

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERRI - TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master
En Génie Mécanique
Option Energétique

Intitulé du Sujet

**Contraintes Thermiques développées dans
un Panneau Solaire Photovoltaïque.**

Proposé et dirigé par :

Pr. A. OUIBRAHIM

Etudié par :

CHEMLAL Anouar

Promotion 2011

Dédicaces :

Je dédie ce travail à :

- Ø Mes parents.
- Ø Mon frère aîné et sa fiancée.
- Ø Ma sœur et à sa famille.
- Ø Mon petit frère.
- Ø Petit poussin « Mehdi ».
- Ø Mes tantes et oncles.
- Ø Mes amis.

Remerciements :

Je remercie tout d'abord Allah de m'avoir donné la force et la patience pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier vivement Monsieur A.OUIBRAHIM, Professeur à l'Université Mouloud MAMMERY, pour le projet qu'il a proposé, pour avoir accepté la charge d'encadreur et pour ses conseils et orientations.

Que Monsieur le président et Messieurs les membres de jury soient remerciés d'avoir accepté d'examiner ce travail.

J'associe également à ces remerciements l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation universitaire à l'université Mouloud MAMMERY.

Je remercie également toute ma promotion, mes collègues et mes amis pour leur bonne humeur.

Enfin, mes derniers remerciements vont à ma famille, sans laquelle je ne serai jamais arrivé là aujourd'hui.

Résumé :

Dans ce mémoire, on s'intéresse au problème des contraintes thermiques développées dans la structure du panneau solaire photovoltaïque soumis à la radiation solaire tout au long de son fonctionnement.

Dans ce travail, on reprend avec détail un modèle analytique unidimensionnel permettant de trouver la distribution des contraintes thermiques sur la structure du panneau solaire photovoltaïque. Ensuite, on étudie l'effet de la température et des propriétés élastiques des matériaux constitutifs du panneau solaire sur l'évolution des contraintes thermiques en utilisant la méthode analytique établie.

Enfin, les courbes des contraintes thermiques normales et tangentielles obtenus par voie analytique sont comparées à celles fournies par la simulation numérique.

Mots clés : Contraintes thermiques, Panneau solaire, Photovoltaïque, Comsol.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre 1

Aperçu sur les Travaux scientifiques concernant les panneaux solaires photovoltaïques

| | |
|--|----|
| I.1 Introduction | 14 |
| I.2 Modèle analytique de la distribution des contraintes thermiques sur une structure multicouche soumise à un champ de température | 15 |
| I.3 Effet de l'aspect géométrique sur les contraintes thermiques développées dans un panneau solaire soumis à un champ de température | 17 |
| I.4 Effet du coefficient de dilatation thermique de chacun des matériaux sur les contraintes thermiques développées dans un panneau solaire soumis à un champ de température | 18 |
| I.5 Evaluation expérimentale et cartographie des déformations induites par les contraintes thermiques sur un panneau photovoltaïque | 19 |
| I.6 Contraintes thermiques et effet de rupture dans le vitrage solaire absorptive | 20 |

Chapitre 2

Energie Solaire et Applications

| | |
|--|----|
| II.1 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire | 22 |
| II.1.1 Unités utilisées | 22 |
| II.1.2 Source du rayonnement solaire-constante solaire | 22 |
| II.1.3 Mouvement apparent du soleil | 23 |
| II.1.4 Rayonnement solaire au sol | 24 |
| II.2 Applications | 26 |
| II.2.1 Panneau solaire photovoltaïque | 26 |
| II.2.1.1 Constitution des modules (panneaux) photovoltaïques | 26 |
| II.2.1.1.1 Assemblage | 26 |
| II.2.1.1.2 Description des composants du panneau photovoltaïque | 27 |
| II.2.1.1.3 Connexions entre photopiles (cellules) | 29 |
| II.2.1.2 Principe de la conversion photovoltaïque (effet photovoltaïque) | 29 |

| | |
|--|----|
| II.2.1.2.1 Historique | 29 |
| II.2.1.2.2 Rappels (structure de la matière) | 30 |
| II.2.1.2.3 Semi-conducteurs | 31 |
| a) Semi-conducteur intrinsèque | 32 |
| b) Semi-conducteur extrinsèque | 32 |
| c) Dopage des semi-conducteurs | 32 |
| II.2.1.2.4 La cellule photovoltaïque | 33 |
| a) Description d'une cellule photovoltaïque | 33 |
| b) Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque | 34 |
| c) Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque | 35 |
| c-1) Le rendement d'une cellule photovoltaïque | 35 |
| c-2) Pertes fondamentales | 35 |
| c-3) Pertes technologiques | 36 |
| d) La courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque | 37 |
| d-1) La puissance caractéristique d'une cellule photovoltaïque | 38 |
| d-2) La puissance crête d'une cellule photovoltaïque | 38 |
| d-3) L'influence de l'éclairement sur le rendement | 38 |
| d-4) L'influence de la température sur le rendement | 39 |
| e) L'influence de la température sur la structure | 39 |
| f) Montage des cellules photovoltaïques | 39 |
| f-1) Montage en série | 40 |
| f-2) Montage en parallèle | 40 |
| II.2.1.3 Paramètres influant sur le panneau photovoltaïque | 40 |
| II.2.1.3.1 Influence de l'orientation et de l'inclinaison | 40 |
| II.2.1.4 Technologies des modules photovoltaïques | 41 |
| II.2.1.4.1 Cellules et modules au silicium cristallin | 41 |
| II.2.1.4.2 Cellules et modules en couche mince | 41 |
| II.2.1.4.3 Cellules organiques | 42 |
| II.2.2 Panneau solaire thermique | 44 |
| II.2.2.1 Principes | 44 |
| II.2.2.2 Capteur sans vitrage | 45 |
| II.2.2.3 Capteur sous vide | 46 |
| a) Tubes sous vide à flux direct | 46 |
| b) Tubes sous vide à caloduc | 46 |
| II.2.2.4 Capteur vitré | 47 |
| a) Coffre | 47 |
| b) Isolation thermique | 48 |
| c) Absorbeur | 48 |
| d) Couverture transparente | 49 |

| | |
|----------------------------------|----|
| II.2.2.5 Rendements des capteurs | 50 |
|----------------------------------|----|

Chapitre 3

Formulation du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

| | |
|--|----|
| III.1 Equations associées au problème posé | 53 |
| III.2 Hypothèses possibles | 54 |
| III.3 Etablissement de la méthode analytique | 55 |
| III.3.1 Objet d'étude | 55 |
| III.3.2 Equations du problème | 55 |
| III.3.3 Equation finale | 58 |

Chapitre 4

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

| | |
|---|----|
| IV.1 Résolution semi-analytique | 60 |
| IV.2 Programme « MATLAB » permettant de tracer les courbes des contraintes thermiques normales et tangentielles déterminées analytiquement | 63 |
| IV.3 L'effet de la température de la structure du panneau solaire photovoltaïque sur l'évolution des contraintes thermiques | 66 |
| IV.4 Analyse des résultats analytiques | 77 |
| IV.5 Etude de l'effet de la propriété élastique du matériau sur les contraintes thermiques maximales développées dans le panneau solaire PV étudié | 79 |
| IV.5.1 Influence des propriétés élastiques de chaque matériau du panneau ($E_{i(1,2 \text{ et } 3)}$ et $G_{cj(1 \text{ et } 2)}$) sur la valeur de la contrainte thermique normale maximale de chacun des matériaux collés $\sigma_{xx(i)max}$ | 79 |
| IV.5.2 Influence des propriétés élastiques de chaque matériau du panneau ($E_{i(1,2 \text{ et } 3)}$ et $G_{cj(1 \text{ et } 2)}$) sur la valeur de la contrainte thermique tangentielle maximale de chacune des couches de liaison $\tau_{xy(j)max}$ | 82 |
| IV.6 Simulation numérique | 85 |
| IV.6.1 Simulation sous COMSOL | 86 |
| IV.6.1.a) Modélisation de la structure | 87 |
| IV.6.1.b) Conditions aux limites | 87 |

| | |
|--|----|
| IV.6.2 Superposition des courbes $\sigma_{xx(i)}$ et $\tau_{xy(j)}$ obtenus suivant la méthode analytique et numérique | 89 |
| IV.6.3 Interprétation des résultats | 91 |
| Conclusion générale | 93 |
| Références bibliographiques | |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure (II-1) : Mouvement de la terre par rapport au soleil | 22 |
| Figure (II-2) : Portion du flux solaire arrivant à la surface externe de la couche atmosphérique | 23 |
| Figure (II-3) : Mouvement apparent du soleil | 23 |
| Figure (II-4): Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émise par le soleil, notion de la convention AM | 24 |
| Figure (II-5) : Spectres solaire relevés selon la convention AM | 25 |

| | |
|--|----|
| Figure (II-6): Schéma éclaté d'un module de type « mono-verre » | 26 |
| Figure (II-7) : Schéma d'illustration d'assemblage d'éléments constitutifs d'un panneau solaire photovoltaïque | 27 |
| Figure (II-8) : Les spectres de transmission et de réflexion du verre et de l'EVA | 28 |
| Figure (II-9) : Connexion des cellules photovoltaïques | 29 |
| Figure (II-10): Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie | 32 |
| Figure (II-11) : Schéma d'illustration (cellule photovoltaïque) | 33 |
| Figure (II-12) : Une courbe de tension-courant d'une cellule éclairée à 1000w/m^2 et à une température de 25°c | 36 |
| Figure (II -13) : La technologie de la cellule photovoltaïque | 37 |
| Figure (II-14) : Courbe I(V) à $T=25$ et un éclairage de 1000W/m^2 | 37 |
| Figure (II-15) : Influence de l'éclairage sur le rendement de la cellule PV | 38 |
| Figure (II-16) : L'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de jonction de la cellule PV | 39 |
| Figure (II-17) Groupement des cellules photovoltaïques en série | 40 |
| Figure (II-18) Groupement des cellules photovoltaïques en parallèle | 40 |
| Figure (II-19) : Le schéma de principe d'une cellule à base de silicium cristallin | 41 |
| Figure (II-20) : Le schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe et comparaison à une cellule à base de silicium cristallin | 42 |
| Figure (II-21) : Le schéma de principe d'une cellule à base de CIGS | 42 |
| Figure (II-22) : Le schéma de principe d'une cellule PV de type organique | 43 |
| Figure (II-23) : L'utilisation de l'énergie solaire par le capteur thermique | 44 |
| Figure (II-24) : Principe de fonctionnement d'un capteur thermique | 45 |
| Figure (II-25) : Schéma de principe d'un capteur sans vitrage | 45 |
| Figure (II-26) : Schéma de principe d'un capteur sous vide | 46 |
| Figure (II-27) : Schéma de principe d'un capteur vitré | 47 |
| Figure (II-28) : Schéma de principe de la partie « absorbeur » d'un capteur vitré | 48 |
| Figure (II-29) : Schéma de principe de fonctionnement de la partie « absorbeur » d'un capteur vitré | 49 |
| Figure (II-30) : Schéma de principe de la partie « couverture transparente » d'un capteur vitré | 50 |
| Figure (II-31) : Courbe caractéristique de chaque type de capteur thermique | 51 |

| | |
|---|----|
| Figure (III-1) : Structure du panneau solaire photovoltaïque à étudier | 53 |
| Figure (III-2) : Schéma de profil de la structure du panneau solaire photovoltaïque | 55 |
| Figure (III-3a) Avant déformation ; forces appliquées sur la structure du panneau solaire PV | 56 |
| Figure (III-3b) Après déformation ; forces (par unité de largeur) appliquées sur l'élément (dx) de la structure | 56 |
| Figure (IV-1a): Evolution des contraintes normales suivant la longueur de la structure (axe x) $\sigma_{xx(1)}$ du film polyamide en fonction de la température du panneau solaire | 66 |
| Figure (IV-1b) : Variation de la contrainte normale à x=20mm (maximale) et x=5mm du polyamide en fonction de la température instantanée du panneau solaire de longueur L=40mm | 67 |
| Figure (IV-2a) : Evolution des contraintes normales suivant la longueur de la structure (axe x) $\sigma_{xx(3)}$ du verre en fonction de la température du panneau solaire | 69 |
| Figure (IV-2b): Variation de la contrainte normale à x=20mm (maximale) et x=5mm du verre en fonction de la température instantanée du panneau solaire de longueur L=40mm | 70 |
| Figure (IV-3a) : Evolution des contraintes normales suivant la longueur de la structure (axe x) $\sigma_{xx(2)}$ du silicium en fonction de la température du panneau solaire | 71 |
| Figure (IV-3b): Variation de la contrainte normale à x=20mm (maximale) et x=5mm du silicium en fonction de la température instantanée du panneau solaire de longueur L=40mm | 72 |
| Figure (IV-4a): Evolution des contraintes tangentielles suivant la longueur de la structure (axe x) $\tau_{xy(1)}$ du caoutchouc en silicium1 en fonction de la température du panneau solaire | 73 |
| Figure (IV-4b): Variation de la contrainte tangentielle à x=20mm (maximale) et à x=5mm du caoutchouc en silicium1 en fonction de la température instantanée du panneau solaire | 74 |
| Figure (IV-5a) : Evolution des contraintes tangentielles suivant la longueur de la structure (axe x) $\tau_{xy(2)}$ du caoutchouc en silicium2 en fonction de la température du panneau solaire | 75 |
| Figure (IV-5b): Variation de la contrainte tangentielle à x=20mm (maximale) et à x=5mm du caoutchouc en silicium2 en fonction de la température instantanée du panneau solaire | 76 |
| Fig. (IV-6) : Relation entre la contrainte normale maximale dans chaque couche (film polyamide, cellule solaire et la couverture de verre) et le module d'élasticité de chacun de ces différents matériaux :(1) polyamide, (2) silicium, (3) verre | 81 |
| Fig. (IV-7): Relation entre la contrainte normale maximale dans chaque couche (film polyamide, cellule solaire et la couverture de verre) et le module de cisaillement de chacune des couches de liaison ((4) caoutchouc en silicium1 et (5) caoutchouc en silicium2) | 81 |
| Fig. (IV-8) : Relation entre la contrainte tangentielle maximale dans chacune des couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et2) et le module d'élasticité de chacun de ces différents matériaux :(1) polyamide, (2) silicium, (3) verre | 84 |

| | |
|--|----|
| Fig. (IV-9) : Relation entre la contrainte tangentielle maximale dans chacune des couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et 2) et le module de cisaillement de chacune des couches de liaison ((4) caoutchouc en silicium1 et (5) caoutchouc en silicium2) | 84 |
| Figure (IV-10) : Navigateur de modèles | 86 |
| Figure (IV-11) : La géométrie maillée de la face de profil (épaisseur, longueur) de la structure du panneau solaire photovoltaïque étudié | 87 |
| Figure (IV-12) : Spécification des propriétés du matériau (polyamide) | 87 |
| Figure (IV-13) : Chargement sur la structure du panneau solaire PV étudié | 88 |
| Figure (IV-14) : Condition de contrainte sur la structure du panneau solaire PV étudié | 88 |
| Figure (IV-15) : Superposition de la courbe $\sigma_{xx(1)}(x)$ analytique avec la courbe donnée par la solution numérique | 89 |
| Figure (IV-16) : Superposition de la courbe $\sigma_{xx(2)}(x)$ analytique avec la courbe donnée par la solution numérique | 89 |
| Figure (IV-17) : Superposition de la courbe $\sigma_{xx(3)}(x)$ analytique avec la courbe donnée par la solution numérique | 90 |
| Figure (IV-18) : Superposition de la courbe $\tau_{xy(1)}(x)$ analytique avec la courbe donnée par la solution numérique | 90 |
| Figure (IV-19) : Superposition de la courbe $\tau_{xy(2)}(x)$ analytique avec la courbe donnée par la solution numérique | 91 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau (II-1) : Unités utilisées dans le rayonnement solaire | 22 |
| Tableau (II-2): Propriétés de l'EVA (couche de liaison dans le panneau solaire photovoltaïque) | 28 |
| Tableau (II.3) : Définitions des paramètres intervenants dans le calcul du rendement d'un capteur solaire thermique | 50 |
| Tableau (IV.1) : Tableau des données ($\sigma_{xx(1)}, \Delta T$), la contrainte normale du polyamide en fonction de la température instantanée du panneau solaire, $T_0=0^\circ\text{C}$ | 67 |
| Tableau (IV.2) : Tableau des données ($\sigma_{xx(3)}, \Delta T$), la contrainte normale du verre en fonction de la température instantanée du panneau solaire, $T_0=0^\circ\text{C}$ | 69 |
| Tableau (IV.3) : Tableau des données ($\sigma_{xx(2)}, \Delta T$), la contrainte normale du silicium en fonction de la température instantanée du panneau solaire, $T_0=0^\circ\text{C}$ | 71 |

| | |
|--|----|
| Tableau (IV.4) : Tableau des données ($\tau_{xy(1)}, \Delta T$), la contrainte tangentielle du caoutchouc en silicium1 en fonction de la température instantanée du panneau solaire, $T_0=0^\circ\text{C}$ | 73 |
| Tableau (IV.5) : Tableau des données ($\tau_{xy(2)}, \Delta T$), la contrainte tangentielle du caoutchouc en silicium2 en fonction de la température instantanée du panneau solaire, $T_0=0^\circ\text{C}$ | 75 |
| Tableau (IV.6) : Tableau des données ($\sigma_{xx(i)\max}(E_1)$), la contrainte normale maximale de chacun des matériaux constitutifs du panneau solaire PV, à savoir le verre, le silicium et le polyamide en fonction du module d'élasticité du polyamide | 79 |
| Tableau (IV.7) : Tableau des données ($\sigma_{xx(i)\max}(E_2)$), la contrainte normale maximale de chacun des matériaux constitutifs du panneau solaire PV, à savoir le verre, le silicium et le polyamide en fonction du module d'élasticité du silicium | 79 |
| Tableau (IV.8) : Tableau des données ($\sigma_{xx(i)\max}(E_3)$), la contrainte normale maximale de chacun des matériaux constitutifs du panneau solaire PV, à savoir le verre, le silicium et le polyamide en fonction du module d'élasticité du verre | 80 |
| Tableau (IV.9) : Tableau des données ($\sigma_{xx(i)\max}(G_{c1})$), la contrainte normale maximale de chacun des matériaux constitutifs du panneau solaire PV, à savoir le verre, le silicium et le polyamide en fonction du module de cisaillement du caoutchouc en silicium1 | 80 |
| Tableau (IV.10) : Tableau des données ($\sigma_{xx(i)\max}(G_{c2})$), la contrainte normale maximale de chacun des matériaux constitutifs du panneau solaire PV, à savoir le verre, le silicium et le polyamide en fonction du module de cisaillement du caoutchouc en silicium2 | 80 |
| Tableau (IV.11) : Tableau des données ($\tau_{xy(j)\max}(E_1)$), la contrainte tangentielle maximale de chacune des couches de liaison du panneau solaire PV, à savoir le caoutchouc en silicium1 et 2 en fonction du module d'élasticité du polyamide | 82 |
| Tableau (IV.12) : Tableau des données ($\tau_{xy(j)\max}(E_2)$), la contrainte tangentielle maximale de chacune des couches de liaison du panneau solaire PV, à savoir le caoutchouc en silicium1 et 2 en fonction du module d'élasticité du silicium | 83 |
| Tableau (IV.13) : Tableau des données ($\tau_{xy(j)\max}(E_3)$), la contrainte tangentielle maximale de chacune des couches de liaison du panneau solaire PV, à savoir le caoutchouc en silicium1 et 2 en fonction du module d'élasticité du verre | 83 |
| Tableau (IV.14) : Tableau des données ($\tau_{xy(j)\max}(G_{c1})$), la contrainte tangentielle maximale de chacune des couches de liaison du panneau solaire PV, à savoir le caoutchouc en silicium1 et 2 en fonction du module de cisaillement du caoutchouc en silicium1 | 83 |
| Tableau (IV.15) : Tableau des données ($\tau_{xy(j)\max}(G_{c2})$), la contrainte tangentielle maximale de chacune des couches de liaison du panneau solaire PV, à savoir le caoutchouc en silicium1 et 2 en fonction du module de cisaillement du caoutchouc en silicium2 | 83 |

Tableau (IV.16) : Caractéristiques géométriques et thermo élastiques des matériaux constitutifs du panneau solaire photovoltaïque considérée

86

Introduction Générale

En raison des développements industriels, du transport terrestre, maritime et aérien, la croissance de la consommation mondiale d'électricité est en constante augmentation depuis ces dernières décennies. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables (pétrole, gaz, charbon et nucléaire), particulièrement les hydrocarbures dont les délais d'épuisement sont estimés encore pour quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant et néfaste à l'environnement. Il y a : « émission de gaz à effet de serre, danger radioactif et déchets encombrants ».

