	0.374	0.374	0.374	0.374

**Tableau IV.2 :** Fonction géométrique  $F_b.(1-a/w)^{3/2}$  [40]

### IV.3 PROPAGATION DES FISSURES DANS LES PLAQUES SOLAIRES (RESULTATS ET DISCUSSION):

Le modèle étudié dans cette application combine un critère de la mécanique de la rupture et une approche analytique en plus d'une modélisation répartie de la fissuration, menant à tenir compte de la singularité de champ de contraintes en pointe de la fissure en accompagnant le développement de la fissuration et le comportement à la rupture en considérant l'effet des paramètres géométriques. Cependant, l'analyse se base sur la détermination pour les deux modes de chargement I et II, les valeurs du facteur d'intensité de contraintes  $K_I$  et  $K_{II}$ .

Cette analyse s'appuie sur la détermination en calculant les valeurs des facteurs d'intensité de contraintes dans chaque cas à l'aide de l'approche analytique basée sur les fonctions poids pour évaluer les coefficients géométriques correspondants. Le calcul mathématique s'effectue à l'aide de Maple, pour l'étude paramétrique.

Les résultats de calcul analytique avec cette nouvelle approche sont comparés finalement avec ceux obtenus de la simulation numérique du modèle étudié à l'aide du code de calcul Abaqus.

**A. EVALUATION DES CONTRAINTES MAXIMALES :**

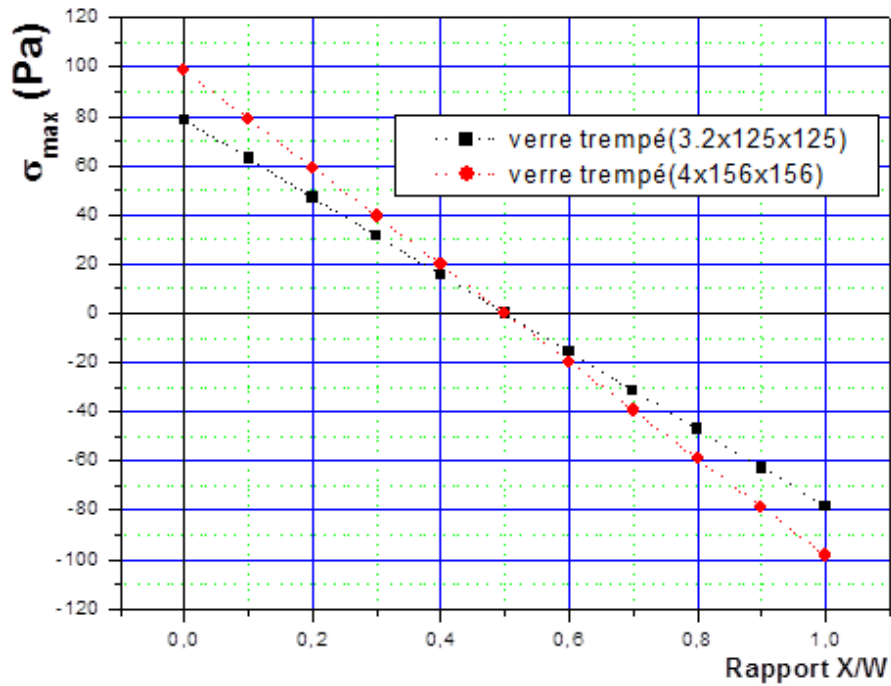


Figure IV.3: Les contraintes maximales en couche de verre

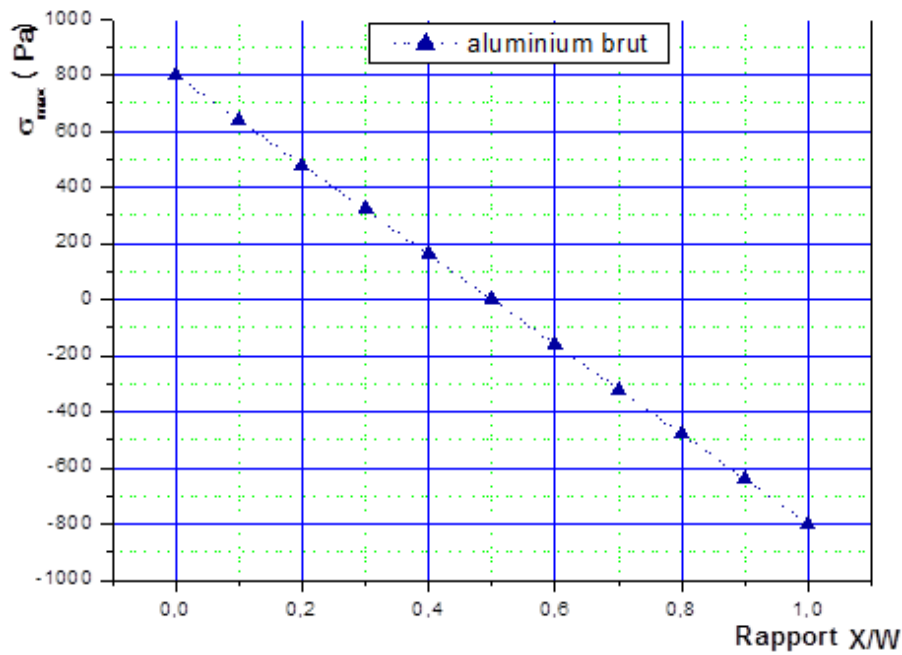


Figure IV.4: Les contraintes maximales en couche d'Aluminium

Les figures (IV.3) et (IV.4) représentent respectivement la variation du champ des contraintes appliquées sur la plaque en traction sur les différentes couches de contact de la plaque solaire.

La première plaque rectangulaire montrée en figure IV.3 représente la couche supérieure en verre avec les dimensions (3.2x125x125) mm et la deuxième plaque représente le cas où la couche supérieure en verre prendra les dimensions suivantes : (4x156x156) mm.

La dernière plaque montrée sur la figure IV.4 représente la couche de contact inférieure en aluminium avec les dimensions (3.2x125x125) mm.

## **B. ANALYSE DE LA PROPAGATION DES FISSURES DANS LES PLAQUES SOLAIRES :**

La relation entre le facteur d'intensité de contraintes et la taille de la fissure est conditionnée par le fonction  $f(a/w)$ .

La fonction  $f(a/w)$  : est un paramètre géométrique sans dimension appelé fonction complaisance ou facteur géométrique. Lorsque la structure est de dimension infinie [2] par rapport à la taille de la fissure,  $f(a/W)$  prend une valeur constante. A titre d'exemple, dans une plaque fissurée de dimension infinie et sollicitée en mode I,  $f(a/W) = 1$ .

Par contre dans notre cas où la taille de la fissure n'est plus négligeable par rapport à largeur de la structure, le facteur d'intensité des contraintes, calculé par éléments finis [2], où le calcul des facteurs géométriques  $f(a/w)$  est donné par des relations empiriques.

### **B.1 ETUDE PARAMETRIQUE :**

Concernant les cas proposés pour cette étude, trois modèles sont fournis dont les deux premiers représente la couche de contact supérieure en matière de verre mais de dimensions différentes. Le troisième modèle représente la couche inférieure de contact en matière d'Aluminium.

Les modèles considérés sont supposés entaillés, dont la pré-fissure prend une orientation suivant la direction transversale et orientation suivant la direction longitudinale

de la plaque. A cet effet, il y aura lieu d'examiner la variation des valeurs de facteurs d'intensité de contraintes selon les deux modes I et II.

### 1. Etude de la couche de contact supérieure « Couche de verre » du verre trempé :

Dans cette partie on présente les résultats de calcul analytique des valeurs des valeurs de facteurs d'intensité de contraintes pour les deux modèles de la plaque de verre.

#### ➤ Modèle n°01 : Dimensions (3.2x125x125) mm en cas de la fissure Longitudinale:

On considère que la plaque de verre, est entaillée en sa surface de largeur dont la fissure se propage longitudinalement, et sollicitée en traction pure et en cisaillement où les valeurs de facteurs d'intensité de contraintes sont calculées en mode I et en mode II.

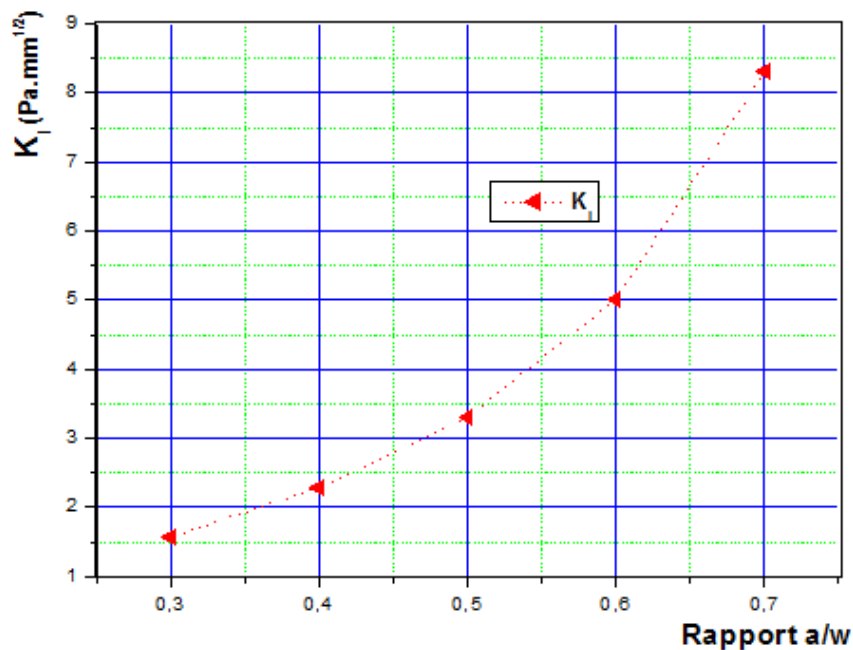


Figure IV.5 : Variation du FIC en fonction du rapport  $a/w$  en mode I « Traction pure »