Le développement des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est vraiment d'actualité pour des raisons économiques et écologiques.

Parmi les sources d'énergies renouvelables figure le solaire. Cette source d'énergie est abondante voire inépuisable. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 w/m^2 .

Selon son type de conversion (transformation) on distingue :

- Energie solaire thermique qui sert à transformer l'énergie lumineuse en énergie calorifique (chaleur).
- Energie solaire photovoltaïque qui sert à générer de l'électricité à partir du rayonnement solaire. Cette dernière nécessite des équipements qui englobent entre autres, le panneau solaire photovoltaïque constitué essentiellement d'un assemblage de cellules photovoltaïques.

A fin de répondre à la croissance de la consommation énergétique, la recherche dans le domaine photovoltaïque s'oriente sur deux axes essentiels qui peuvent sembler opposés : augmenter le rendement des cellules, tout en diminuant le coût de production.

Dans cette optique, on peut dire que malgré l'abondance de l'énergie solaire et sa disponibilité dans chaque endroit du globe terrestre, le dispositif consacré à son extraction et à sa conversion en énergie utile (électricité) reste à améliorer et à perfectionner en vue d'augmenter le rendement et baisser le coût.

Du point de vue économique, la fiabilité et la durée de vie de l'installation photovoltaïque suscitent un grand intérêt. En dépit du bon rendement énergétique, la longévité de la structure du panneau photovoltaïque peut être compromise à cause des contraintes thermiques engendrées par la forte radiation solaire. L'étude de ces contraintes est indispensable pour identifier les zones les plus sollicitées dans la structure qui peuvent être améliorées afin d'éviter sa détérioration et augmenter ainsi sa durée de vie.

Dans ce mémoire, structuré en quatre chapitres, on s'est intéressé essentiellement à l'étude des contraintes thermiques développées dans un panneau solaire photovoltaïque. Le premier chapitre regroupe quelques travaux scientifiques concernant la détermination analytique ou expérimentale de ces contraintes provoquées par l'effet thermique dans la structure du panneau solaire. Nous nous sommes ensuite intéressés à l'étude de l'influence des paramètres géométriques et des propriétés thermo élastiques des matériaux constituant le panneau sur la distribution et valeurs de ces contraintes. Le deuxième chapitre s'intéresse à l'énergie solaire à travers les notions du rayonnement solaire et des équipements de base

impliqués dans la procédure de production énergétique que permet le solaire, à savoir les capteurs (thermiques et photovoltaïques). Dans ce chapitre, on a abordé d'avantage les techniques du panneau photovoltaïque parce que faisant l'objet de notre travail. Au troisième chapitre, on s'est intéressé à la formulation du problème et à l'établissement des équations correspondantes permettant de calculer ces contraintes thermiques.

Enfin au quatrième chapitre, une résolution analytique des équations établies précédemment a été présentée pour permettre de solutionner ces équations. Nous nous sommes ensuite intéressés à l'étude de l'influence de la température et de la propriété élastique des matériaux constituant le panneau sur la distribution et valeurs de ces contraintes. Par ailleurs nous avons utilisé aussi la résolution numérique en faisant appel à une méthode numérique que permet un logiciel adapté (Comsol). Enfin une étude comparative entre les deux types de résolutions a été considérée.

Chapitre I

Aperçu sur les travaux scientifiques
concernant les panneaux solaires
photovoltaïques

Chapitre 1

Aperçu sur les travaux scientifiques concernant les panneaux solaires photovoltaïques

I.1 Introduction

La technologie des structures multicouche est caractérisée par une simple opération, coller des matériaux de même nature ou dissemblables. Ce type de structure sandwich est utilisée dans plusieurs domaines tels que l'industrie AUTO, l'aviation aérospatiale, fabrication des machines frigorifiques ...etc. Pour le cas du panneau solaire photovoltaïque, plusieurs cellules en silicium sont connectées entre elles. Un matériau tel que (l'EVA ou Caoutchouc en silicium) a été choisi comme adhésif (couche de liaison) entre la puce en silicium (ensemble de cellules), une couverture de verre et une couche d'isolation et de protection formant ainsi la structure du panneau.

L'installation des panneaux solaires photovoltaïques prend de l'ampleur à travers le monde, particulièrement dans les pays où le taux d'ensoleillement annuel est élevé. Ce type d'installation constitue également l'alimentation énergétique idéale pour la station spatiale. D'où l'amélioration et le perfectionnement du dispositif photovoltaïque en terme du rendement énergétique reste d'actualité afin d'assurer un moyen d'alimentation efficace et durable en matière d'énergie. Comme option prometteuse qui s'oriente vers cet objectif, l'amélioration de la performance du panneau photovoltaïque au moyen d'une concentration d'illumination incidente sur les cellules solaires mais cela mène en contrepartie à une élévation considérable de la température du panneau. Pour le secteur spatiale, les satellites et stations spatiales éprouveront les effets de la radiation solaire et le froid profond, qui fait passer la température sur la structure de -180°C à 120°C .

Suite aux larges variations de températures que subit la structure du panneau solaire photovoltaïque, des contraintes thermiques seront formées. Ces contraintes sont très importantes en raison de grandes différences entre les propriétés thermo élastiques des matériaux constitutifs du panneau photovoltaïque. Du coup, la sécurité de la structure peut être atteinte.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques travaux où la distribution des contraintes thermiques dans les panneaux solaires photovoltaïques sous le champ de température a été examinée. L'étude de ces contraintes (ou déformations) est faite suivant deux méthodes de résolutions. Une résolution analytique qui permet en faisant des hypothèses simplificatrices de trouver la distribution des contraintes normales et tangentielles suivant la longueur de la structure et d'analyser l'influence des propriétés thermo élastiques et de l'aspect géométrique des matériaux sur les valeurs maximales de ces contraintes. Une autre méthode expérimentale basée sur les mesures d'extensomètres. Les données expérimentales permettent de localiser les points les plus sollicités sur la surface du panneau exposée directement à la radiation solaire.

Ce type d'étude permettra d'identifier et quantifier les contraintes thermiques développées sur la structure du panneau photovoltaïque. Puis améliorer les zones critiques a fin d'éviter la détérioration structurelle. La bonne sélection et l'assemblage correct des matériaux sont très importants pour les applications photovoltaïques.

I.2 Modèle analytique de la distribution des contraintes thermiques sur une structure multicouche soumise à un champ de température

Chapitre 1

Aperçu sur les travaux scientifiques concernant les panneaux solaires photovoltaïques

Références bibliographiques [1]:

Dans cet article, l'auteur a établi une méthode analytique à base des lois de la physique et de mécanique des structures. Cette méthode permet de trouver la distribution des contraintes thermiques sur une structure multicouche (sandwich) de matériaux différents soumise à un champ de température. Notons que la distribution de contraintes thermiques analysée est suivant une seule direction (analyse unidimensionnelle).

L'objet d'étude choisi dans cette analyse consiste en une structure à trois couches collées entre elles à l'aide d'un matériau adhésif (caoutchouc en silicium). Ces couches d'épaisseur différente consistent en une puce de silicium, film polyamide et un matériau composite, respectivement de haut en bas. Chaque type de matériau est caractérisé par ses propriétés élastiques et thermiques (module d'élasticité, coefficient de poisson et coefficient de dilatation thermique).

Pour se faire, l'auteur a étudié un problème d'élastostatique incluant l'effet thermique. Il a posé les équations correspondantes permettant de lier les inconnues et données du problème.

- équation d'équilibre.
- relations de trigonométrie.
- relation déformation-déplacement.
- loi de comportement thermo élastique linéaire.

L'état de contraintes de la structure a été étudié en se basant sur les hypothèses suivantes :

- 1) Les matériaux sont isotropes le long des directions x et y, telle que l'axe des x est la longueur de la structure et l'axe des y est l'épaisseur de la structure.
- 2) La distribution de contraintes normales et de cisaillement est uniforme le long de l'épaisseur.
- 3) Toutes les déformations de cisaillement sont concentrées dans les adhésifs.
- 4) la rigidité des matériaux collés et l'adhésif est constante le long de la direction de longueur.

Les contraintes thermiques sont estimées dans une structure soumise à un gradient de température de -120°C à 100°C. Les résultats montrent que :

- Les contraintes thermiques à -120°C sont plus importantes qu'à la température de 100°C.
- Le graphe des contraintes normales développées sur chacune des trois couches à une forme parabolique sur la longueur de la structure. La valeur maximale et minimale de la contrainte normale sont enregistrées dans le film polyamide et la puce de silicium, respectivement.

Chapitre 1

Aperçu sur les travaux scientifiques concernant les panneaux solaires photovoltaïques

- La contrainte de cisaillement maximale apparait dans l'adhésif entre le film polyamide et le matériau composite.

Pour valider les résultats analytiques obtenus, l'auteur a effectué un test de mesure au moyen des gauges de tension. La petite différence trouvée après la comparaison de résultats est due selon l'auteur aux erreurs expérimentales. Ainsi, le model analytique établi peut être utilisé pour décrire la distribution des contraintes thermiques sur la structure multicouche.

Chapitre 1

Aperçu sur les travaux scientifiques concernant les panneaux solaires photovoltaïques

I.3 Effet de l'aspect géométrique sur les contraintes thermiques développées dans un panneau solaire soumis à un champ de température

Références bibliographiques [2]:

De même que l'article [1], la distribution des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque soumis à un champ de température a été simulée analytiquement. De plus, l'auteur a examiné l'effet de l'aspect géométrique sur les contraintes thermiques, à savoir l'épaisseur et la longueur de la structure.

La structure du panneau solaire choisie pour l'étude est composée respectivement d'une couverture de verre, plaque fine de silicium (cellule solaire) et un film polyamide collées avec le caoutchouc en silicium. Les propriétés élastiques et thermiques des matériaux désignés ont été mesurées utilisant deux appareils (FPZ-100-type tensile machine (Germany), horizontal thermal expansion apparatus (Ukraine)).

La distribution des contraintes thermiques développées dans la structure est caractérisée par les remarques suivantes :

- Les contraintes thermiques à -100°C sont plus larges qu'à la température de 100°C .
- Pour le matériau de liaison (caoutchouc), la contrainte tangentielle maximale est enregistrée à $x=0$ et $x=L$, où celle de compression est à $x=L$. Par contre au milieu, soit à $x=L/2$, la contrainte s'annule. La valeur maximale apparaît dans l'adhésif adjacent au film polyamide.
- Pour les couches collées, les contraintes thermiques normales de traction ou de compression s'annulent aux deux extrémités de la structure ($x=0$ et $x=L$) et la contrainte maximale est à $x=L/2$. La valeur maximale apparaît dans le film polyamide.
- La dilatation thermique du polyamide due à l'augmentation de température est restreinte suite aux contraintes de compression développées sur cette couche. Contrairement au verre qui subit une traction. C'est réciproque quant à la température basse.

Quant à l'influence de l'aspect géométrique, l'auteur a tiré les remarques suivantes :

- En diminuant l'épaisseur du film polyamide, la contrainte maximale de traction/compression dans le panneau solaire s'élève et la contrainte tangentielle maximale se réduit. Par contre lorsqu'on augmente l'épaisseur du matériau adhésif adjacent au film polyamide, les contraintes maximales de la structure diminuent.
- En augmentant la longueur de la structure, la contrainte maximale normale et de cisaillement s'élèvent jusqu'à une valeur constante qui correspond à une longueur limite donnée.
- Avec la variation de la longueur de la structure, la contrainte tangentielle croît rapidement dans le matériau adhésif (caoutchouc en silicium) adjacent au film polyamide par rapport à celui mis entre le verre et la cellule solaire.

Chapitre 1

Aperçu sur les travaux scientifiques concernant les panneaux solaires photovoltaïques

I.4 Effet du coefficient de dilatation thermique de chacun des matériaux sur les contraintes thermiques développées dans un panneau solaire soumis à un champ de température

Références bibliographiques [3]:

Dans ce travail, l'auteur a cherché analytiquement la distribution des contraintes thermiques dans la structure d'un panneau solaire photovoltaïque soumis à un champ de température. Par la suite, il a examiné l'effet du coefficient de dilatation thermique sur la valeur maximale des contraintes normales et de celles de cisaillement développées dans la structure. Cette étude contribuerait à l'optimisation structurelle du panneau solaire.

La structure du panneau étudié est constituée de plusieurs couches collées entre elles à l'aide d'un matériau de liaison (caoutchouc en silicium). Le panneau est composée d'une couverture de verre, plaque de silicium, film polyamide et matériaux composites, respectivement.

L'étude de l'effet du coefficient de dilatation thermique montre les résultats suivants :

- La contrainte normale maximale est enregistrée dans le film polyamide quelque soit la variation du coefficient de dilatation thermique de chaque matériau.
- La contrainte tangentielle maximale est enregistrée dans le matériau de liaison mis entre la carbone fibre composite et le film polyamide quelque soit la variation du coefficient de dilatation thermique de chaque matériau.
- En diminuant le coefficient de dilatation thermique du polyamide, les contraintes maximales normales et tangentielles de la structure diminuent considérablement.
- L'augmentation du coefficient de dilatation thermique du silicium mène également à la réduction des contraintes maximales, par contre l'influence des autres matériaux peut être ignorée.

Chapitre 1

Aperçu sur les travaux scientifiques concernant les panneaux solaires photovoltaïques

I.5 Evaluation expérimentale et cartographie des déformations induites par les contraintes thermiques sur un panneau photovoltaïque

Références bibliographiques [4]:

Une évaluation expérimentale et cartographie de l'état de déformations induites par les contraintes thermiques sur la surface du panneau photovoltaïque, directement exposée à la radiation solaire lors du fonctionnement. La méthodologie des mesures expérimentales est basée sur la théorie d'extensomètre (gauges de tension). Cette étude a pour but d'identifier les zones critiques sur la surface du panneau, qui doivent être améliorées pour éviter la détérioration de la structure.

Quatre échantillons des modules photovoltaïques sont examinés, avec des différentes dimensions, formes, cellules (silicium monocristallin ou poly cristallin), matériaux de protection et de support (Plexiglas, Tefzel, Tedlar), avec ou sans cadre. Après avoir contrôlé les objets d'études pour vérifier l'absence de défauts, des gauges de tension sont placées sur huit zones significatives, telles que le centre géométrique et les arrêtes des cellules solaires, vides entre cellules, conducteurs métalliques pour les connexions électriques. Par la suite, les échantillons sont soumis à un champ de températures à l'intérieur d'une chambre conditionnée.

Les mesures de déformations sont effectuées dans la chambre climatique où le cycle journalier de température typique dans les conditions réelles de fonctionnement a été simulé. Une équation d'extensomètre permet de calculer à l'aide des données expérimentales, les coefficients de dilatation thermique des huit points pris pour chaque échantillon. A noter que le champ de température est uniforme sur la surface, d'où la déformation est proportionnel au coefficient thermique correspondant. Puis une cartographie du coefficient de dilatation thermique est dessinée sur la surface de chaque panneau.

Les résultats obtenus :

- Echantillon 1 : La cartographie montre que les valeurs maximales de déformation sont enregistrées au voisinage des arrêtes et au centre du panneau. Les valeurs minimales situées dans les barycentres des quatre cellules photovoltaïques centrales.
- Echantillon 2 : La déformation maximale est localisée au centre géométrique du panneau.
- Echantillon 3 : Les valeurs maximales des déformations sont situées dans les quatre coins du panneau. Les valeurs minimales sont enregistrées sur les deux zones centrales (vides), soit les parties haute et basse où il y a pas de cellules photovoltaïques.
- Echantillon 4 : De même que le troisième, les valeurs maximales de déformations sont enregistrées dans les quatre coins du panneau. Par contre les minimales, le long des axes longitudinales du panneau particulièrement toute la zone centrale du module.

Les différences de résultats d'un échantillon à un autre sont dues aux natures des matériaux et aux dimensions géométriques qui caractérisent chaque type de panneau.

Chapitre 1

Aperçu sur les travaux scientifiques concernant les panneaux solaires photovoltaïques

I.6 Contraintes thermiques et effet de rupture dans le vitrage solaire absorptive

Références bibliographiques [5]:

Des couches diverses et des teintes appliqués au verre de fenêtre ont la capacité de refléter ou absorber le rayonnement infrarouge du soleil et réduire ainsi la charge thermique à l'intérieur du local (bâtiment).

Dans ce travail, l'auteur a analysé les contraintes thermiques causées par l'illumination solaire intense sur le verre couvert de films de vitrage solaire absorptives.

L'expérience est effectuée pour six types de vitrages différents. Les échantillons (XL121), (PNTHR 50) et (Aktiv) sont des couches absorptives de nature. (VKOOL 40) est réfléchive. (Au1, Au2) sont des couches expérimentales.

La charge thermique est appliquée sur la moitié inférieure de la vitre seulement. L'étude de ces contraintes est faite à base de la méthode des éléments finis.

Deux positions structurelles sont considérées. Le premier cas, la vitre a été fixée en haut et en bas et le deuxième cas seulement la base est fixée.

La température superficielle du verre s'élève en raison de la présence d'une couche absorptive. Sa valeur dépend de la proportion de chaleur absorbée. Celle-ci diffère d'une couche de vitrage à une autre.

Dans le cas où le verre chauffé est fixé par dessus et à sa base, des contraintes thermiques de compression sont formées en raison du fait que le mouvement (dilatation) du bord supérieur du carreau ne pouvait pas avoir lieu. Cette situation ne causera pas de rupture puisque les défauts de bords ne se propageront pas sous des charges compressives.

Au contraire, des contraintes de traction sont formées dans le cas où le carreau est fixé uniquement par-dessous (base). Selon sa direction, ce type de contrainte peut causer une rupture dans le carreau.

Le but de l'analyse était de gagner une meilleure compréhension de la réponse de structures vitrées sous des charges thermiques radiatives.

Chapitre II

Energie Solaire et Applications

II.1 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire: [7], [17], [18], [19]

II.1.1 Unités utilisées:

L'éclairement ou irradiance est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en W/m² (watt par mètre carré).

L'irradiation ou rayonnement est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en J/m² (joule par mètre carré). L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole H. Une autre unité plus courante est le Wh/m² (wattheure par mètre carré). Tableau (II-1)

| Unités | |
|--|---|
| Eclairement ou Irradiance E exprimé en W/m ² | Rayonnement, irradiation ou énergie incidente H exprimé en Wh/m ² ou J/m ² |

II.1.2 Source de rayonnement solaire-constante solaire:

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.10²⁷ tonnes. Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564106 tonnes d'hydrogènes en 560106 tonnes d'hélium, la différence de 4 milles de tonnes est dissipée sous forme d'énergie (E= mc²), ce qui représente une énergie totale de 36.10²² kW. La terre étant à une distance de 150.10⁶ km du soleil, elle reçoit une énergie de 1,8.10¹⁷ W.

La valeur du flux de rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance terre/soleil. L'origine de cette variation de distance est le mouvement de translation de la terre formant une trajectoire elliptique autour du soleil (cycle annuel).

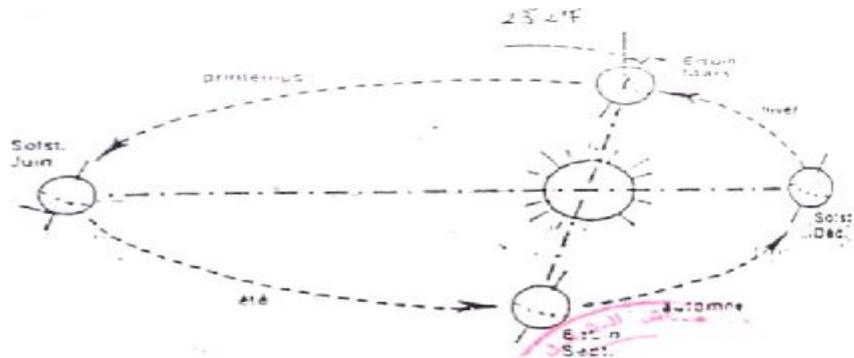


Figure (II-1) : Mouvement de la terre par rapport au soleil

En premier approximation, on peut calculer la valeur de E en fonction du numéro du jour de l'année J par :

$$E = E_0 [1 + 0,033 \cos (0,984 j)] [w/m^2]$$

Une moyenne de 1367 watts (E₀) atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-Soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire.