La figure IV.5 représente la variation des valeurs de facteur d'intensité de contraintes, en mode I, en fonction de la taille de la fissure dont le rapport géométrique ( $a/w$ ) montre clairement sa proportionnalité où les valeurs de  $K_I$  augmentent considérablement avec l'accroissement de la longueur de la fissure.

La variation des valeurs du facteur d'intensité de contraintes, en mode II, en fonction de la taille de la fissure et par conséquent du rapport géométrique ( $a/w$ ) est montrée sur la figure IV.6.

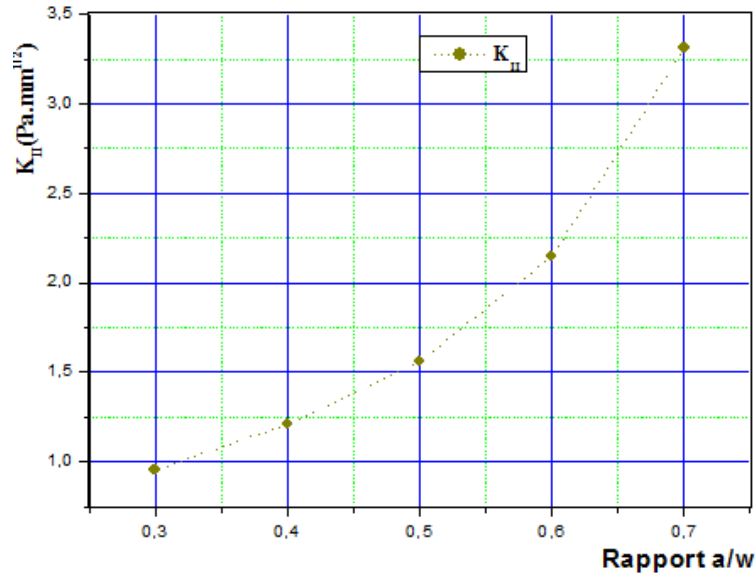


Figure IV.6 : Variation du FIC en fonction du rapport  $a/w$  en mode II « Cisaillement »

➤ **Modèle n°01 : Dimensions (3.2x125x125) mm en cas de la fissure Transversale:**

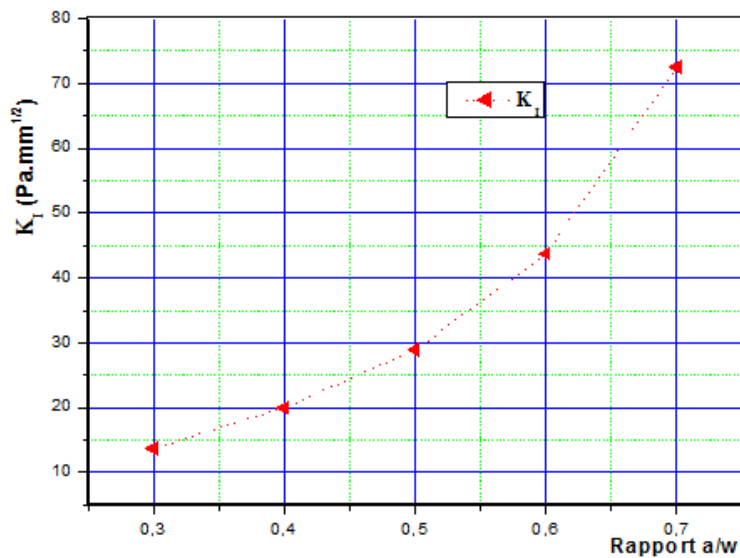


Figure IV.7: Variation du FIC en fonction du rapport  $a/w$  en mode I « Voilement »

La figure IV.7 représente la variation des valeurs d facteur d'intensité de contraintes, en mode I, en fonction du rapport ( $a/w$ ).



La plaque de verre est soumise à des efforts qui sont dus au voilement thermique sous l'effet de poids propre. Le mode de rupture considéré pour cette analyse est le mode I, comme l'entaille se trouve au niveau de l'épaisseur la plaque (en milieu) où la propagation des fissures prendra le sens transversal.

➤ **Modèle n°02 : Dimensions (4x156x156) mm en cas de la fissure Longitudinale:**

La fissure se propage longitudinalement dans la plaque de verre sollicitée en traction pure et en cisaillement où les valeurs de facteurs d'intensité de contraintes en mode I et en mode II sont représentées respectivement sur les figures IV.8 et IV.9.