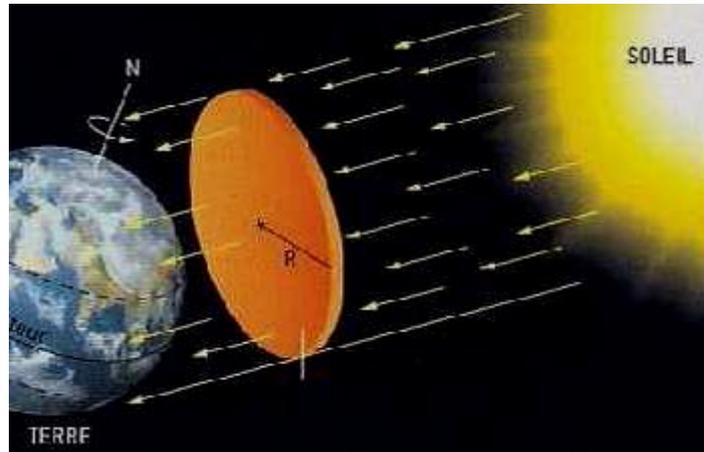


Figure (II-2) : Portion du flux solaire arrivant à la surface externe de la couche atmosphérique

Il est clair que le mouvement de translation de la terre autour du soleil influe sur la portion de flux solaire atteignant une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée au dessus de la couche atmosphérique. Physiquement, le soleil assimilé à un corps noir a une température uniforme sur toute la surface émettrice (surface du soleil) environ 5800 k. le flux émis est le même sur toutes les directions (isotrope).

Soit l'éclairement défini précédemment : $E = \Phi/S$ (flux par unité de surface). On définit l'angle solide comme l'aire (surface de la terre) interceptée par la portion de flux par la distance à la puissance carrée de terre/soleil, $d\Omega = dS/R^2$. Selon cette expression, on remarque que plus la distance R augmente, l'angle solide se réduit. Ce qui mène à la réduction de la portion de flux atteignant la surface de la terre, ainsi l'éclairement est réduit. C'est réciproque quant à la diminution de la distance R.

II.1.3 Mouvement apparent du soleil:

Le mouvement apparent du soleil vu par un observateur fixe en un point de la latitude L est représenté par la figure suivante : Le repérage du soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles :

- L'azimut « a » : C'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.
- La hauteur « h » du soleil ou l'altitude : C'est l'angle que fait la direction du soleil avec la projection sur un plan horizontal.

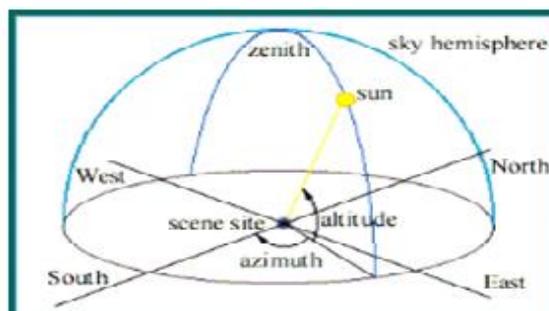


Figure: Mouvement apparent du soleil

Figure (II-3) : Mouvement apparent du soleil

Ces deux angles sont fonctions de :

- La latitude L du lieu.
- La date j (en raison du mouvement de déclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport au plan elliptique « cycle saisonnier »).

- L'heure solaire TS dans la journée (en raison du mouvement de rotation de la terre autour d'elle-même « cycle journalier »).

Ces angles influent directement sur l'angle d'incidence (l'angle que font les rayons solaires avec une surface réceptrice (panneau ou bien le sol). L'angle d'incidence à son tour influe sur l'énergie captée par la surface réceptrice. Une inclinaison du capteur est nécessaire de telle sorte qu'il ait une surface normale aux rayons lumineux et améliorer ainsi la portion de flux reçu.

II.1.4 Rayonnement solaire au sol:

Après avoir défini l'éclairement moyen reçu de l'année hors atmosphère. On s'intéresse maintenant à la part d'énergie reçue sur la surface de la terre. Celle-ci dépend de l'épaisseur de l'atmosphère. Cette énergie est pondérée par divers facteurs à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et saison. Des gaz comme l'ozone (O_3), pour des longueurs d'ondes inférieures à $0,3 \mu m$, le dioxyde de carbone (CO_2) et la vapeur d'eau (H_2O), pour les infrarouges au dessus de $2 \mu m$, absorbent les énergies proches de leur énergie de liaison, ce qui conduit à des « trous » dans le spectre solaire visible au sol. Par ailleurs, les poussières et aérosols présents dans l'atmosphère conduisent à une absorption répartie quasiment sur toute la gamme spectrale, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance incidente.

On utilise la notion AM (Air Mass) a fin de caractériser le spectre solaire en terme d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1367 W/m^2 (AM_0) dans l'espace hors atmosphère terrestre. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m^2 du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM_1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol (angle d'incidence). Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 45° avoisine les 833 W/m^2 ($AM_{1.5}$). Figure suivante.

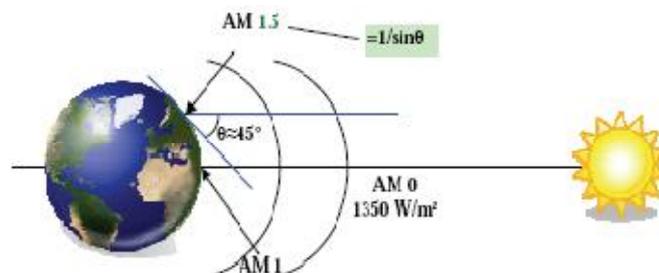


Figure (II-4): Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émise par le soleil, notion de la convention AM

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien absorbé par le sol (albédo) puis rayonné dans toutes les directions. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée $AM_{1.5}$ avec une puissance de 1000 W/m^2 . Figure suivante.

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : $AM_{1.5G}$ ou $AM_{1.5D}$.

Le nombre « 1.5 » indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est à dire AM1. Le « G » représente le rayonnement global incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

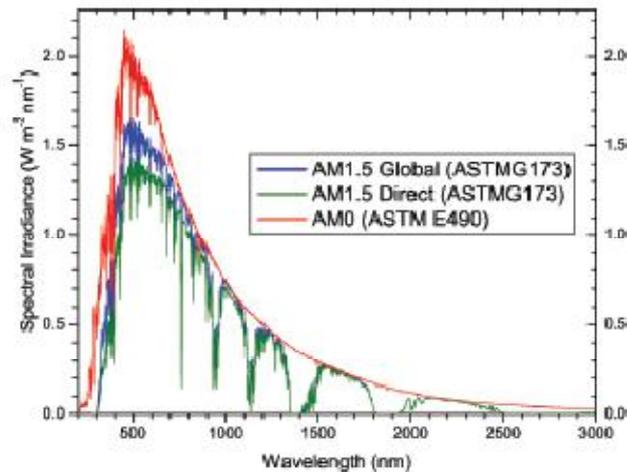


Figure (II-5) : Spectres solaire relevés selon la convention AM

On tient à rappeler qu'au niveau du sol, la puissance maximale n'est que d'environ 1000W/m^2 dans les conditions climatiques les plus favorables ou le rayonnement diffus est faible : 150 à 200W/m^2 . Ainsi, en tenant compte de la variété des conditions climatiques et du relief du lieu (albédo : Coefficient de réflectivité de la terre). La terre présente de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire.

II.2 Applications:

II.2.1 Panneau solaire photovoltaïque:

II.2.1.1 Constitution des modules (panneaux) photovoltaïques: [6]

Dans la fabrication d'un module photovoltaïque, l'encapsulation (procédé de fabrication) a pour but de regrouper les cellules en série ou en parallèle afin de permettre leur utilisation à des tensions et des courants pratiques tout en assurant leur isolation électrique et leur protection contre les facteurs extérieurs tels que l'humidité, la pluie, la neige, la poussière, la corrosion et les chocs thermiques et mécaniques. Cette protection doit permettre une durée de vie des modules photovoltaïques supérieure à 20 ans.

II.2.1.1.1 Assemblage:

En pratique, l'encapsulation consiste à la mise en sandwich de l'ensemble constitué par les cellules photovoltaïques connectées entre elle et le matériau (EVA) entre :

a-deux plaques de verre (procédé bi-verre) ou

b-une plaque de verre et un ensemble constitué de couches minces de polymère (mylar, tedlar) et d'aluminium (procédé mono-verre).

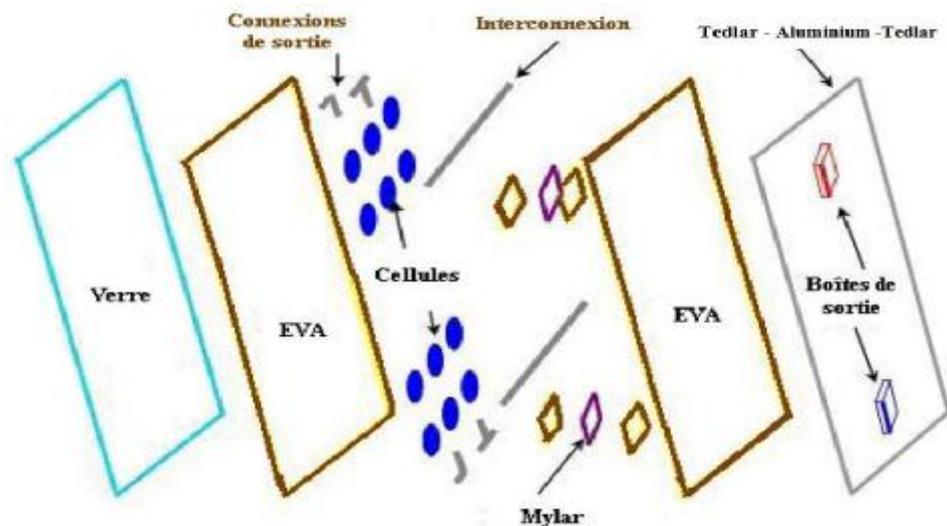


Figure (II-6): Schéma éclaté d'un module de type « mono-verre »

La figure montre que le module photovoltaïque consiste en un lot de cellules photovoltaïques connectées entre elles, puis enrobées dans une résine transparente, l'EVA.

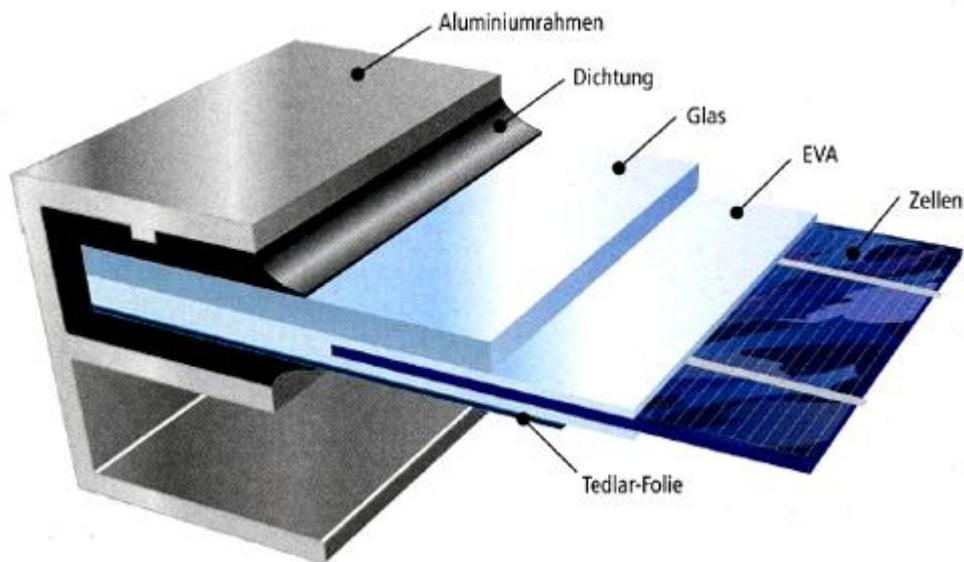
Pour former le panneau photovoltaïque, le module précédemment fabriqué doit être enfermé dans différents éléments qui sont ainsi insérés, de bas en haut, dans un cadre muni de joints étanches sur tout son pourtour (périphérie).

La face avant des cellules est recouverte d'une plaque de verre.

La face arrière des cellules est recouverte d'un film multicouche composé de Tedlar et d'aluminium.

Les connexions de sortie de la face arrière des cellules sont isolées électriquement par un film de polymère transparent, nommé « Mylar ».

Figure (II-7) : Schéma d'illustration d'assemblage d'éléments constitutifs d'un panneau solaire photovoltaïque



a-Aluminiumrahmen : encadrement en aluminium.

b-Dichtung : jointure d'étanchéité.

c-Glas : plaque de verre.

d-L'EVA.

e-Zellen : cellule.

f-Tedlar-Folie : Tedlar-Aluminium

II.2.1.1.2 Description des composants du panneau photovoltaïque:

Le verre :

Il s'agit d'un verre trempé de 4 mm d'épaisseur. On qualifie ce verre de "verre solaire". Cela signifie que le verre a une faible teneur en fer. Ceci permet une meilleure transmission optique. En générale, la transmission optique du verre d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 95 % dans la gamme utile du spectre solaire (380 nm à 1200 nm). La face extérieure du verre, traité à l'acide fluosilicique (H_2SiF_6), est recouverte de nano pores qui piègent la lumière incidente et réduisent la réflexion en surface à une valeur inférieure à 8% dans la gamme 380 nm à 1200 nm. En face intérieure, le verre est micro-structuré, augmentant ainsi le rendement par éclairage diffus.

L'EVA :

L'EVA est une résine transparente enrobant les cellules photovoltaïques. Chimiquement, l'EVA est formée de chaînes de copolymère d'éthylène et de vinyle d'acétate.

L'EVA est utilisée car ce produit présente de grandes propriétés adhésives. Les quatre caractéristiques qui ont fait de l'EVA un matériau de choix pour l'encapsulation sont :

- Sa résistivité électrique très élevée le classant comme un très bon isolant électrique ;
- Ses températures de fusion et de polymérisation relativement faibles ;

- Son très faible taux d'absorption d'eau (étanchéité);
- Sa bonne transmission optique (supérieure à 90%) dans la gamme utile du spectre solaire (380 nm à 1200 nm).

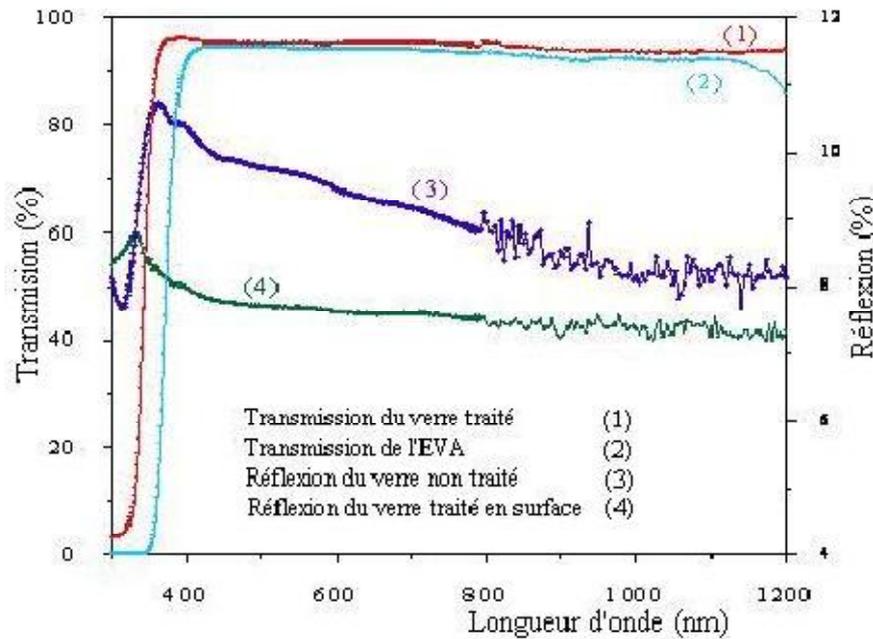


Figure (II-8) : Les spectres de transmission et de réflexion du verre et de l'EVA

Tableau (II-2) suivant : propriétés de l'EVA.

| | |
|------------------------|----------------------------|
| Densité | 0.957 g/cc |
| Epaisseur | 0.45 mm |
| Elongation de rupture | 900-1100% |
| Module d'élasticité | 4.8 MPa |
| Résistivité électrique | $10^{14} \Omega/\text{cm}$ |
| Indice de fusion | 4.3 g/min |
| Point de fusion | 110°C |
| Absorption d'eau | 0.05%-0.13% |

Le Mylar :

Le Mylar, utilisé pour isoler électriquement les connexions de sortie de la face arrière des cellules, est un film polymère transparent d'épaisseur 56 μm .

Chimiquement, il s'agit d'un composé de polyéthylène de téréphtalique (PET), de résistivité électrique très élevée lui permettant d'être un très bon isolant électrique.

Le TEDLAR –aluminium- TEDLAR:

L'arrière du module est constitué d'un film multicouche. L'aluminium dont le rôle prouvé contre l'humidité et les chocs mécaniques est mis en sandwich entre deux feuilles de tedlar de 180µm d'épaisseur.

Le TEDLAR est un polymère fluoré. Le rôle majeur du TEDLAR, dans un module photovoltaïque, est la protection de surface. En effet, le TEDLAR résiste particulièrement bien aux agressions extérieures (UV, variations de température, atmosphères corrosives, ...), à l'abrasion ainsi qu'aux produits chimiques.

Le cadre en aluminium :

Le cadre en aluminium se justifie par la haute résistance de celui-ci à l'humidité ainsi qu'aux chocs mécaniques.

Le cadre en aluminium peut être anodisé. L'anodisation est un traitement de surface qui permet de protéger ou de décorer une pièce en aluminium par oxydation anodique (couche électriquement isolante de 5 à 50 micromètres). Elle octroie aux matériaux une meilleure résistance à l'usure, à la corrosion et à la chaleur.

II.2.1.1.3 Connexions entre photopiles (cellules) :

Les cellules sont connectées entre elles par de fins rubans métalliques.

La connexion se fait du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+).

Les rubans adhèrent par soudure à la cellule photovoltaïque grâce à une lamelle de cuivre étamé (cuivre+étain).

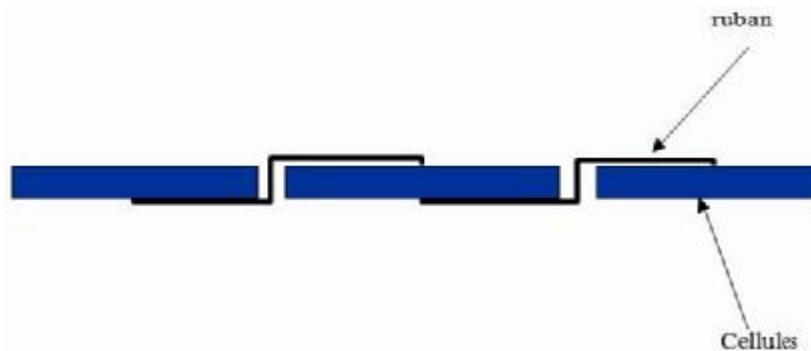


Figure (II-9) : Connexion des cellules photovoltaïques

II.2.1.2 Principe de la conversion photovoltaïque (effet photovoltaïque):

Le terme photovoltaïque désigne selon le contexte le phénomène physique (L'effet photovoltaïque) ou la technologie associée.

II.2.1.2.1 Historique: [7]

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Il a pris une électrode en platine et l'autre en cuivre oxydé, plongées dans un acide conducteur. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = h \cdot c / \lambda$$

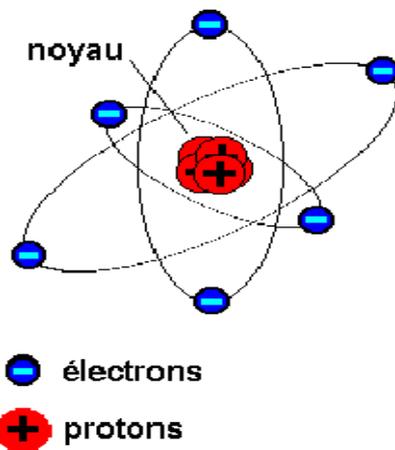
Où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

II.2.1.2.2 Rappels (structure de la matière): [8]

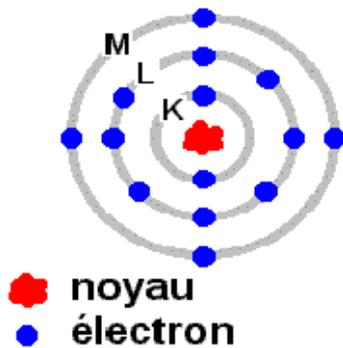
Étant donné que le silicium est utilisé comme matériau de base du module photovoltaïque, on se réfère toujours à ce dernier dans la suite.

La matière, qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse se compose de molécules qui sont des groupements d'atomes.

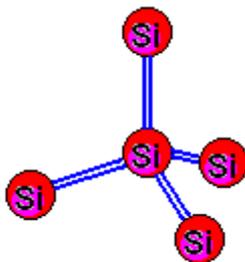
Conventionnellement on représente l'atome comme constitué d'électrons gravitant autour d'un noyau, comme le feraient des satellites autour d'une planète. Le noyau est constitué de protons et de neutrons. La charge électrique du neutron est nulle. Le proton a une charge positive égale en valeur absolue à celle de l'électron qui lui, est négatif. A son état normal un atome est électriquement neutre, le nombre d'électron étant égal au nombre de protons.



Les électrons de charge négative, sont répartis par couches. Chaque couche ne peut comporter qu'un nombre limité d'électrons. Par exemple la couche K qui est la plus proche du noyau est saturée avec 2 électrons. C'est sur la couche la plus à l'extérieur (couche de valence) que les électrons ont le moins d'attraction avec le noyau, ce qui permet les liaisons avec les atomes voisins autorisant la cohésion de la matière. La couche de valence de la plupart des atomes n'est pas complète (sauf pour les gaz rares), elle peut ainsi accepter (provisoirement) des électrons, ou éventuellement en perdre. C'est le cas de l'ionisation d'un atome. La figure ci-dessous représente dans un plan les 14 électrons d'un atome de silicium gravitant autour du noyau composé de 14 protons et 14 neutrons. Les atomes sont susceptibles de se charger électriquement en gagnant ou en perdant un ou plusieurs électrons : on parle alors d'ions. Si un atome gagne un ou plusieurs électrons, la charge de l'atome devient négative (anion), et s'il en perd, la charge de l'atome devient positive (cation).



Dans le cristal de silicium (un cristal est un solide formé d'atomes régulièrement disposés et fermement liés les uns aux autres), chaque atome est lié à 4 atomes voisins avec lesquels il partage les quatre électrons de sa couche de valence. La répartition étant régulière on peut considérer qu'un atome est au centre d'un tétraèdre et que ses 4 voisins sont placés au sommet de ce tétraèdre. Ce dernier est illustré ci-dessous.



Cristal de silicium

II.2.1.2.3 Semi-conducteurs: [8], [9], [10]

L'un des facteurs prépondérant pour le choix du matériau est la largeur de son gap. Il impose le nombre de photons du rayonnement solaire participant à la conversion et la tension de sortie de la cellule élémentaire. Le deuxième facteur est la disponibilité du matériau à l'état cristallin et la facilité de créer une jonction dans celui-ci.

Par ces observations, on se rend compte tout de suite que les matériaux répondant le mieux à nos attentes sont les semi-conducteurs.

Les semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Le silicium est un semi-conducteur. On compte aussi entre autre le germanium, le sélénium, l'arséniure de gallium.

Dans un atome d'un semi-conducteur, les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau s'impliquent dans les liaisons covalentes (liaisons entre atomes voisins) et par conséquent la cohésion du cristal. Dans ce dernier, ces électrons se situent sur des niveaux d'énergie appelée (bande de valence). Les électrons qui peuvent participer à la conduction électrique possèdent des niveaux d'énergie appartenant à la (bande de conduction). Entre la bande de valence et la bande de conduction peut se situer une (bande interdite) appelée aussi gap.

Pour franchir cette bande interdite, l'électron doit acquérir de l'énergie suffisante. L'énergie des photons, fonction de la longueur d'onde du rayon lumineux, doit être supérieur ou égale à l'énergie de gap, de la bande interdite sinon, il ne se produira pas de paire électron-trou. Pour les isolants la bande interdite est quasi infranchissable, pour les conducteurs elle est inexistante. Les semi-conducteurs ont

une bande interdite assez étroite. L'atome qui a perdu un électron devient un ion positif et le trou ainsi formé peut participer à la formation d'un courant électrique en se déplaçant.

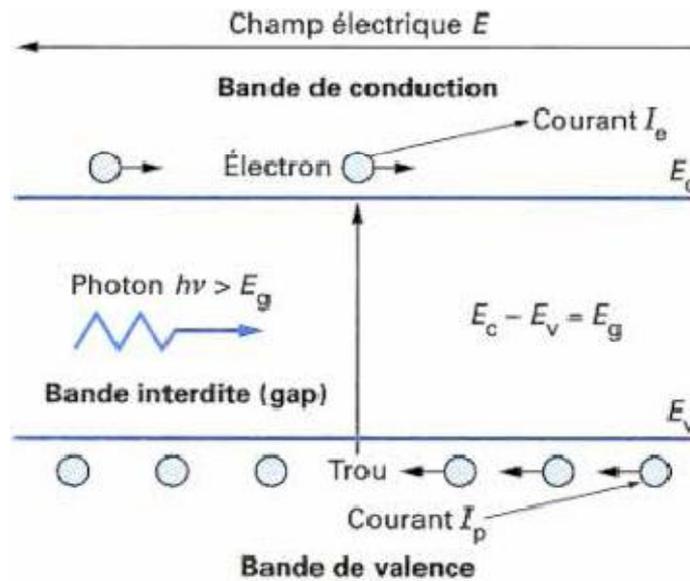


Figure (II-10): Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie

Si l'électron libre est capté par un autre atome, il y a recombinaison. Pour une température donnée, ionisation et recombinaison s'équilibrent. Par contre la résistivité diminue quand la température augmente.

On distingue deux types de semi-conducteurs

a-Semi-conducteur intrinsèque :

Il ne possède pas d'impuretés. De plus sa bande de conduction est vide. Pour le rendre conducteur de courant électrique, on l'expose à la lumière à haute température pour rompre les liaisons covalentes : Les électrons sont ainsi mobiles et capable de participer à la conduction.

b-Semi-conducteur extrinsèque :

Il faut rajouter des impuretés (dopage), ceci lui permet d'augmenter sa conductivité en remplaçant dans son réseau cristallin certains atomes d'origines par des atomes se trouvant à gauche et à droite de la colonne IV du tableau Mendeleïev.

c-Dopage des semi-conducteurs :

c-1-Semi-conducteurs de type N :

On dope le silicium avec des atomes de phosphore qui possède 5 électrons sur sa couche de valence, et avec 4 électrons pour l'atome de silicium, un électron par atome de phosphore ne pourra pas se lier avec ses correspondants du silicium, il y aura alors un excédent de charges négatives dans le cristal, le matériau sera donc potentiellement donneur d'électrons disponibles pour la conduction électrique.

c-2-Semi-conducteurs de type P:

On dope le silicium avec des atomes de bore qui possède trois électrons sur sa couche de valence, et avec 4 électrons pour l'atome de silicium, Il y'aura un excédent de trous (charges positives), puisqu'il

manque un électron à chaque atome de bore pour compléter les quatre électrons de silicium, le matériau sera donc potentiellement accepteur d'électrons.

II.2.1.2.4 La cellule photovoltaïque :

a-Description d'une cellule photovoltaïque : [11], [17]

La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure ci-dessous.

Un cristal semi-conducteur dopé P est couvert d'une zone très mince dopée N et d'épaisseur e égale à quelques millièmes de mm. La texturation du silicium en face avant (zone N) est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief de forme pyramidale, ainsi le rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) subit une double réflexion sur les pyramides, ce qui a pour effet une réduction du coefficient de réflexion. Entre les deux zones P et N se trouve une jonction J qui résulte justement de la juxtaposition des deux zones, l'une est majoritaires d'électrons et l'autre est majoritaires de trous, la zone N est couverte par une grille métallique (couche antireflet (CAR) SiO_2) qui sert à minimiser la réflexion de la lumière. Le principe d'action est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans la couche antireflet, ce qui permet d'annuler les faisceaux réfléchis à l'interface air-CAR tandis qu'une plaque métallique recouvre l'autre face de cristal. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre de mm.

Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode (les contacts face avant et arrière).

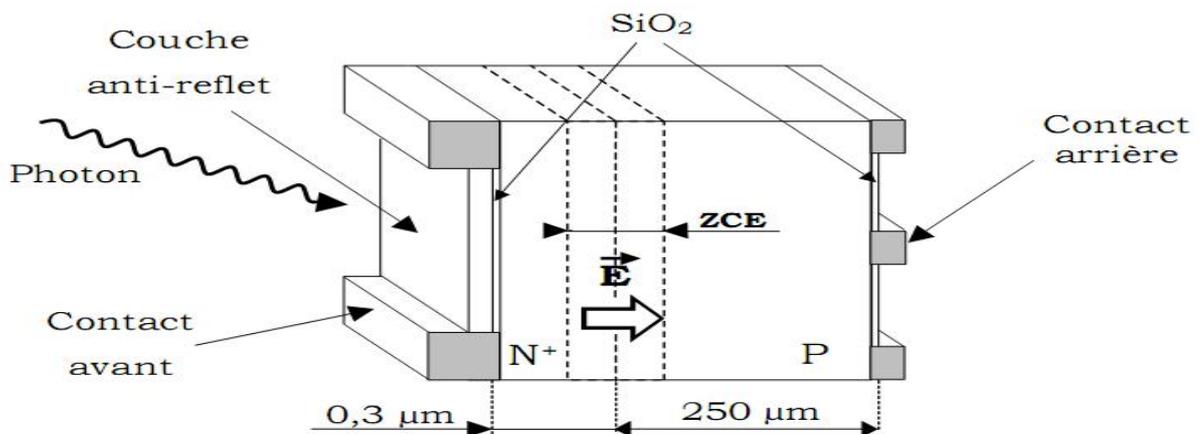


Figure (II-11) : Schéma d'illustration (cellule photovoltaïque)

b-Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque : [8]

Les cellules photovoltaïques doivent correspondre à des dispositifs optoélectroniques capables d'absorber un maximum de photons (couvrir un large spectre et posséder une capacité d'absorption proche de 1). Les photons doivent être utilisés pour libérer des électrons qui devront alimenter un circuit électrique possédant la plus petite résistance possible.

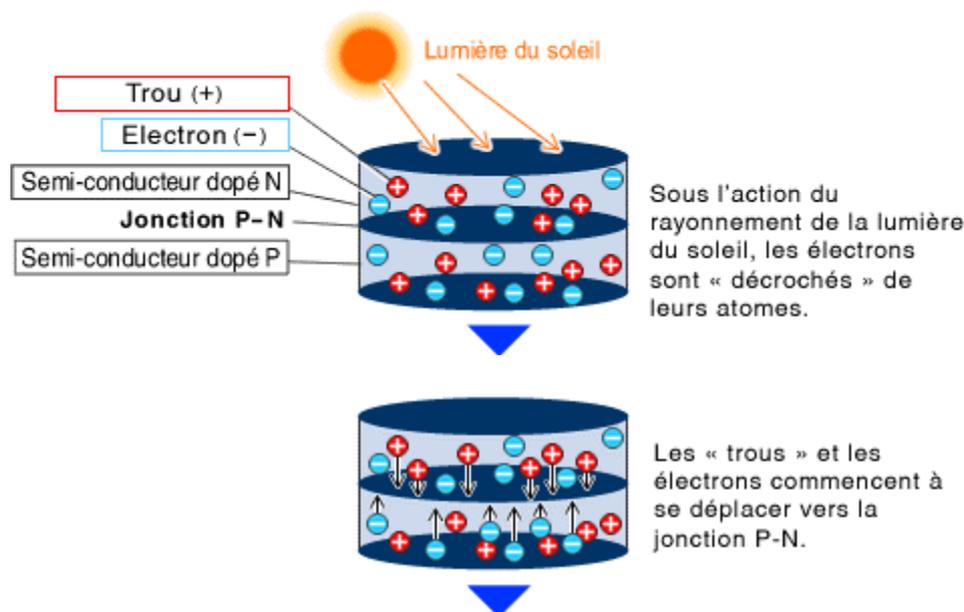
Le but de la cellule photovoltaïque est de convertir l'énergie lumineuse provenant du soleil en énergie électrique. Ceci se fait en trois étapes :

1-Absorption des photons de la lumière solaire : La lumière se compose de photons, ceux-ci peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers. Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir principalement trois événements optiques. L'un d'eux est l'absorption, ou ici la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas et l'énergie restituée est sous une autre forme, à savoir généralement sous forme thermique.

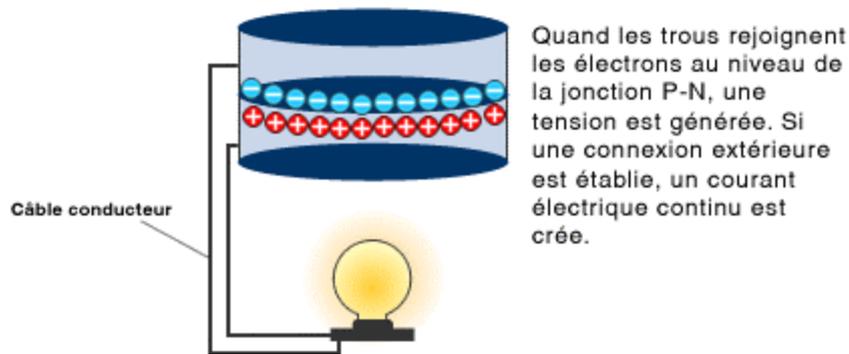
Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restituée sous forme d'énergie électrique, l'énergie portée par les photons sert à faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction dans un atome, il faut donc au départ que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible, puisque ce que l'on cherche à convertir, c'est la lumière du soleil.

2-Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres) :

Le matériau (semi-conducteur) sous l'effet de la lumière 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. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p devient 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 PN a été formée. Au voisinage de celle-ci, une barrière de potentiel qui s'oppose aux courants de diffusion des porteurs majoritaires de chaque zone. Illustration ci-dessous



3-Collecter les particules dans un circuit électrique externe : Une tension apparaît donc en présence de lumière aux bornes de la cellule. Si l'on ferme le circuit à l'aide d'une lampe, le courant pourra circuler. Illustration :



c- Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque : [11]

Comme dans tous les systèmes énergétiques, l'énergie disponible aux bornes d'une cellule PV est fonction de l'énergie entrante et des pertes, ce que l'on peut écrire de la manière suivante :

$$E_{\text{électrique}} = E_{\text{lumineuse}} - E_{\text{pertes}}$$

Avec :

$E_{\text{électrique}}$: l'énergie disponible aux bornes de la cellule PV.

$E_{\text{lumineuse}}$: l'énergie incidente (énergie lumineuse).

E_{pertes} : l'énergie perdue (pertes thermiques principalement).

c-1 Le rendement d'une cellule photovoltaïque : [11]

Le rendement d'une photopile est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie du rayonnement reçue, c'est-à-dire le rapport :

$$\eta = E_{\text{électrique}} / E_{\text{lumineuse}}$$

On peut évaluer l'énergie lumineuse par le produit scalaire de l'irradiation (kWh/m^2) et de la surface de la cellule (m^2). Le rendement de la cellule dépend de plusieurs facteurs qui correspondent à des pertes qui se résument en deux types, certaines sont dites fondamentales, d'autres sont de nature technologiques.

c-2 Pertes fondamentales : [11]

Ces pertes sont inévitables à partir du moment où le matériau photovoltaïque est choisi.

Premièrement, la transparence aux grandes longueurs d'ondes. Sachant que chaque type de matériau est caractérisé par une largeur donnée de la bande interdite (gap), le spectre du rayonnement solaire exploitable dans la conversion photovoltaïque diffère d'un matériau semi-conducteur à un autre, c'est-à-dire que les photons d'énergie inférieure à (E_g : énergie du gap) ne peuvent contribuer à la création de paires électron-trou. Les photons ayant alors une longueur d'onde supérieure à λ_g (λ_g telle que $E_g = h \cdot c / \lambda_g$) sont donc inutiles.

D'un autre côté, on enregistre les pertes de l'énergie photonique excédentaire par rapport à E_g sous forme de chaleur ; un photon ne peut créer qu'au maximum une paire électron-trou. S'ajoute à ceci les pertes qui résultent de la différence entre la tension fournie par la cellule et celle fournie par le gap.

c-3 Pertes technologiques : [11], [17]

Contrairement à celles fondamentales, la recherche photovoltaïque sert à améliorer le rendement de la cellule photovoltaïque en minimisant les pertes technologiques.

Le facteur de remplissage ou facteur de forme correspond à la puissance maximale délivrée par la cellule (conditions standards), divisée par le produit de V_{co} (tension évaluée en circuit ouvert) et I_{cc} (courant mesuré en court-circuit), correspondant à la puissance maximale idéale.

$$FF = P_{max} / V_{co} \cdot I_{cc}$$

Pour une cellule industrielle le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

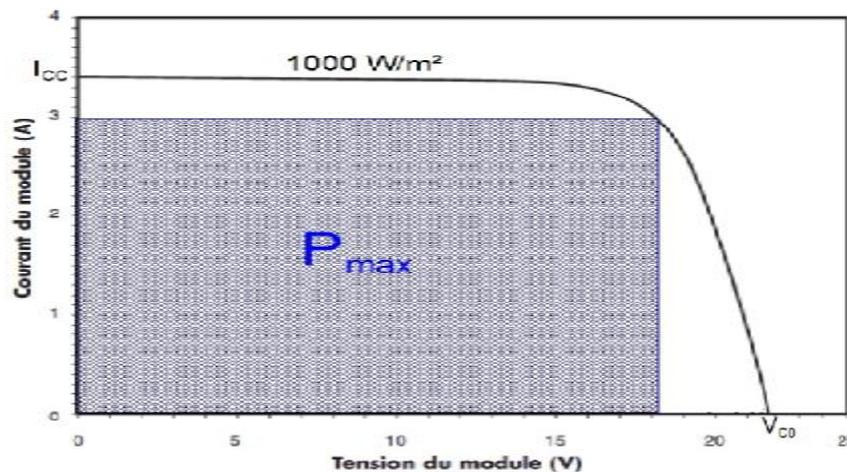


Figure (II-12) : Une courbe de tension-courant d'une cellule éclairée à 1000 W/m^2 et à une température de 25°C

Parmi les pertes, celles de réflexions. Une partie des photons atteignant la plaque sont réfléchis par la surface. Ce problème est considéré comme technologique car un traitement de surface peut le limiter. Ce traitement consiste en la texturation de surface de silicium en face avant (zone N), c'est-à-dire réaliser un relief de forme pyramidale qui entraîne un piégeage plus important des rayons lumineux en réduisant le coefficient de réflexion à côté d'une couche antireflet (TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 , SiN_x , etc.) mise dessus qui contribue également à la réduction de ces pertes.

Les contacts sur la face avant de la cellule entraînent une perte de surface active réduisant ainsi la surface contribuant à la conversion photovoltaïque dans un panneau solaire.

Un autre facteur à prendre en compte est celui du taux d'absorption. Même si les photons entrent dans la cellule, il n'est pas certain que celui-ci sera absorbé, ceci notamment parce que la cellule n'est pas assez épaisse. Il existe des techniques de piégeage permettant de limiter le phénomène de transmission.

On compte aussi parmi les pertes, le phénomène de réabsorption. Même si une paire électron-trou a été photo générée, celle-ci peut se recombiner et donc ne pas participer au courant électrique. Des procédés permettent de réduire les recombinaisons. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets des défauts (impuretés) électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais la principale est l'oxyde thermique de silicium (SiO_2).