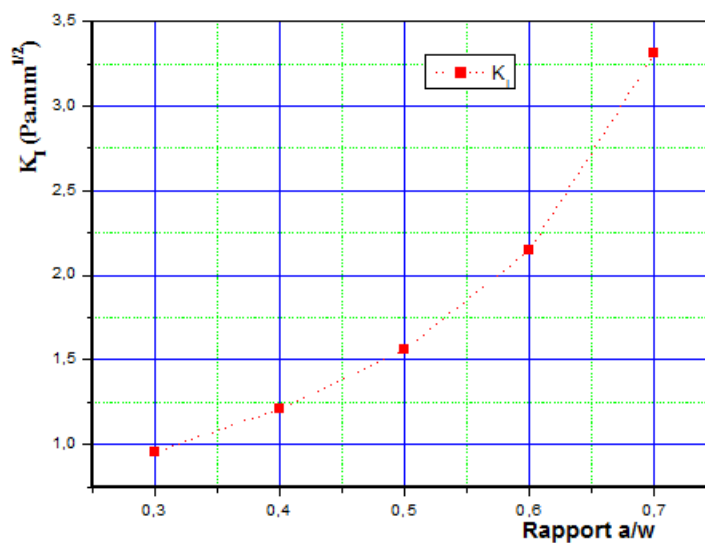


Figure IV.8 : Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I « Traction pure »

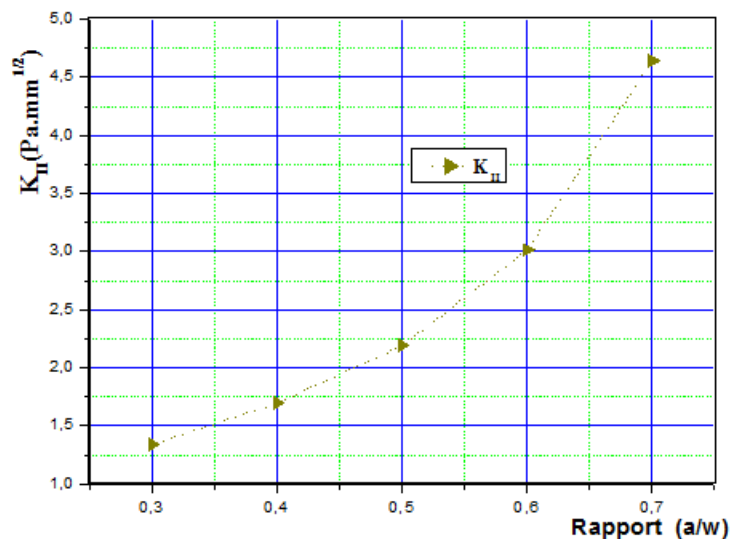


Figure IV.9 : Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode II « Cisaillement »

➤ **Modèle n°02 : Dimensions (4x156x156) mm en cas de la fissure Transversale:**

De même que dans le cas du modèle n°01, la plaque de verre est sollicitée en voilement thermique où seulement le mode I qui pris en compte dont la propagation des fissures prendra le sens transversal au niveau de l'épaisseur. La figure IV.10 représente la variation des valeurs d facteur d'intensité de contraintes en fonction du rapport (a/w).

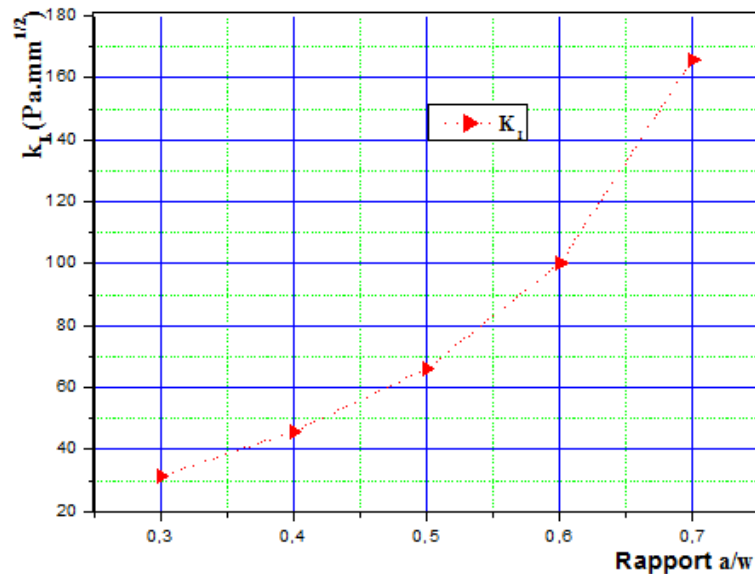


Figure IV.10: Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I « Voilement»

## 2. Etude de la couche de contact inférieure « Couche métallique » en Aluminium brut :

En second lieu, le modèle adopté pour cette étude, représente la couche inférieure du sandwich dont le matériau constituant est l'aluminium brut où la plaque est considérée géométriquement rectangulaire avec les dimensions (120x150x30) mm.