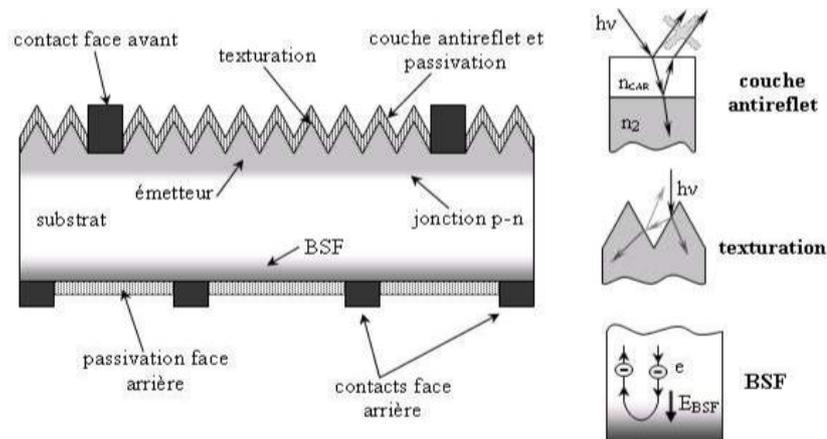
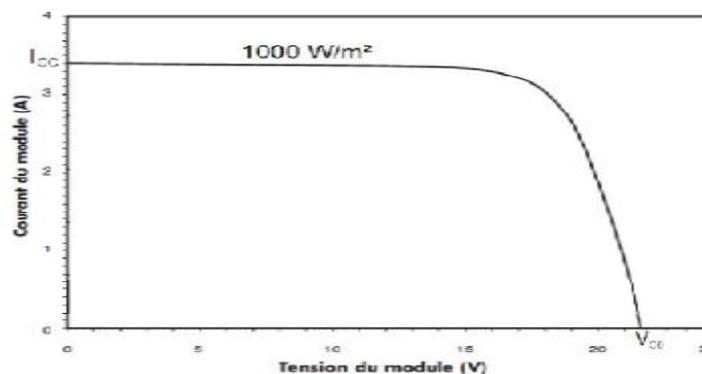


Figure (II -13) : La technologie de la cellule photovoltaïque

d- La courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque : [11]

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

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (répartition de rayonnement donné, cellule PV à une température donnée, air ambiant circulant à une vitesse donnée). En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement. Illustration : courbe I(V) à $T=25^{\circ}\text{C}$ et un éclairement de 1000 W/m^2 .

Figure (II-14) : Courbe I(V) à $T=25^{\circ}\text{C}$ et un éclairement de 1000 W/m^2

La tension de circuit ouvert V_{co} (pour $I_{co}=0$) est fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux. On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

Le courant court-circuit I_{cc} (pour $V_{cc}=0$) est directement fonction de la surface de la cellule. Dans les cellules PV au silicium, la tension V_{co} est de l'ordre de 0.4 à 0.6 V et le courant I_{cc} est de l'ordre de 12 mA pour des conditions de test standard (STC) en laboratoire, c'est-à-dire une répartition du rayonnement de type solaire $AM=1.5$, un rayonnement incident normal sur la cellule PV de 1000 W/m^2 , et une température de cellule à 25°C .

d-1 La puissance caractéristique d'une cellule photovoltaïque : [11]

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc..), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V :

$$P=V.I=R.I^2$$

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum P_{max} idéale correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} . En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus « arrondie », et la tension au point de puissance maximum $V-MAX$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{co} , de même que le courant fourni I_{max} est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{cc} .

d-2 La puissance crête : [11]

Dans le cas d'utilisation de cellules avec le rayonnement solaire, la puissance crête d'une cellule, aussi nommée puissance « catalogue », notée W_C (Watt crête) représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions standards, c'est-à-dire une répartition du rayonnement de type solaire $AM=1.5$, un rayonnement incident normal sur la cellule PV de 1000 W/m^2 , et une température de cellule à 25°C .

d-3 L'influence de l'éclairement sur le rendement : [11]

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Sans éclairage, il n'y a pas de photon et donc pas de création de paire photo générée et donc pas de courant. La figure suivante représente la caractéristique courant-tension d'une cellule PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement.

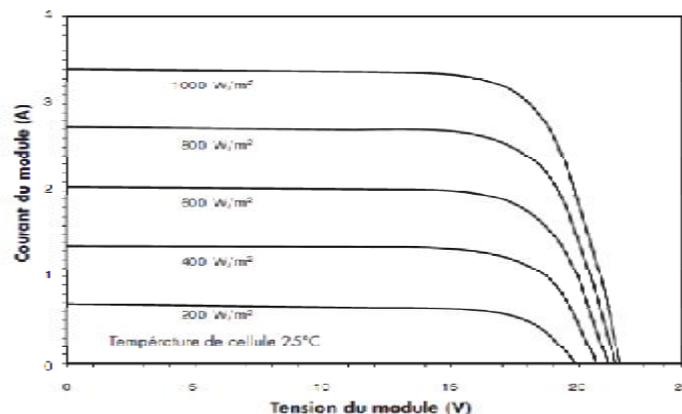
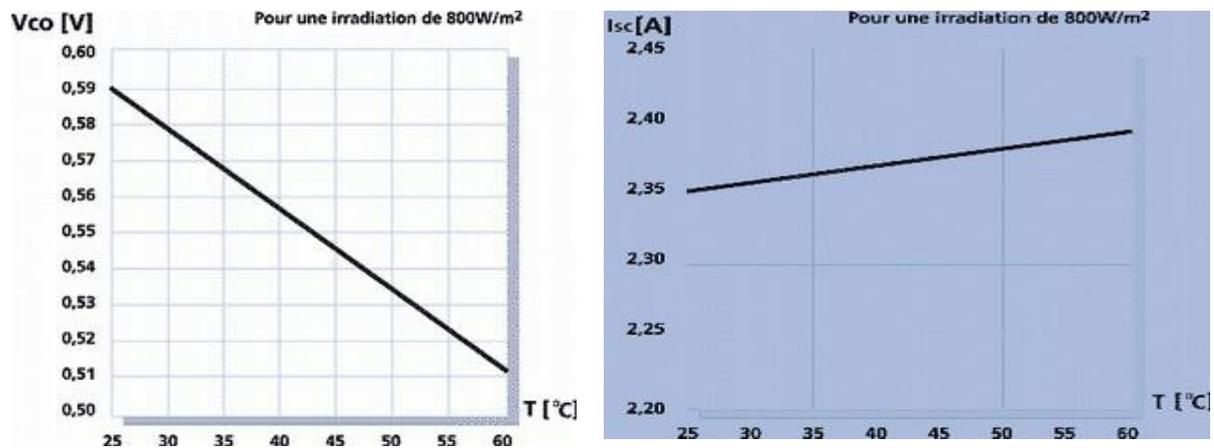


Figure (II-15) : Influence de l'éclairement sur le rendement de la cellule PV

d-4 L'influence de la température sur le rendement : [11]

Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque dépendent de la température de la surface exposée. Le comportement de la cellule PV en fonction de la température est complexe.

Les courbes suivantes (figure (II -16)) représentent l'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de la cellule, les autres conditions extérieures restent fixes :



Lorsque la température augmente, la tension diminue alors que le courant augmente. Dans le cas de cellules au silicium, le courant augmente d'environ 0.025 mA/cm².c alors que la tension décroît de 2.2 mV/°c. La baisse globale de puissance est d'environ 0.4%/°c. Ainsi, plus la température augmente et moins la cellule est performante.

e- L'influence de la température sur la structure :

La température de fonctionnement d'un module est déterminée par l'équilibre entre la chaleur produite par le module PV et la chaleur perdue à l'environnement et la température ambiante de fonctionnement. La chaleur produite par le module dépend des matériaux constitutifs du panneau solaire, des propriétés optiques des cellules solaires. La chaleur perdue à l'environnement peut procéder selon trois mécanismes ; conduction, convection et rayonnement. Un effet indésirable de l'encapsulation des cellules solaires dans le module PV est que cette encapsulation modifie le flux de chaleur dans le module, augmentant ainsi sa température de fonctionnement. Ces augmentations de température ont un impact majeur sur le module en réduisant sa tension mais aussi causer la dilatation thermique de ces composants.

f-Montage des cellules photovoltaïques : [12]

Généralement, chaque cellule photovoltaïque ne peut pas produire qu'une tension continue nominale de 0.5V à 0.6V en circuit ouvert et une puissance nominale voisine de 1.5 WC. Pour satisfaire les besoins des charges couramment utilisées, il faut envisager un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques soit en série soit en parallèle. Cet assemblage forme ce qu'on appelle

« Module solaire » ou « module photovoltaïque ».

Le dimensionnement du système solaire détermine le nombre de modules à mettre soit en parallèle afin d'accroître le courant en conservant la tension, soit en série afin d'augmenter la tension en conservant le courant, et pour avoir une satisfaction en courant et en tension, un groupement mixte « série- parallèle » est obligatoire.

Généralement, un module composé de 36 cellules en silicium cristallin est adapté pour la charge d'une batterie de 12 V.

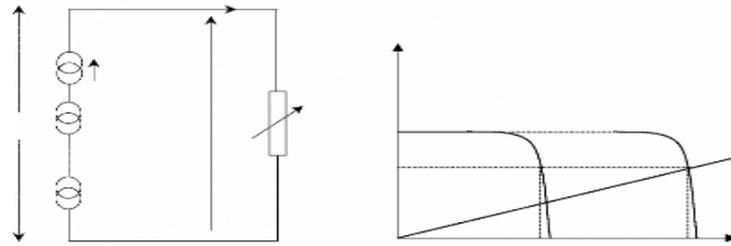


Figure (II-17) Groupement des cellules photovoltaïques en série

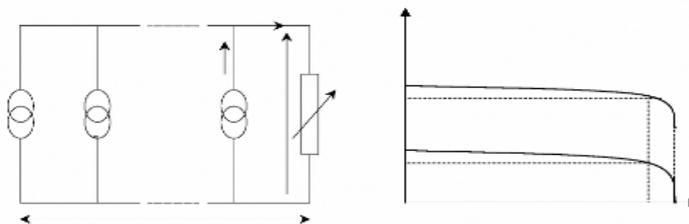


Figure (II-18) Groupement des cellules photovoltaïques en parallèle

II.2.1.3 Paramètres influant sur le panneau photovoltaïque :

II.2.1.3.1 Influence de l'orientation et de l'inclinaison :

Pour une exploitation optimale du rayonnement solaire, la surface de captage devrait toujours être orientée autant que possible perpendiculairement au rayonnement. Toutefois comme la position du soleil par rapport à la terre varie continuellement au cours d'une journée et d'une année, l'angle d'incidence du rayonnement sur le capteur (fixé sur un socle ou sur une toiture) varie également.

L'angle d'inclinaison β est l'angle que fait la surface de la terre et la surface du capteur.

Surface Horizontale : $\beta=0^\circ$, surface verticale : $\beta=90^\circ$. selon nos latitudes, le montage des capteurs avec un angle d'inclinaison β de $45^\circ \pm 25^\circ$ garantit le meilleur gain solaire pour une utilisation durant toute l'année. Des inclinaisons moins fortes favorisent le gain solaire en été. Des inclinaisons plus fortes favorisent le gain solaire en hiver. Cette inclinaison permet de capter le maximum des rayons solaires avec la même surface réceptrice. Le flux maximal est obtenu avec un angle d'incidence 90° (surface perpendiculaire aux rayons solaires). Avec un positionnement fixe durant l'année, il est utile de chercher l'inclinaison optimale, c'est-à-dire celle qui convient à l'irradiation maximale [kWh/m^2].

Orientation : Selon qu'on est dans l'hémisphère Nord ou sud, l'orientation qui semble adéquate est celle d'où provient plus de rayons lumineux. Nord vers Sud et réciproque.

Le rayonnement diffus provient de toutes les directions. Dans une région présentant une part élevée de rayonnement diffus, l'inclinaison et l'orientation du capteur aura, par conséquent, moins d'influence sur le gain solaire.

L'effet de l'orientation est peu marqué dans le cas de faibles inclinaisons et plus sensible dans le cas de fortes inclinaisons.

II.2.1.4 Technologies des modules photovoltaïques:

II.2.1.4.1 Cellules et modules au silicium cristallin: [7], [13]

Le silicium cristallin domine le marché à plus de 80%. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin. Le silicium mono cristallin est difficile à obtenir. En effet, il nécessite un taux de pureté très élevé et donc plusieurs étapes de purification. Ces étapes sont délicates et donc coûteuses. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le multi cristallin.

Ce dernier est devenu la technologie la plus utilisée. A elle seule représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles. L'un des points faibles de ces deux technologies est la quantité de matière utilisée, même si actuellement la taille des lingots et des cellules augmentent continuellement. Les lingots de silicium, mono ou multi cristallin, sont sciés en tranche de 150 à 300 microns, par des scies à fils. Le fil de découpe étant de 180 microns d'épaisseur, il entraîne une perte en matière première de près de 50%.

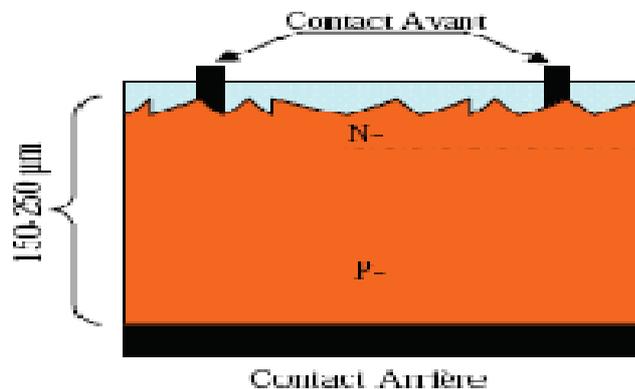


Figure (II-19) : Le schéma de principe d'une cellule à base de silicium cristallin

II.2.1.4.2 Cellules et modules en couche mince: [7], [13]

La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules.

La technologie à couche mince dont la plus mûre est le silicium amorphe (Sia) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples et ainsi de fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que les cellules cristallines ; en revanche, le rendement d'une cellule en Sia est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations

de rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

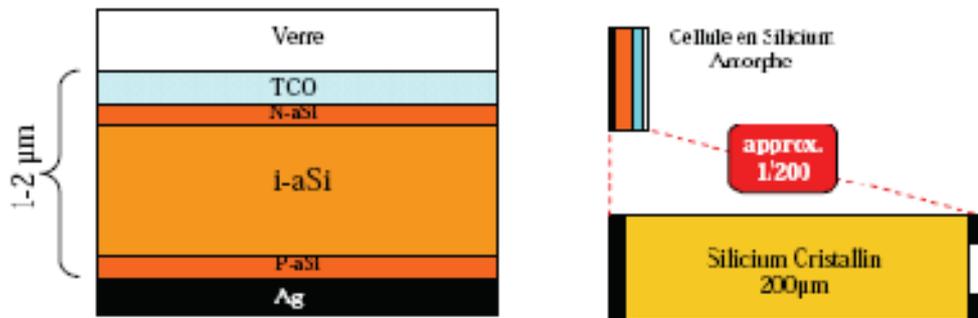


Figure (II-20) : Le schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe et comparaison à une cellule à base de silicium cristallin

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le di séléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19%. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques.

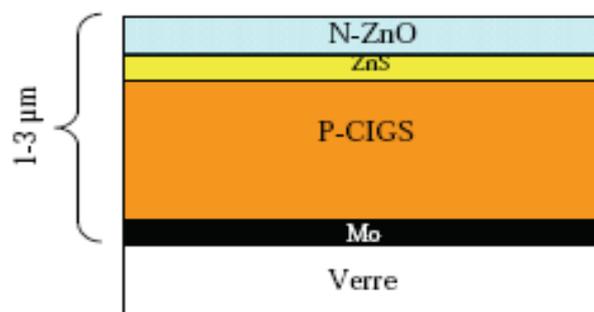


Figure (II-21) : Le schéma de principe d'une cellule à base de CIGS

II.2.1.4.3 Cellules organiques : [7], [13]

Les cellules organiques sont aujourd'hui un sujet d'étude très actif et restent actuellement un sujet de laboratoire. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre.

Comme les semi-conducteurs, ils possèdent des niveaux d'énergies susceptibles d'absorber les photons en créant des paires électron-trou. En l'absence de séparation, les paires électron-trou peuvent se recombiner en émettant des photons de longueur d'onde correspondante. Si les charges peuvent être séparées et transportées vers un circuit extérieur grâce à deux phases adjacentes, on obtient alors des cellules photovoltaïques d'un nouveau type tel que présentée ci-dessous.

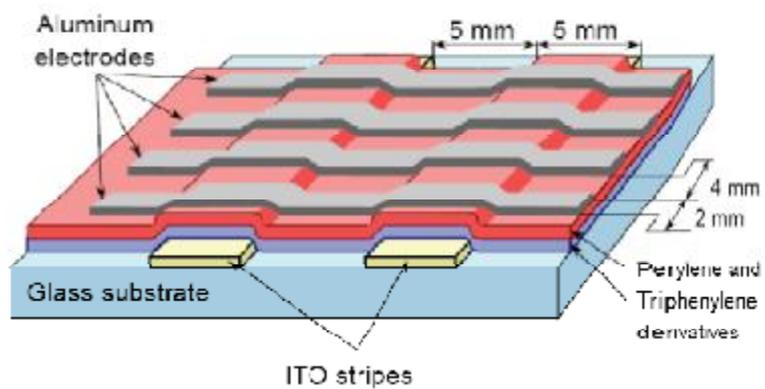


Figure (II-22) : Le schéma de principe d'une cellule PV de type organique

II.2.2 Panneau solaire thermique : [10], [14], [15]

L'application la plus courante du solaire thermique est le chauffe-eau solaire. On peut aussi recourir au solaire thermique pour le chauffage, soit par l'eau soit par l'air (solution la moins chère). Les systèmes solaires sont également utilisés pour le chauffage des piscines, les chauffe-eau des hôtels et hôpitaux.

II.2.2.1 Principes:

Les capteurs solaires thermiques constituent le cœur des installations destinées à transformer l'énergie transmise par le soleil en chaleur. Un capteur solaire thermique le plus répandue est composé d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant, d'un système de refroidissement par le fluide caloporteur, d'un isolant thermique (dos et cotés non exposés), d'une couverture transparente (face avant, exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre, d'un coffrage étanche à l'eau et d'un système de support mécanique de l'ensemble. Pour chaque composant du panneau solaire thermique (isolant et couverture transparente et plaque absorbante noire) une contribution a l'optimisation du rendement énergétique du panneau tout en réduisant les déperditions d'énergie calorifique par voie des trois modes de transfert thermique. L'isolant est disposée sur l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les pertes par conduction, la plaque absorbante noire pour améliorer les capacités d'absorption du rayonnement reçu et la couverture transparente qui laisse passer la plus grande partie du rayonnement solaire et évitent le refroidissement de l'absorbeur (les échanges par convection entre celui-ci et la couverture transparente sont réduits, de même que l'émission du rayonnement infrarouge de l'absorbeur, c'est le principe à effet de serre).

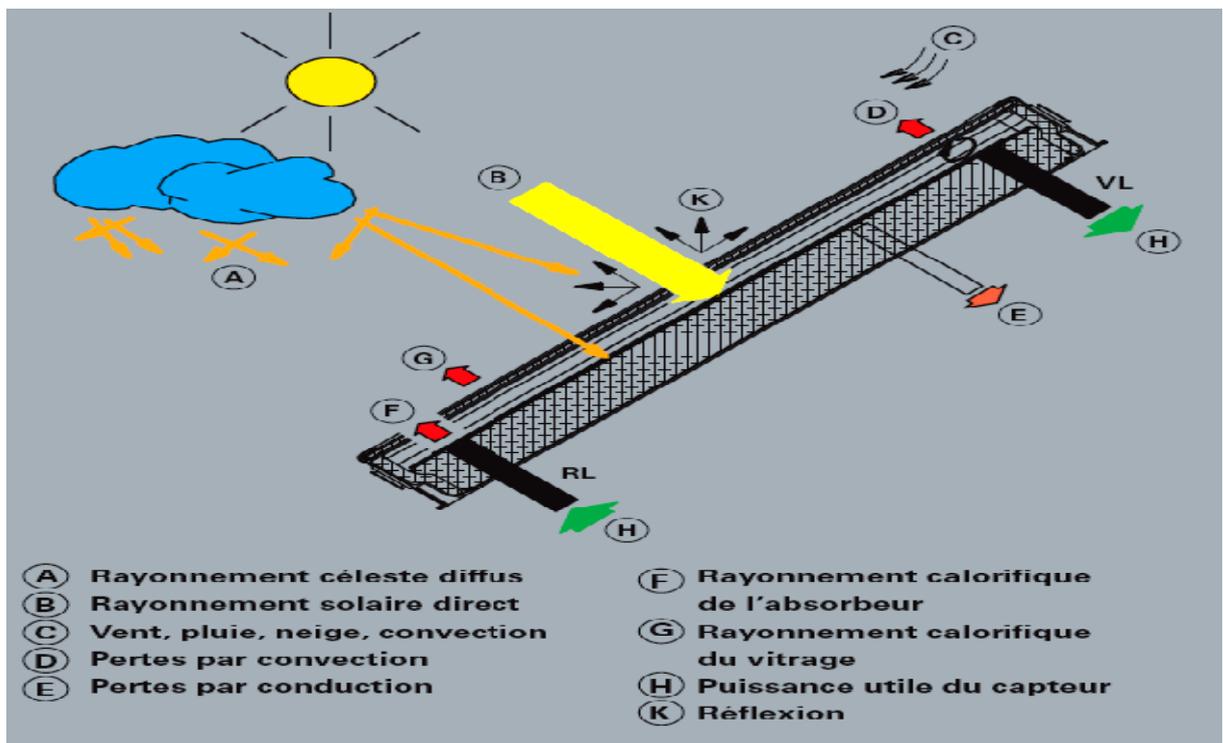
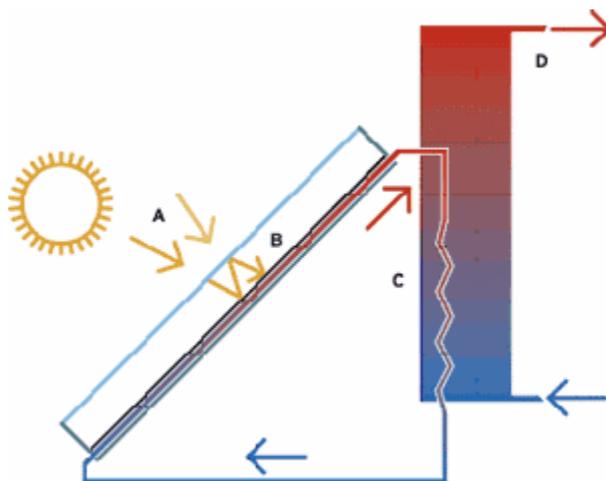


Figure (II-23) : L'utilisation de l'énergie solaire par le capteur thermique

Les capteurs plans ou absorbeur ayant trois fonctions :

1-absorber le rayonnement solaire, 2-le transformer en chaleur, 3-transmettre cette chaleur au fluide caloporteur.

Le rayonnement solaire (direct ou diffus) traverse la vitre. Dans le caisson du panneau solaire, une surface absorbante capte l'infrarouge du rayonnement. Elle est traitée pour en réémettre le moins possible. De toute façon, le rayonnement infrarouge est piégé par la vitre. Entre la plaque absorbante et l'isolation arrière du panneau, un circuit d'eau collecte la chaleur. Ce circuit échange la chaleur dans un boiler via un échangeur. Le circuit (secondaire) peut distribuer l'eau chaude ou alimenter le chauffage.



A : rayonnement solaire.

B : vitre.

C : échangeur de

D : circuit

Figure (II -24) : principe de fonctionnement d'un capteur thermique.

II.2.2.2 Capteur sans vitrage:

C'est le modèle le plus rustique et également le plus économique. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) dans laquelle circule le liquide à réchauffer (figure ci-dessous).

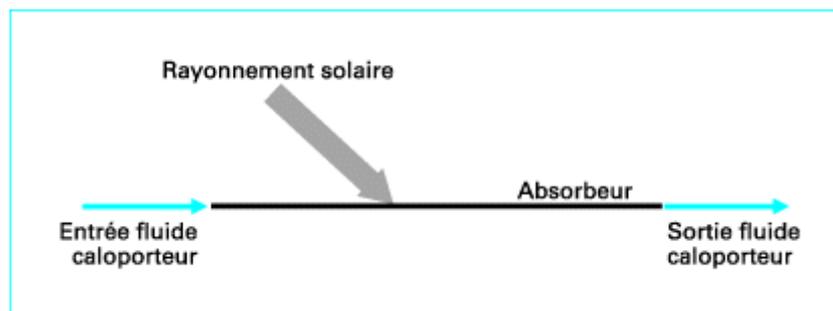


Figure (II-25) : Schéma de principe d'un capteur sans vitrage

Le principal domaine d'utilisation de ce capteur est le chauffage des piscines de plein air. Celles-ci sont le plus souvent utilisées en été, lorsque la température ambiante et le rayonnement solaire sont élevés. Le niveau de température de l'eau des bassins est quant à lui inférieur à 30 °c. Dans ces conditions, l'efficacité des capteurs est très bonne, et l'utilisation de capteurs vitrés ne permettrait pas une meilleure collecte de l'énergie solaire. L'absence de gel pendant la période autorise la circulation directe de l'eau de la piscine dans les capteurs. Afin d'éviter des problèmes de corrosion et également pour des raisons économiques, les constructeurs de matériels utilisent souvent des matières plastiques.

Les capteurs sans vitrage peuvent également être utilisés pour des installations de production d'eau chaude sanitaire. C'est en particulier le cas dans des régions chaudes et fortement ensoleillées. La parfaite intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surfaces

plus importantes. Pour compenser la différence d'efficacité avec des capteurs vitrés, en particulier l'hiver.

II.2.2.3 Capteur sous vide:

Lorsque la température de fonctionnement du capteur est très élevée ($>100^{\circ}\text{C}$) ou lorsque la température ambiante est faible (région de montagne), il est intéressant d'utiliser un capteur solaire dit « sous vide », qui se présente sous la forme de tubes de faible diamètre (jusqu'à une quinzaine de centimètres) dans lesquels sont disposés les absorbeurs, de conception identique à celle d'un capteur plan. L'intérieur du tube est vidé de l'air qu'il contient et des pertes par convection entre l'absorbeur et la paroi vitrée du tube sont ainsi supprimées. L'intensité du vide est d'une importance décisive pour l'interruption du mécanisme de transfert thermique. Le capteur sous vide voit ainsi ses déperditions limitées au rayonnement infrarouge. Pour limiter les effets de celui-ci, la surface de l'absorbeur possède un revêtement « sélectif ». Illustration ci-dessous.

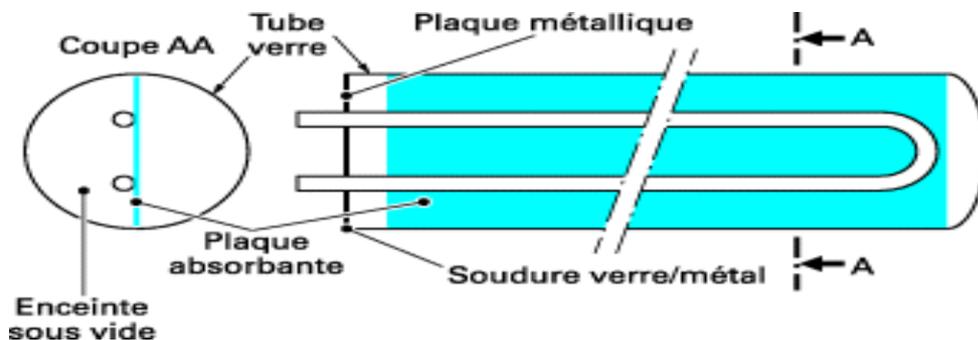


Figure (II-26) : Schéma de principe d'un capteur sous vide

Le fonctionnement du capteur est à des températures très élevées qui peuvent atteindre 150°C , du coup ces matériaux doivent résister à une telle température. Ainsi les tubes en cuivre ne doivent pas être soudés à l'étain.

a-Tubes sous vide à flux direct : Dans ce type de capteurs, le fluide caloporteur passe directement par l'absorbeur dans les tubes sous vide. Un rendement élevé est obtenu par ce transfert thermique direct.

b-Tubes sous vide à caloduc : le tube de l'absorbeur contient une petite quantité d'eau (ou d'un liquide différent selon les consignes de température). Ce liquide est vaporisé sous vide partiel ; cette vapeur s'élève dans le conduit de l'absorbeur, condense dans le condenseur et retourne sous forme liquide dans l'absorbeur. Le condenseur transfère la chaleur au fluide de transfert thermique.

II.2.2.4 Capteur vitré:

Les capteurs munis d'une couverture transparente, souvent appelés « capteurs vitrés », sont les plus utilisés, car ils correspondent au domaine d'application le plus courant : le chauffage de l'eau sanitaire. La température d'utilisation est en général inférieure à 70°C . Plus rarement, certains d'entre eux, munis d'une couverture transparente de type « double vitrage », permettent d'atteindre des températures de fonctionnement de l'ordre de 100°C .

Le capteur vitré est constitué de différents composants :

- Le coffre ;
- L'isolation thermique ;
- L'absorbeur ;
- La couverture transparente.

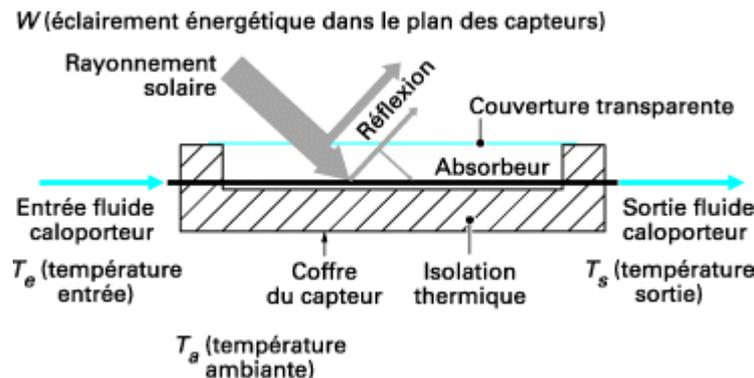


Figure (II-27) : Schéma de principe d'un capteur vitré

a-Coffre :

Il assure la protection à l'arrière du capteur et participe à sa rigidité. On peut distinguer deux grands principes de construction :

- Les coffres monoblocs (par exemple en tôle pliée ou en matériaux composites) dont la géométrie assure la tenue mécanique de l'ensemble du capteur.
- Les ensembles constitués de profilés périphériques (souvent en aluminium) sur lesquels est fixée une protection (feuille de métal ou de matière plastique) qui assure l'étanchéité arrière.

Les matériaux les plus utilisés, pour constituer le fond du coffre, sont le métal (tôle d'acier pré laquée ou d'aluminium) et les matières plastiques. Ils doivent présenter les caractéristiques suivantes : bonne tenue à la corrosion, faible prix de revient.

Les points de fixation des capteurs sur leurs supports font partie le plus souvent du coffre du capteur. Ces éléments doivent permettre de résister aux efforts à l'arrachement induits par le vent.

b-Isolation thermique :

L'isolation thermique (arrière et latérale) évite les déperditions thermiques du capteur par conduction. Elle est constituée d'un matériau isolant qui, dans certains cas, participe à la tenue mécanique du capteur. C'est le cas pour les coffres de type « sandwich » dans lequel l'isolant en mousse de polyuréthane est injecté entre deux parois rigides.

Dans un capteur solaire, l'isolation thermique est soumise à de très fortes contraintes. En effet, lorsque le capteur est exposé à un fort ensoleillement sans circulation de fluide caloporteur, l'absorbeur peut atteindre des températures très élevées, supérieures à 150°C. Ce phénomène, s'il se reproduit régulièrement, peut entraîner la destruction des isolants courants tels que les mousses de

polyuréthane. Le polystyrène expansé, dont la température limite d'utilisation est nettement inférieure à 100°C est à proscrire totalement.

Dans tout les cas, il est préférable d'éviter un contact direct entre l'absorbeur et l'isolant.

Les seuls isolants résistants à ces températures sont les mousses phénoliques, peu courantes et chères, et les laines minérales (laine de verre et surtout laine de roche qui présente l'avantage de ne pas absorber l'humidité).

L'isolation peut également être assurée par un complexe de deux composants (mousse de polyuréthane recouverte d'une couche de laine minérale en contact avec l'absorbeur).

A fin d'éviter que des condensats ne soient absorbés par l'isolant en laine minérale, il est judicieux de disposer, à la surface de celui-ci, une feuille d'étanchéité dont le matériau doit résister à la température de stagnation de l'absorbeur. Il importe également que sa matière soit compatible avec celle de l'absorbeur afin d'éviter des couples électrolytiques (éviter le contact aluminium-cuivre par exemple).

c-Absorbeur :

L'absorbeur est le composant qui permet de transformer le rayonnement solaire en chaleur et de transférer l'énergie thermique ainsi produite à un fluide caloporteur. L'absorbeur est généralement constitué d'un réseau de tubes soudés ou fixés mécaniquement sur une plaque conductrice. Figure ci-dessous.

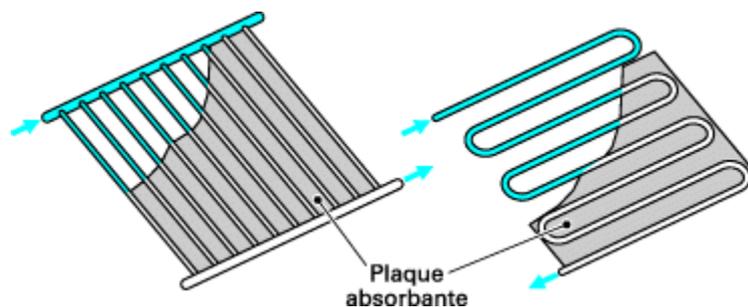
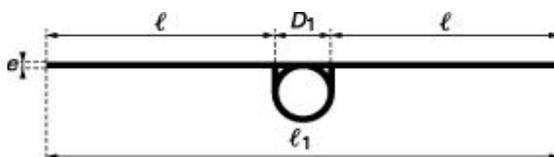


Figure (II-28) : Schéma de principe de la partie « absorbeur » d'un capteur vitré

Le matériau le plus utilisé est le cuivre, car il possède une bonne tenue à la corrosion et sa conductivité thermique est élevée. L'absorbeur peut être considéré comme une juxtaposition d'ailettes représentées sur la figure suivante.



- e épaisseur de l'absorbeur
- D_1 diamètre extérieur du tube
- l largeur de l'ailette
- l_1 largeur de l'ailette double

Plus rarement, on utilise l'acier inoxydable. Dans ce cas, l'absorbeur est constitué de deux feuilles planes qui, après déformation, sont soudées en leur périphérie et par points dans la partie centrale. Le

fluide circule entre ces deux parois et évacue ainsi l'énergie thermique. On désigne parfois ces absorbeurs par l'appellation « lame d'eau », figure ci-dessous.

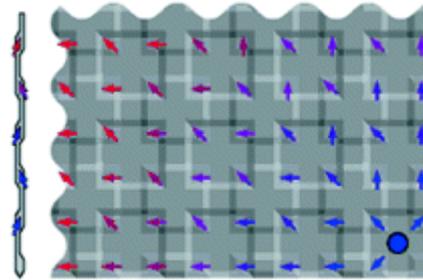


Figure (II-29) : Schéma de principe de fonctionnement de la partie « absorbeur » d'un capteur vitré

Lorsque l'absorbeur fonctionne à des températures moyennes (vers 70°C), les pertes par rayonnement deviennent importantes. Pour limiter celles-ci, l'absorbeur est recouvert d'un revêtement « sélectif », c'est-à-dire qu'il absorbe très bien le rayonnement solaire (coefficient d'absorption α voisin de l'unité) et possède un coefficient d'émission ε très faible, de l'ordre de 0.2.

Les revêtements les plus utilisés sont des dépôts électrolytiques à base de « chrome noir », de « nickel noir » ou de titane. Il existe des absorbeurs dont le revêtement est réalisé à partir d'une simple peinture noire. Dans ce cas, le coefficient d'émission est voisin de l'unité et on parle de capteur « non sélectif ».

d-Couverture transparente :

Elle a la double fonction de laisser passer le maximum de rayonnement solaire et d'éviter le refroidissement de l'absorbeur, en réduisant les phénomènes de convection de l'air et en « bloquant » le rayonnement infrarouge (effet de serre).

Les matériaux les plus utilisés sont le verre trempé (pour réduire les risques d'accident en cas de bris). Les matériaux de synthèse (polycarbonate, fluorure de polyvinyle), qui ont presque complètement disparu pour des raisons de prix et de tenue au vieillissement.

Le vitrage est fixé sur le coffre du capteur soit de façon mécanique (joint d'étanchéité), soit collé directement sur le coffre. C'est cette dernière solution qui est mise en œuvre sur les capteurs de conception récente. La transmission énergétique correspond au pourcentage du flux d'énergie solaire transmis directement à travers le verre. Une partie du rayonnement solaire est réfléchi par les parois du **vitrage**, tandis qu'une autre partie est absorbée par celui-ci, transformée en chaleur en entraînant une augmentation de sa température. Le vitrage émet alors sur ses deux faces un rayonnement infrarouge. Le facteur solaire (transmission énergétique totale) représente la somme des transmissions optiques et infrarouges, figure ci-dessous.

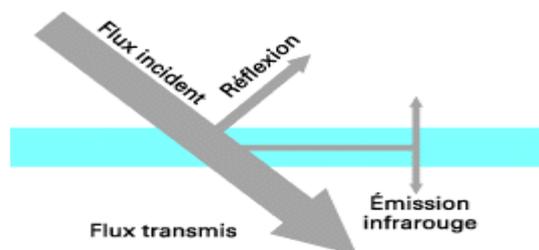


Figure (II-30) : Schéma de principe de la partie « couverture transparente » d'un capteur vitré.

II.2.2.5 Rendements des capteurs:

Chaque type de capteur « sans vitrage », « vitré standard », « vitré sélectif » et « sous vide » correspond à des domaines d'utilisation particuliers. La différence à attendre entre la température moyenne des capteurs et l'air ambiant pour le type de dimensionnement est le critère de choix du type de capteur. Il influe sur le rendement des capteurs. Plus la température de service du capteur est importante, plus les performances et donc la puissance fournie par les capteurs à tube sous vide sera élevée par rapport aux capteurs plats. Le rendement d'un capteur est le rapport entre l'énergie (la chaleur) extraite en sortie du capteur est le rapport à l'entrée (ensoleillement). Ce paramètre n'a pas de dimension, donc pas d'unité ; il est habituellement donné en %. cependant d'autres quantités ayant des unités peuvent être employées.

Le modèle mathématique le plus fréquemment utilisé, qui figure aussi dans la norme EN 12975, décrit le rendement d'un capteur comme suit.

$$\eta = B - K \frac{(I_m - I_a)}{W} - K' \frac{(I_m - I_a)^2}{W} \quad \text{Avec : } B = F' \cdot \tau \cdot \alpha$$

Tableau (II.3) : Définitions des paramètres intervenants dans le calcul du rendement d'un capteur solaire thermique.

| Abréviation | Unit | Description | Value |
|----------------|--------------------------------------|--|-------------|
| η | % | Rendement du capteur | |
| B | % | Rendement du capteur sans déperdition « rendement optique » | |
| K | W/ (m ² .k) | Coefficient linéaire de transfert thermique | 1.2-4 |
| K' | W/ (m ² .k ²) | Coefficient quadratique de transfert thermique | 0.005-0.015 |
| I _m | °C | Température moyenne de l'absorbeur (entrée et sortie) | |
| I _a | °C | Température ambiante dans l'environnement du capteur | |
| W | W/m ² | Puissance de l'irradiation solaire mesurée dans le plan du capteur | 1000 |
| F' | % | Facteur de rendement de capteur | 0.92-0.97 |
| τ | % | Facteur de transmission de couverture | 0.88-0.91 |
| α | % | Absorptivité de l'absorbeur | 0.90-0.96 |

B est le rendement du capteur lorsque la différence entre la température moyenne de l'absorbeur et la température ambiante est nulle. Si le capteur est à la température ambiante, il n'y a aucune déperdition thermique et l'expression associée, dans la formule, devient zéro. Dans ce cas seules les pertes optiques sont à prendre en compte. Le facteur B est donc également appelé le « rendement optique » ou « rendement à température ambiante ».

Les déperditions thermiques du capteur sont décrites par les deux coefficients K et K' de transfert thermique ; K représente la perte thermique linéaire, et K' la perte thermique quadratique, qui augmente avec la différence de température entre le capteur et l'environnement. Plus les coefficients de transfert thermique du capteur sont élevés, plus son rendement décroît quand la température augmente. A base de l'expression du rendement, on obtient une courbe caractéristique pour chaque type de capteur.