Le même principe de l'analyse des deux modèles précédents est maintenu pour cette étude comme l'orientation et la localisation de l'entaille ainsi les conditions de chargement.

En revanche, les propriétés mécaniques varient comme le matériau est différent dans ce cas (rigidité, limite élastique et contraintes maximales à la traction...etc).

Puisque la plaque est considérée rectangulaire, la projection de la fissure longitudinale est supposée en milieu du côté de la longueur (à 75mm).

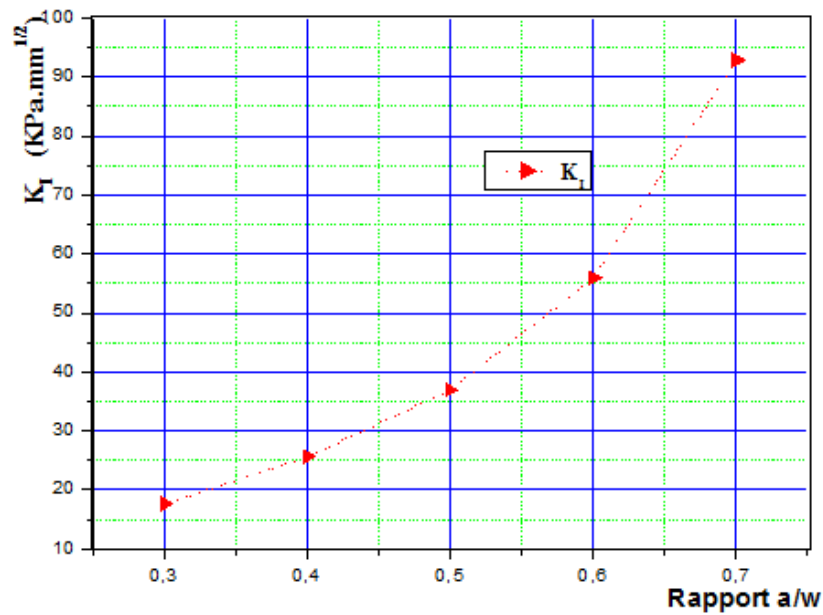


Figure IV.11 : Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I « Traction pure »

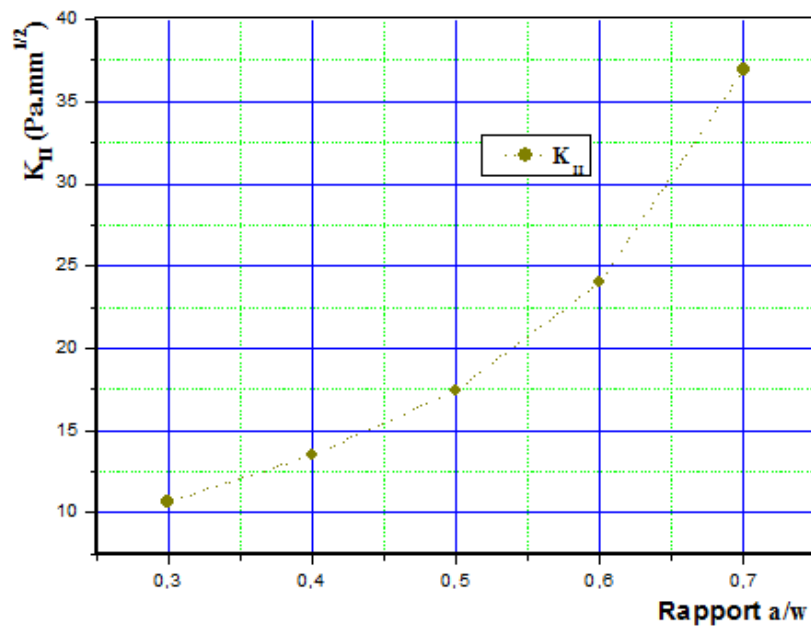


Figure IV.12: Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode II « Cisaillement »

La variation des valeurs du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la taille de la fissure longitudinale dans la plaque rectangulaire en Aluminium, selon le mode I et II est représentée respectivement sur les figures IV.11 et IV.12.

La figure IV.13 représente la variation des valeurs d facteur d'intensité de contraintes en fonction du rapport ( $a/w$ ) dans la plaque métallique sollicitée en voilement.