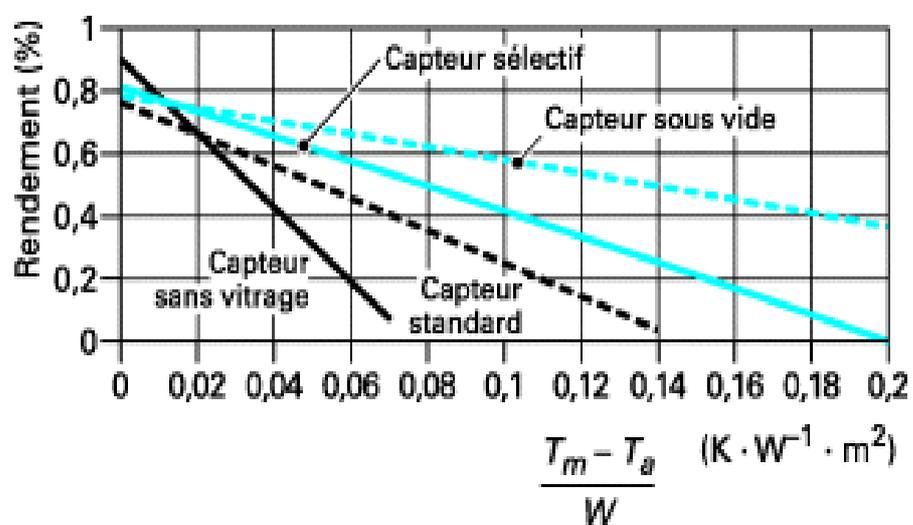


Figure (II-31) : Courbe caractéristique de chaque type de capteur thermique

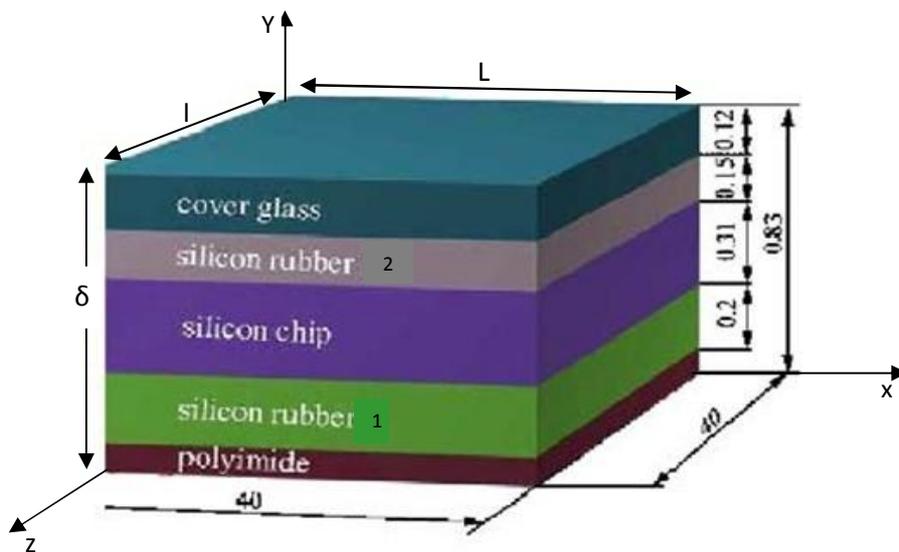
Chapitre III

Formulation du problème des contraintes
thermiques dans un panneau solaire
photovoltaïque

Etudier, dans des conditions données, l'équilibre d'un système élastique, c'est trouver le champ de contraintes et de déformations (ou déplacements) des différents points à partir de la configuration de référence supposée connue.

Dans ce travail, on cherche la distribution instantanée des contraintes thermiques développées sur la structure d'un panneau solaire photovoltaïque soumis à un champ de température variable en fonction de l'apport de chaleur reçu (rayonnement solaire).

La structure du panneau solaire à étudier est composée de trois couches d'épaisseurs différentes telles que le verre, la cellule solaire (silicium) et le film polyamide. Ces couches sont caractérisées par leurs propriétés élastiques et thermiques (module d'élasticité, coefficient de poisson et coefficient de dilatation thermique). Elles sont collées entre elles au moyen d'une couche de liaison (caoutchouc en silicium).



- cover glass : couverture de verre.
- silicon rubber2 : caoutchouc en silicium2.
- silicon chip : puce en silicium.
- silicon rubber1 : caoutchouc en silicium1.
- polyamide : film polyamide.
- L : longueur du panneau solaire PV.
- l : largeur du panneau solaire PV.
- δ : épaisseur du panneau solaire

Figure (III-1) : Structure du panneau solaire photovoltaïque à étudier

III.1 Equations associées au problème posé:

1-équation d'équilibre : $\sigma_{ij,j} + \bar{f}_i = \rho \gamma_i$
(1)

$\sigma_{ij,j}$: divergence du tenseur des contraintes.

\bar{f}_i : forces volumiques extérieures.

$\rho \gamma_i$: forces d'inertie (où γ_i composantes du vecteur accélération).

2-Relations (déformations-déplacements) :

$$\epsilon_{ij} = [\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i] / 2.$$

(2)

3-Loi de comportement thermo élastique linéaire :

$$\sigma_{ij} = [\lambda \epsilon_{kk} - \beta(T - T^0)] \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}$$

(3)

Ou sous une autre forme :

$$\epsilon_{ij} = [(1+\nu)/E] \cdot \sigma_{ij} - [(\nu/E) \cdot \sigma_{kk} - \alpha(T - T^0)] \delta_{ij}$$

(4)

σ_{ij} , ϵ_{ij} et δ_{ij} : champ de contraintes, champ de déformations et tenseur unité, respectivement. Avec

$$\epsilon_{ij} = [\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i] / 2$$

ϵ_{kk} , σ_{kk} : sont les traces du tenseur de déformations et du tenseur de contraintes, respectivement.

λ , μ : coefficients de lamé.

E , ν : module d'élasticité et coefficient de poisson.

Où :

$$\mu = E/2(1+\nu). \lambda = \nu \cdot E / (1+\nu) (1-2\nu).$$

β , α : coefficients de dilatation thermique, avec :

$$\alpha = \beta / (3\lambda + 2\mu).$$

III.2 Hypothèses possibles: problème d'élastostatique avec dilatation thermique.

1-matériaux isotropes.

2- la rigidité des matériaux reste constante le long de la longueur de la structure du panneau solaire.

3-champ de température uniforme.

4-les distributions des contraintes normales et tangentielles sont uniformes le long de l'épaisseur (axes-y).

5-les distributions des contraintes normales et tangentielles sont uniformes suivant la largeur (axes-z).

6-toute la déformation tangentielle se concentre dans la couche adhésive j.

III.3 Etablissement de la méthode analytique:

III.3.1 Objet d'étude:

La figure 1 montre la face (longueur, épaisseur) de la structure du panneau solaire, où δ_i , E_i et α_i représentent l'épaisseur, le module d'élasticité et le coefficient de dilatation thermique d'i-matériaux des couches collées, respectivement ; δ_{cj} et G_j représentent l'épaisseur et le module de cisaillement de j-couche adhésive, respectivement ; L et δ représentent la longueur et l'épaisseur de la structure, respectivement. $i=1, 2, 3, j=1, 2$.

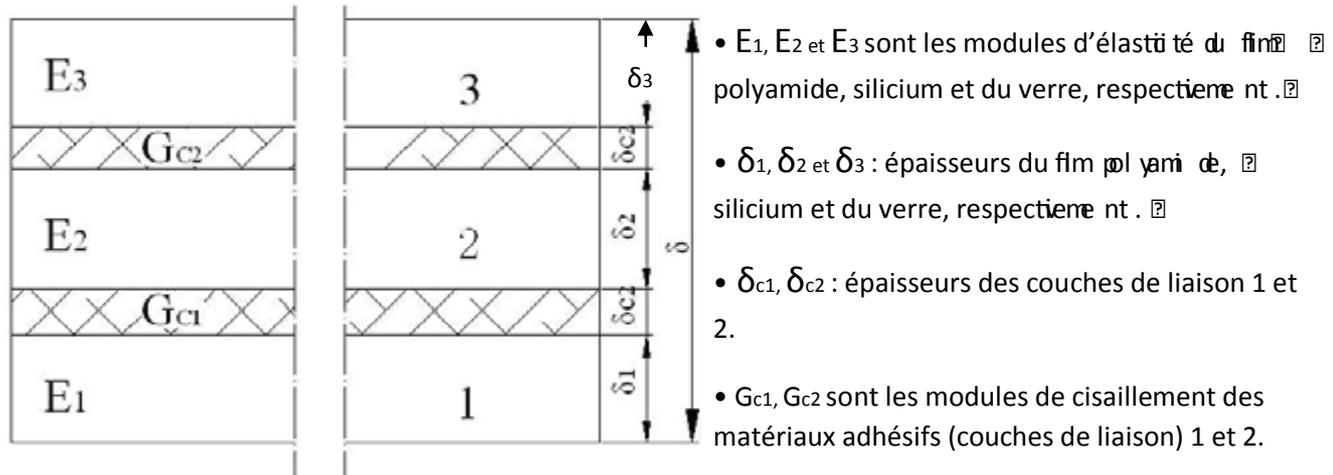


Figure (III-2) : Schéma de profil de la structure du panneau solaire photovoltaïque

III.3.2 Equations du problème:

L'état de contraintes de la structure a été étudié en se basant sur les hypothèses ci-dessus. Le système de coordonnées a été mis selon la figure (III -3a). N_{i0} et N_{in} sont les forces de surface par unité de largeur appliquées sur les deux cotés à la fois d'i-matériaux collés, respectivement. la figure (III -3b) montre les forces appliquées sur un élément dx de la structure, où N_{ix} est la force par unité de largeur appliquée sur la fin gauche d'élément dx . La figure (III -3b) montre la contrainte de cisaillement Q_i par unité de largeur appliquée sur la couche adhésive j après déformation, les déplacements U_i à gauche d'i-matériaux collés après déformation ($x=0$) et l'angle de déplacement γ_j de la couche adhésive j après déformation, où le radian a été pris comme unité de γ_j .

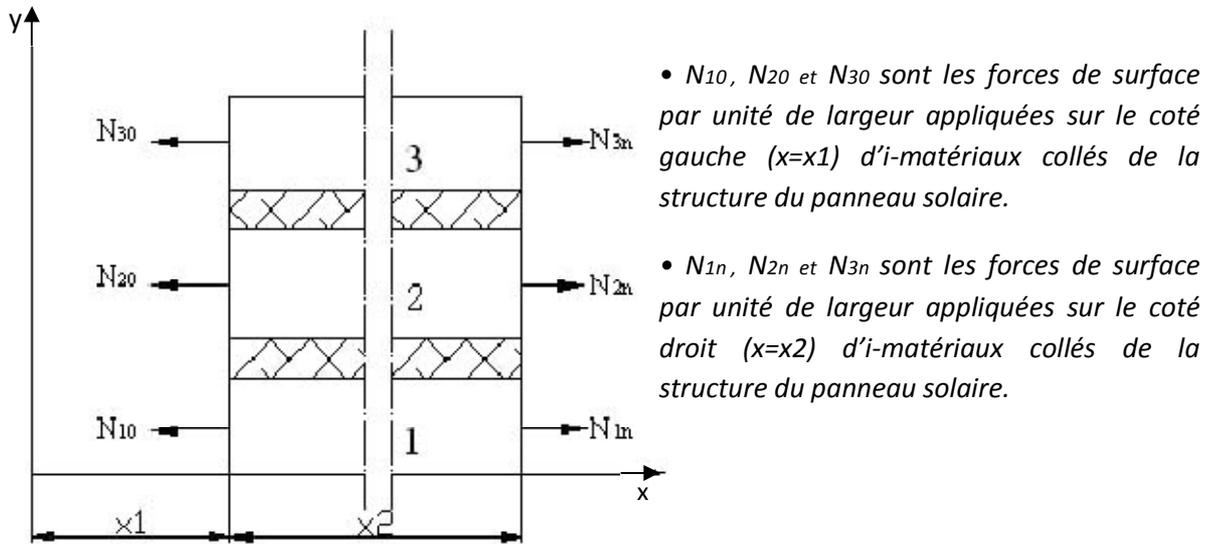


Figure (III-3a) Avant déformation ; forces appliquées sur la structure du panneau solaire

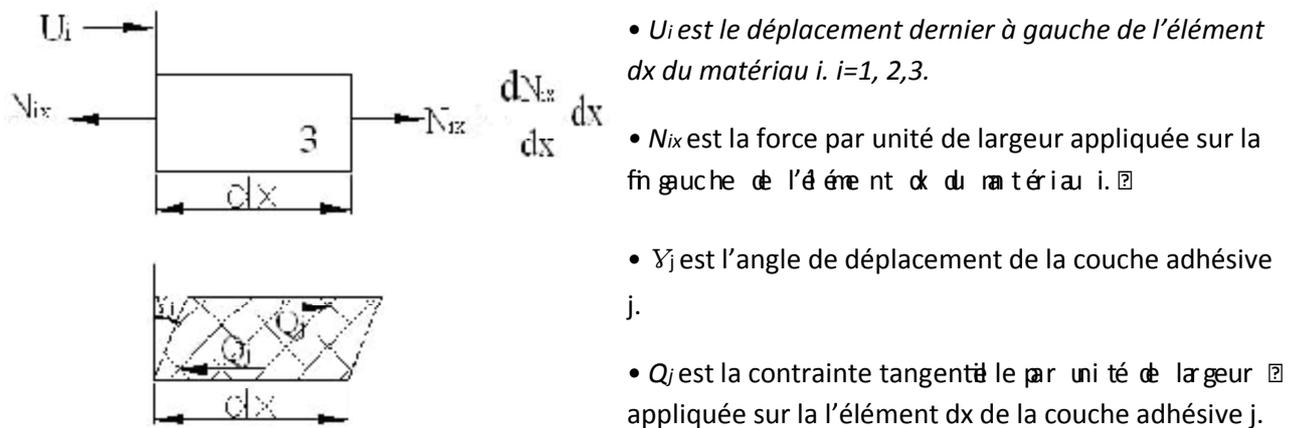


Figure (III-3b) Après déformation ; forces (par unité de largeur) appliquées sur l'élément (dx) de la structure

L'élément dx a été choisi comme objet analytique, forces surfaciques appliquées sur i-matériaux collés après déformation a été étudiée. Equation d'équilibre obtenue est montrée dans le système d'équation (1).

Système d'équations :

(1)

$$dN_{1x} / dx + Q_1 = 0$$

$$dN_{2x} / dx + Q_2 - Q_1 = 0$$

$$dN_{3x} / dx - Q_2 = 0.$$

Si on applique l'équation d'équilibre sur L'élément dx de toute la structure du panneau. On obtient alors les équations suivantes :

$$N_{1x} + N_{2x} + N_{3x} = N_{10} + N_{20} + N_{30} = N_{1n} + N_{2n} + N_{3n} \quad (2)$$

Le petit angle peut être remplacé par la valeur de radian basée sur la trigonométrie, donc l'équation suivante a été obtenue :

$$Y_j = (U_{(i+1)x} - U_{(i)x}) / \delta_{cj} \quad (3)$$

Il peut être connu à partir de la définition de la contrainte de cisaillement, le glissement défini comme suit:

$$Y_j = Q_i / G_{cj} \quad (4)$$

Suivant la relation déplacement-déformation, on déduit l'expression de la déformation normale d'i-matériaux collés $\epsilon_{xx(i)}$.

$$\epsilon_{xx(i)} = \partial U_{ix} / \partial x \quad (5)$$

On reprend l'expression de la loi thermo élastique linéaire :

$$\epsilon_{ij} = (1+\nu)/E \sigma_{ij} - ((\nu/E) \cdot \sigma_{kk} - \alpha \cdot (T-T^{\circ})) \delta_{ij} \text{ .on définit la déformation normale suivant x:}$$

$$\epsilon_{xx} = (1+\nu)/E \cdot \sigma_{xx} - (\nu/E \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) - \alpha \cdot (T-T^{\circ})) \cdot \delta_{xx} \text{ . Pour un problème plan :}$$

$$\epsilon_{xx} = (1+\nu)/E \cdot \sigma_{xx} - (\nu/E \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - \alpha \cdot (T-T^{\circ})) \cdot \delta_{xx} = 1 \cdot \sigma_{zz} = 0 \text{ . On simplifie l'équation :}$$

$$\epsilon_{xx} = \sigma_{xx} / E - (\nu/E) \cdot \sigma_{yy} + \alpha \cdot (T-T^{\circ}) \text{ . Si on néglige l'influence du coefficient de poisson}$$

($\nu \ll E$), on obtient

$$\epsilon_{xx} = \sigma_{xx} / E + \alpha \cdot (T-T^{\circ}) \text{ . d'où l'expression finale de la déformation normale suivant x d'i-}$$

$$\text{matériaux collés } \epsilon_{xx(i)} \text{ .} \quad \epsilon_{xx(i)} = \sigma_{xx(i)} / E_i + \alpha_i \cdot (T-T^{\circ}) \quad \text{on posant : } \sigma_{xx(i)} = N_{ix} / \delta_i \text{ .}$$

$$\text{on a alors } \epsilon_{xx(i)} = N_{ix} / (\delta_i \cdot E_i) + \alpha_i \cdot (T-T^{\circ})$$

(6)

En résolvant le système d'équations (3), (4) et (5), relations suivantes ont été obtenues :

$$\epsilon_{xx(i+1)} - \epsilon_{xx(i)} = (\delta_{cj}/G_{cj}).(dQ_i/dx) \quad (7)$$

Posons $P_i = 1/(\delta_i.E_i)$, $P_{cj} = \delta_{cj}/G_{cj}$. équation (6) mise dans l'équation (7), relation suivante est obtenue :

$$P_{cj}.dQ_i/dx = P_{i+1}.N_{(i+1)x} - P_i.N_{ix} + (\alpha_{i+1} - \alpha_i).(T-T^\circ) \quad (8)$$

Après dérivation du système d'équations d'équilibre (1), le système d'équations différentielles suivant est obtenu :

$$d^2N_{1x}/dx^2 + dQ_1/dx = 0$$

$$d^2N_{2x}/dx^2 + dQ_2/dx - dQ_1/dx = 0 \quad (9)$$

$$d^2N_{3x}/dx^2 - dQ_2/dx = 0$$

En résolvant le système d'équations (2), (8) et (9). On obtient une équation finale à un seul inconnu.

III.3.3 Equation finale:

De l'équation (8) :

$$\begin{aligned} P_{c1}.dQ_1/dx &= P_2.N_{2x} - P_1.N_{1x} + (\alpha_2 - \alpha_1).(T - T^\circ) \\ P_{c2}.dQ_2/dx &= P_3.N_{3x} - P_2.N_{2x} + (\alpha_3 - \alpha_2).(T - T^\circ) \end{aligned} \quad (10)$$

En résolvant les deux systèmes d'équations (8) et (10), système suivant est obtenu.

$$P_{c1}.(-d^2N_{1x}/dx^2) = P_2.N_{2x} - P_1.N_{1x} + (\alpha_2 - \alpha_1).(T - T^\circ) \quad (*)$$

$$-P_{c2}.(d^2N_{1x}/dx^2 + d^2N_{2x}/dx^2) = P_3.N_{3x} - P_2.N_{2x} + (\alpha_3 - \alpha_2).(T - T^\circ) \quad (**)$$

On définit : $a_1 = (\alpha_2 - \alpha_1).(T - T^\circ)$, $a_2 = (\alpha_3 - \alpha_2).(T - T^\circ)$.

On tire N_{2x} de l'équation (*).

$$N_{2x} = (P_1.N_{1x})/P_2 - a_1/P_2 - [P_{c1}.(d^2N_{1x}/dx^2)]/P_2$$

On tire aussi N_{3x} de l'équation (2).

$$N_{3x} = \sum N_{i0} - (N_{1x} + N_{2x}), \quad i=1 \text{ à } 3.$$

On remplace les deux expressions dans l'équation (**). On obtient après simplification une équation différentielle du 4^{ème} ordre à coefficient constant.

$$A_4 \cdot (d^4 N_{1X} / dx^4) + A_3 \cdot (d^2 N_{1X} / dx^2) + A_2 \cdot N_{1X} = A_1.$$

$$\text{Avec: } A_4 = (P_{c1} \cdot P_{c2}) / P_2. \quad A_3 = -P_3 \left[P_{c1} \cdot \sum_{i=2 \text{ à } 3} (1 / P_i) + (P_{c2} / P_3) \cdot \sum_{i=1 \text{ à } 2} (P_1 / P_i) \right].$$

$$A_2 = P_3 \cdot \sum_{i=1 \text{ à } 3} (P_1 / P_i). \quad A_1 = a_1 + a_2 + P_3 \cdot [\sum N_{i0} + (a_1 / P_2)]$$

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes
thermiques dans un panneau solaire
photovoltaïque

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

On considère donc le panneau solaire défini au chapitre précédent

IV.1 Résolution semi-analytique:

L'équation finale obtenue : $A_4 \cdot (d^4 N_{1x} / dx^4) + A_3 \cdot (d^2 N_{1x} / dx^2) + A_2 \cdot N_{1x} = A_1$.