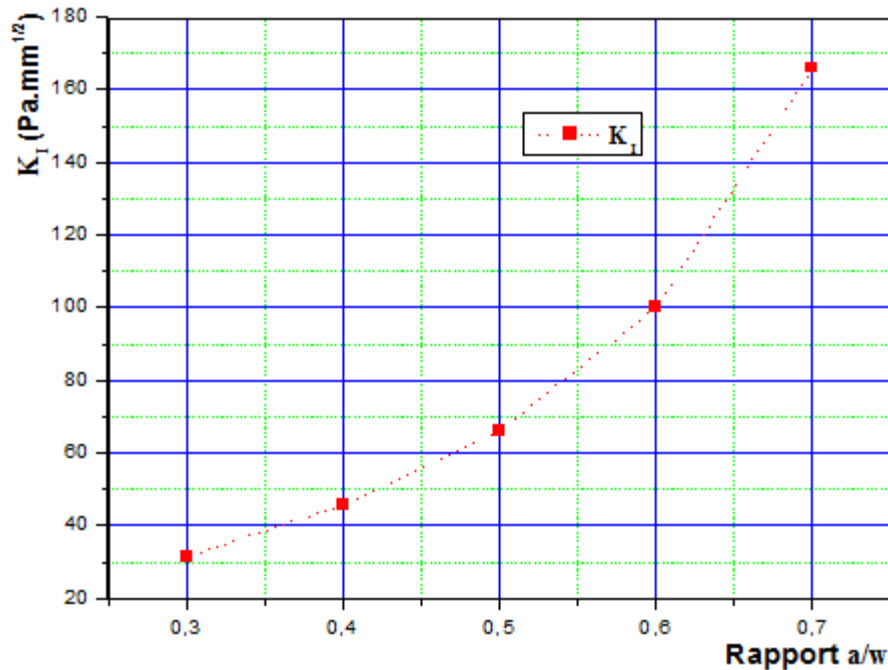


Figure IV.13: Variation du FIC en fonction du rapport  $a/w$  en mode I « Voilement »

L'analyse de la propagation des fissures dans les différents modèles étudiés dans cette étude paramétrique a dévoilé l'importance des paramètres géométrique, très particulièrement l'influence de la taille «  $a$  » de la fissure sur les fonctions de complaisance, et par conséquent sur l'évolution des facteurs d'intensité de contraintes.

Les valeurs de FIC montrées sur les dernières figures paraissent significatives et plus importantes en comparant avec celles figurées dans le cas de la plaque de verre. A cet effet, une étude comparative deviendra nécessaire pour conclure cette analyse.

## B.2 ETUDE COMPARATIVE

### ➤ Comparaison en mode I :

#### Chargement en Traction pure :

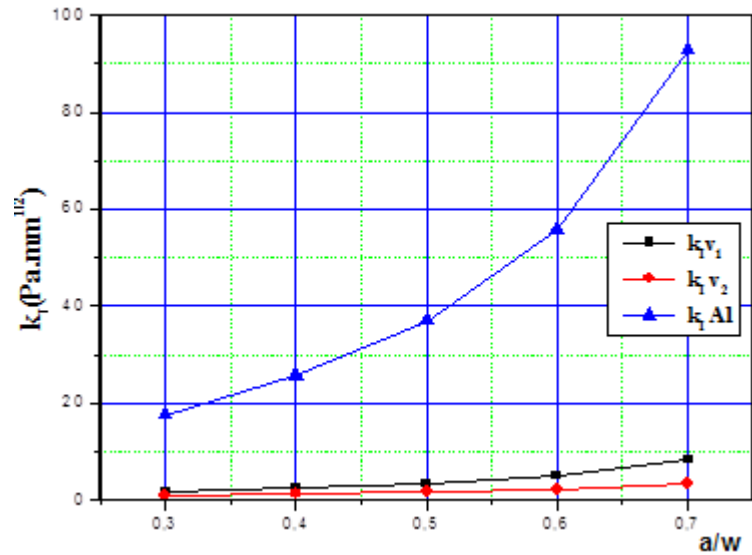


Figure IV.14: Comparaison des FIC en mode I « Traction pure»

#### Chargement en Voilement

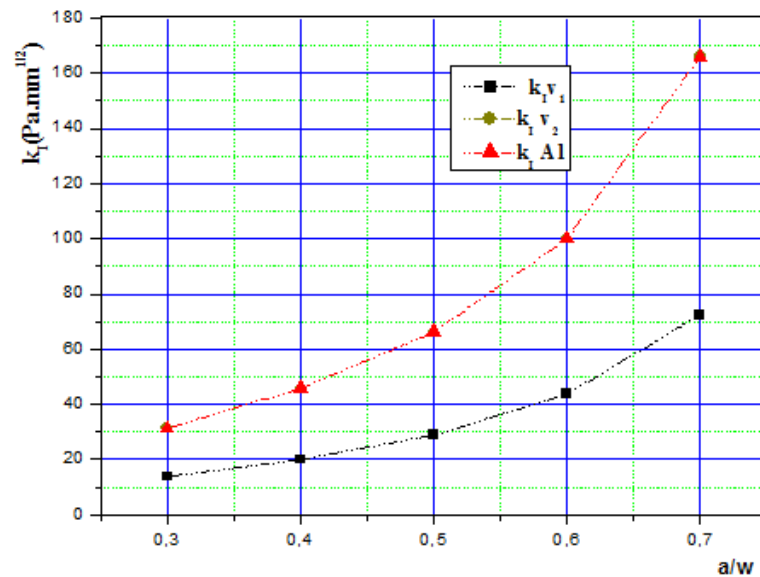


Figure IV.15: Comparaison des FIC en mode I « Voilement»

La comparaison des résultats en mode I des trois plaques étudiées selon les deux figures précédentes (figure IV.14 et IV.15), révèle que les valeurs des FIC les plus significatives sont celles liées à la plaque métallique dans les deux cas de chargement (traction pure et voilement thermique).

➤ **Comparaison en mode II :**

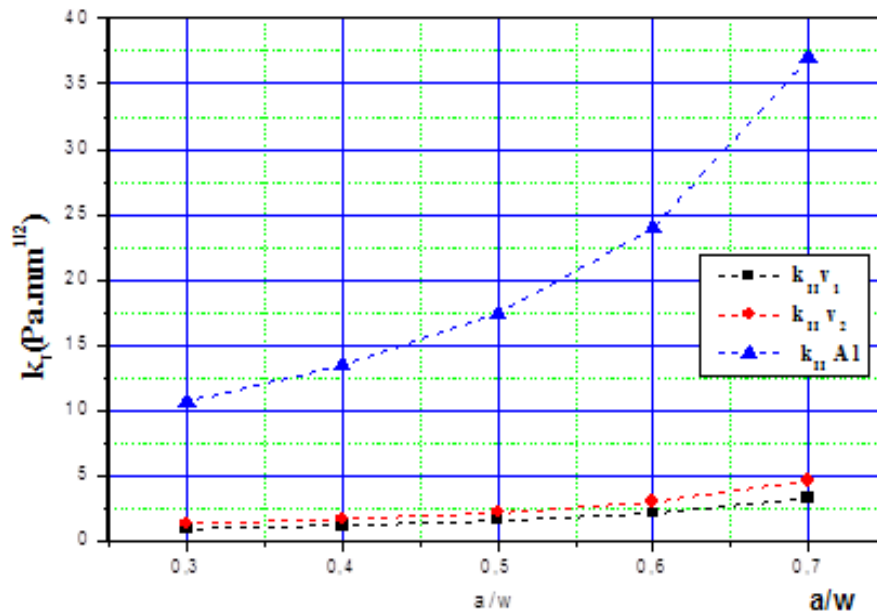


Figure IV.16: Comparaison des FIC en mode II « Cisaillement »

En observant les résultats représentés dans le graphe montré sur la figure ci-dessus, on peut dire également que selon le mode II les valeurs des FIC conjointes à la plaque métalliques sont les plus marquantes.

La propagation des fissures est plus importante en mode I et II, dans la couche de contact inférieure composé en Aluminium. D'après la nature du matériau, et grâce à sa ductilité aperçue dans cette analyse en comparaison avec les couches de verre, la possibilité de procéder des actions de maintenance préventive sera possible afin de faire cesser la propagation des fissures voire à éliminer la discontinuité dans le milieu.

### B.3 ANALYSE NUMERIQUE ET VALIDATION :

Un modèle de simulation numérique est envisagé, avant de clôturer cette étude, en vue de vérifier et valider les résultats analytiques issus de la présente recherche.

La concrétisation de ce modèle numérique s'est effectuée en «3D» à l'aide du logiciel Abaqus en utilisant la méthode des éléments finis et en partant des mêmes hypothèses de bases admises dans la méthode analytique où toutes les conditions géométriques et mécaniques sont maintenues.

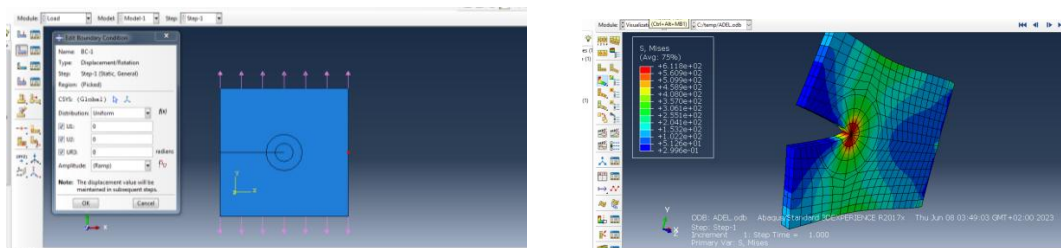


Figure IV.17: Présentation du modèle numérique

La figure IV.18, montrée ci-après, représente la comparaison des résultats de calcul analytique en utilisant notre méthode avec ceux obtenus numériquement.

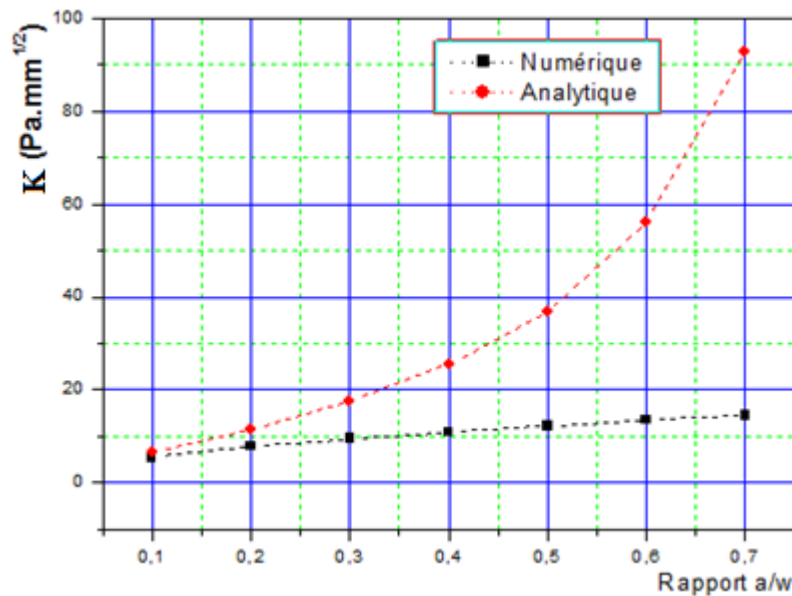


Figure IV.18: Comparaison et validation des résultats

Les valeurs de FIC observées paraient significatives et plus importantes en comparant avec celles obtenues numériquement.

En conclusion, on peut dire que l'examen des résultats confirme l'efficacité des fonctions de complaisance sur l'évolution des facteurs d'intensité de contraintes.

#### **IV.4 CONCLUSION**

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de maintenance préventive portant l'objet d'une auscultation des défauts préalablement détectés dans les couches de contact de la plaque solaire, où le phénomène de la propagation de fissure faisait le souci principal de cette démarche en estimant les valeurs caractéristiques de la ténacité des matériaux en question.

L'approche analytique utilisée pour cette estimation vient de confirmer et de corriger les méthodes classiques et de mettre en évidence l'importance de l'introduction des fonctions de poids dans la formulation du problème de calcul où les paramètres géométriques montrent leur influence significative dans l'évolution des valeurs des FIC.





**CONCLUSION  
GENERALE**

### 1. Conclusion

La cellule solaire, élément unitaire d'un module photovoltaïque, est aussi l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque. La connaissance de son comportement sous chargement mécanique et thermique nous aide à concevoir des modèles robustes avec une longue durée de vie.

La présente recherche est incluse dans le cadre d'une maintenance préventive afin de pallier la prédiction du phénomène de rupture dans le matériau composites constituant le système solaire.

A ce titre, on a fait une étude analytique sur le comportement mécanique des cellules CdTe, face au phénomène de la propagation des fissures d'origine mécanique, amorcées suite à l'effet du voilement thermique au niveau des couches de contact de la plaque solaire.

L'analyse effectuée est basée principalement sur les critères de mécanique de la rupture en calculant les valeurs des facteurs d'intensité de contraintes à l'aide d'une approche fondée sur les fonctions poids et évaluer les coefficients géométriques correspondants. Une étude paramétrique suivie d'une autre étude comparatives ont été nécessaires pour valider les résultats.

Les principales conclusions de la présente étude peuvent être résumées comme suit:

- La prise en compte des paramètres géométriques montrent leur influence significative sur la variation des valeurs des FIC.
- L'implication des fonctions de complaisance dans la formulation du problème a donné plus de précision dans le calcul.
- L'approche analytique utilisée a montré sa fiabilité pour la prédiction de l'évolution du facteur d'intensité de contraintes en comparant avec les méthodes classiques.

### 2. Perspectives à la recherche

Afin de compléter les résultats obtenus et de mieux cerner les conclusions acquises à partir de cette recherche, on peut proposer aussi d'autres travaux de recherches dans le cadre du même contexte, à titre d'exemple:

- Aborder des travaux de recherches opérationnelles afin de minimiser l'impact de désordres.
- Optimiser des solutions fiables pour la restauration de systèmes déformés.
- Etudier la faisabilité de procéder une réparation in-situ à des échelles variées...etc

En perspective, nous envisageons aussi dans la partie analytique, de faire d'autres comparaisons en utilisant d'autres matériaux –ex : Stratifié, FGM etc.- afin de mieux valider notre fonction proposée.

Les motivations et les intérêts de ces travaux nécessitent une étude expérimentale pour que le choix des différentes approches et des paramètres soit concret donnant ainsi une illusion aux chercheurs d'entamer de nouvelles études.