On postule la solution suivante de l'équation différentielle ci-dessus.

$N_{1x} = (A_1 / A_2) + C_1 \cdot \exp(K_{1,x}) + C_2 \cdot \exp(K_{2,x}) + C_3 \cdot \exp(-K_{1,x}) + C_4 \cdot \exp(-K_{2,x})$.

Où:

$$K_1 = -(\sqrt{2} / (2 \cdot A_4)) \cdot \sqrt{-A_4 \cdot (A_3 + \sqrt{A_3^2 - (4 \cdot A_4 \cdot A_2)})}$$

$$K_2 = -(\sqrt{2} / (2 \cdot A_4)) \cdot \sqrt{-A_4 \cdot (A_3 - \sqrt{A_3^2 - (4 \cdot A_4 \cdot A_2)})}$$

Pour déterminer les autres fonctions N_{2x} et N_{3x} , on a les deux systèmes d'équations (9) et (10) :

$$d^2 N_{1x} / dx^2 = -dQ_1 / dx$$

$$d^2 N_{2x} / dx^2 = dQ_1 / dx - dQ_2 / dx \quad (9)$$

$$d^2 N_{3x} / dx^2 = dQ_2 / dx$$

$$P_{c1} \cdot dQ_1 / dx = P_2 \cdot N_{2x} - P_1 \cdot N_{1x} + (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot (T - T^\circ) \quad (10 \text{ a})$$

$$P_{c2} \cdot dQ_2 / dx = P_3 \cdot N_{3x} - P_2 \cdot N_{2x} + (\alpha_3 - \alpha_2) \cdot (T - T^\circ)$$

On remplace \mathbf{a}_1 et \mathbf{a}_2 précédemment définis (chapitre III) dans le système d'équation (10).

$$P_{c1} \cdot dQ_1 / dx = P_2 \cdot N_{2x} - P_1 \cdot N_{1x} + \mathbf{a}_1 \quad (10 \text{ b})$$

$$P_{c2} \cdot dQ_2 / dx = P_3 \cdot N_{3x} - P_2 \cdot N_{2x} + \mathbf{a}_2$$

En résolvant les deux premières équations des systèmes (9) et (10), on obtient l'équation suivante :

$$P_{c1} \cdot (-d^2 N_{1x} / dx^2) = P_2 \cdot N_{2x} - P_1 \cdot N_{1x} + \mathbf{a}_1 \text{ D'où:}$$

$$N_{2x} = (P_{c1} / P_2) \cdot (-d^2 N_{1x} / dx^2) + (P_1 / P_2) \cdot N_{1x} - (\mathbf{a}_1 / P_2) \quad (11)$$

De l'équation finale: on a : $N_{1x} = (A_1 / A_2) + C_1 \cdot \exp(K_{1,x}) + C_2 \cdot \exp(K_{2,x}) + C_3 \cdot \exp(-K_{1,x}) + C_4 \cdot \exp(-K_{2,x})$.

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

D'où:

$$d^2N_{1x}/dx^2 = K_1^2 \cdot (C_1 \cdot \exp(K_1 \cdot x) + C_3 \cdot \exp(-K_1 \cdot x)) + K_2^2 \cdot (C_2 \cdot \exp(K_2 \cdot x) + C_4 \cdot \exp(-K_2 \cdot x)).$$

On remplace l'expression de N_{1x} et de d^2N_{1x}/dx^2 dans l'équation (12), on obtient l'expression finale de N_{2x} .

$$N_{2x} = (A_1 \cdot P_1 / A_2 \cdot P_2) - (a_1 / P_2) + R_1 \cdot C_1 \cdot \exp(K_1 \cdot x) + R_2 \cdot C_2 \cdot \exp(K_2 \cdot x) + R_1 \cdot C_3 \cdot \exp(-K_1 \cdot x) + R_2 \cdot C_4 \cdot \exp(-K_2 \cdot x).$$

$$tq : R_{(i)} = -(P_{c1} / P_2) \cdot K_{(i)}^2 + (P_1 / P_2).$$

En résolvant la deuxième équation du système (10) et le système (9), on obtient l'équation suivante :

$$N_{3x} = - (P_{c2} / P_3) \cdot (d^2N_{1x}/dx^2 + d^2N_{2x}/dx^2) + (P_2 / P_3) \cdot N_{2x} - (a_2 / P_3). \quad (12)$$

On déduit l'expression de d^2N_{2x}/dx^2 à partir de l'expression N_{2x} .

$$d^2N_{2x}/dx^2 = R_1 \cdot K_1^2 \cdot C_1 \cdot \exp(K_1 \cdot x) + R_2 \cdot K_2^2 \cdot C_2 \cdot \exp(K_2 \cdot x) + R_1 \cdot K_1^2 \cdot C_3 \cdot \exp(-K_1 \cdot x) + R_2 \cdot K_2^2 \cdot C_4 \cdot \exp(-K_2 \cdot x).$$

On remplace les expressions N_{2x} , d^2N_{1x}/dx^2 et d^2N_{2x}/dx^2 dans l'équation (12), on obtient l'expression finale de N_{3x} .

$$N_{3x} = (A_1 \cdot P_1 / A_2 \cdot P_3) - ((a_1 + a_2) / P_3) + S_1 \cdot C_1 \cdot \exp(K_1 \cdot x) + S_2 \cdot C_2 \cdot \exp(K_2 \cdot x) + S_1 \cdot C_3 \cdot \exp(-K_1 \cdot x) + S_2 \cdot C_4 \cdot \exp(-K_2 \cdot x).$$

$$tq : S_{(i)} = -(P_{c2} / P_3) \cdot K_{(i)}^2 \cdot (1 + R_{(i)}) + (P_2 / P_3) \cdot R_{(i)}$$

Soit N_{1x} , N_{2x} et N_{3x} les forces de surfaces par unité de largeur appliquées sur l'élément dx de chacun des trois matériaux collés de la structure du panneau solaire, à savoir le polyamide, le silicium et la couverture de verre, respectivement. (fig. (3-3a))

On a les contraintes normales thermiques développées sur chacun des trois matériaux suivant la direction x (direction de la longueur de la structure) $\sigma_{xx(i)}$. Pour le polyamide, on écrit l'expression de ces contraintes normales :

$$\sigma_{xx(1)} = N_{1x} / \delta_1. \quad tq: \delta_1 \text{ représente l'épaisseur du film polyamide.}$$

De même pour la cellule solaire (silicium) et la couverture de verre, on a :

$$\sigma_{xx(2)} = N_{2x} / \delta_2. \quad tq: \delta_2 \text{ représente l'épaisseur de la cellule solaire.}$$

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

$\sigma_{xx(3)} = N_{3x}/\delta_3$. tq: δ_3 représente l'épaisseur de la couverture de verre.

On a les contraintes tangentielles thermiques développées sur chacune des couches de liaison 1et2 (caoutchouc en silicium 1et2) suivant la direction x (direction de la longueur de la structure) $\tau_{xy(j)}$.

Pour la première couche de liaison, soit celle mise entre le polyamide et la cellule solaire, la contrainte tangentielle $\tau_{xy(1)}$ s'écrit selon le système d'équations d'équilibre (1):

$$\tau_{xy(1)} = Q_1 = -dN_{1x}/dx.$$

Pour la deuxième couche de liaison, soit celle mise entre la cellule solaire et la couverture de verre, la contrainte tangentielle $\tau_{xy(2)}$ s'écrit selon le système d'équations d'équilibre (1):

$$\tau_{xy(2)} = Q_2 = dN_{3x}/dx.$$

Pour déterminer les coefficients $C(i)$ (tq $i=1, 2, 3$ et4) et tracer ensuite les courbes des contraintes normales $\sigma_{xx(i)}$ ($i=1,2$ et3) et tangentielles $\tau_{xy(j)}$ ($j=1$ et2), nous avons les conditions aux limites suivantes :

Pour $x=0$, soit le coté gauche de la structure du panneau solaire :

On a les forces de surfaces par unité de largeur N_{ix} sont nulles. $N_{10}=N_{20}=N_{30}=0$.

De même pour $x=L$, soit le coté droit de la structure du panneau solaire :

On a les forces de surfaces par unité de largeur N_{ix} sont nulles. $N_{1n}=N_{2n}=N_{3n}=0$.

Pour des raisons d'exactitude, on choisit de faire un programme « MATLAB » pour calculer les coefficients $C(i)$ et tracer les courbes des contraintes normales $\sigma_{xx(i)}$ ($i=1,2$ et3) et tangentielles $\tau_{xy(j)}$ ($j=1$ et2).

Une fois le programme est établi, l'effet de la température, de l'aspect géométrique et des caractéristiques thermo élastiques des matériaux constitutifs du panneau solaire photovoltaïque sur les contraintes thermiques maximales peut être étudié. Ceci est possible en jouant sur les paramètres d'entrés du programme, à savoir la température instantanée du panneau, données géométriques, modules d'élasticité et de cisaillement et les coefficients de dilatation thermique.

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

IV.2 Programme « MATLAB » permettant de tracer les courbes des contraintes thermiques normales et tangentielles déterminées analytiquement:

```
clear all
close all
clc
%coefficient de dilatation thermique des trois matériaux constitutifs du panneau solaire (polyamide, silicium et
le verre, respectivement)
alpha=[17.7e-6 2.5e-6 0.6e-6];
% épaisseurs des trois matériaux constitutifs du panneau solaire (polyamide, silicium et le verre,
respectivement)
delta=[0.05 0.31 0.12];
%modules d'élasticité des trois matériaux constitutifs du panneau solaire (polyamide, silicium et le verre,
respectivement)
E=[1600 180000 55000];
%modules de cisaillement des matériaux adhésifs (caoutchouc en silicium 1et2, respectivement)
Gc=[0.93 0.97];
%longueur de la structure du panneau solaire photovoltaïque
L=40;
%écart de température (gradT=T-T0),
T0 : température de référence, T0=0°C.
T : température instantanée du panneau solaire
gradT=100;
%épaisseurs des matériaux adhésifs (caoutchouc en silicium 1 et2, respectivement)
deltac=[0.2 0.15];
% vecteur a
for i=1:2
    a(i,:)=(alpha(i+1)-alpha(i))*gradT;
end
format long, a
% vecteur p
for i=1:3
    p(i,:)=1/(delta(i)*E(i));
end
format long, p
% vecteur pc
for i=1:2
    pc(i,:)=deltac(i)/Gc(i);
end
format long, pc
% constantes A(i)
format long, A1=p(3)*((a(1)/p(2)) + ((a(1)+a(2))/p(3)))
format long, A2=p(3)*((p(1)/p(1)) + (p(1)/p(2)) + (p(1)/p(3)))
format long, A3=-p(3)*(pc(1)*((1/p(2)) + (1/p(3))) + (pc(2)/p(3))*((p(1)/p(1)) + (p(1)/p(2))))
format long, A4= (pc(1)*pc(2))/p(2)
% constantes K(i)
format long, K1=-((sqrt(2)*sqrt(-A4*(A3 + sqrt((A3^2)-(4*A4*A2)))))/(2*A4)
format long, K2=-((sqrt(2)*sqrt(-A4*(A3 - sqrt((A3^2)-(4*A4*A2)))))/(2*A4)
% vecteur K
K=[K1 K2];
% constantes U(i)
format long, U1=-A1/A2
format long, U2=-((p(1)*A1)/(p(2)*A2)+(a(1)/p(2))
format long, U3=-((p(1)*A1)/(p(3)*A2))+((a(1)+a(2))/p(3))
% vecteur U
U=[U1 U2 U1 U2];
% vecteur R
```

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

```
for i=1:2
    R(i,:)=-(pc(1)/p(2))*(K(i)^2)+(p(1)/p(2));
end
format long, R
% vecteur S
for i=1:2
    S(i,:)=-(pc(2)/p(3))*(K(i)^2)*(1+R(i))+((p(2)/p(3))*R(i));
end
format long, S
% matrice A
A=[exp(0) exp(0) exp(0) exp(0);
    R(1) R(2) R(1) R(2);
    exp(K(1)*1) exp(K(2)*1) exp(-K(1)*1) exp(-K(2)*1);
    R(1)*exp(K(1)*1) R(2)*exp(K(2)*1) R(1)*exp(-K(1)*1) R(2)*exp(-K(2)*1)];
format long, A
% coefficient (ci)
disp('le vecteur c est')
c=inv(A)*U
% variation de x (direction de la longueur)
x=0:1:40;
% fonction des contraintes normales dans le matériau1 (polyamide).
On pose  $\sigma_{xx(1)}=\sigma_1$ .
sigma1=(1/delta(1))*(c(1)*exp(K(1)*x)+c(2)*exp(K(2)*x)+c(3)*exp(K(1)*x)+
c(4)*exp(-K(2)*x)-U1);
% fonction des contraintes normales dans le matériau2 (silicium).
On pose  $\sigma_{xx(2)}=\sigma_2$ .
sigma2=(1/delta(2))*(R(1)*c(1)*exp(K(1)*x)+ R(2)*c(2)*exp(K(2)*x)+ R(1)*c(3)*exp(-K(1)*x)+
R(2)*c(4)*exp(-K(2)*x)-U2);
% fonction des contraintes normales dans le matériau3 (verre).
On pose  $\sigma_{xx(3)}=\sigma_3$ .
sigma3=(1/delta(3))*(S(1)*c(1)*exp(K(1)*x)+ S(2)*c(2)*exp(K(2)*x)+ S(1)*c(3)*exp(-K(1)*x)+
S(2)*c(4)*exp(-K(2)*x)-U3);
% fonction des contraintes tangentielles dans le matériau adhésif1.
On pose  $\tau_{xy(1)}=\tau_1$ .
tau1=-K(1)*((c(1)*exp(K(1)*x)-(c(3)*exp(-K(1)*x)))-K(2)*((c(2)*exp(K(2)*x)-(c(4)*exp(-K(2)*x))));
% fonction des contraintes tangentielles dans le matériau adhésif2.
On pose  $\tau_{xy(2)}=\tau_2$ .
tau2=K(1)*((c(1)*S(1)*exp(K(1)*x)-(c(3)*S(1)*exp(K(1)*x)))+
K(2)*((c(2)*S(2)*exp(K(2)*x)-(c(4)*S(2)*exp(-K(2)*x))));
figure(1)
plot(x, sigma1,'r'), grid
title('contraintes normales matériau 1')
xlabel('x')
ylabel('sigma')
figure(2)
plot(x, sigma2,'b'), grid
title('contraintes normales matériau 2')
xlabel('x')
ylabel('sigma2')
figure(3)
plot(x, sigma3,'g'), grid
title('contraintes normales matériau 3')
xlabel('x')
ylabel('sigma3')
figure(4)
plot(x, tau1,'r--'), grid
```

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

```
title ('contraintes tangentielles matériau adhésif1')
xlabel ('x')
ylabel ('tau1')
figure (5)
plot (x, tau2, 'b--'), grid
title ('contraintes tangentielles matériau adhésif2')
xlabel ('x')
ylabel ('tau2')
```

IV.3 L'effet de la température de la structure du panneau solaire photovoltaïque sur l'évolution des contraintes thermiques:

- On obtient Pour chacun des trois matériaux du panneau solaire (polyamide, silicium et le verre) un ensemble de courbes superposées sur le même graphe ($\sigma_{xx(i)}, x$). Chaque courbe correspond à une température du panneau solaire donnée. On fixe une température de référence $T_0=0$ °C.
- Cette superposition montre l'évolution des contraintes normales $\sigma_{xx(i)}$ du matériau(i) suite à la variation de la température du panneau solaire soumis à la radiation solaire. Dans ce travail, on prend quatre valeurs différentes de la température ($T=30^\circ\text{C}$, $T=60^\circ\text{C}$, $T=90^\circ\text{C}$, $T=120^\circ\text{C}$) et voir la différence entre les quatre courbes correspondantes des contraintes normales σ_{xx} de chaque matériau mentionné ci-dessus.

Pour le polyamide, on a la figure suivante :

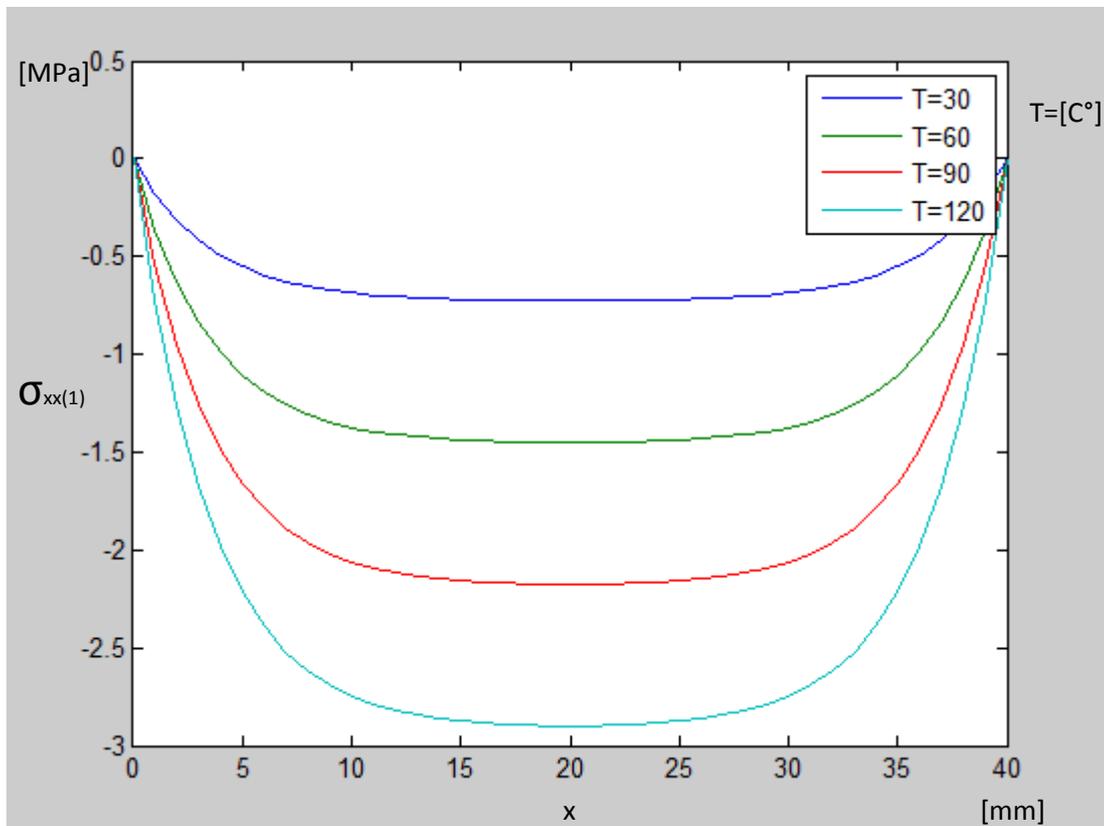


Figure (IV -1a): Evolution des contraintes normales suivant la longueur de la structure (axe x) $\sigma_{xx(1)}$ du film polyamide en fonction de la température du panneau solaire

- On montre la variation de la contrainte normale maximale (à $x=20$) et de la contrainte normale à $x=5$ en fonction de l'écart de température enregistré au niveau du panneau solaire instantanément suite à l'apport de chaleur reçu par le rayonnement solaire. On trace la courbe ($\sigma_{xx(1)}, \Delta T$) en utilisant les données du tableau (IV.1) suivant tirées du programme « MATLAB » :

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

| T : température instantanée du panneau solaire. | 0°C | 30°C | 60°C | 90°C | 120°C |
|--|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\sigma_{xx(1)}$ max (x=20mm): contrainte normale maximale du polyamide. | 0 | -0.71851713435219 | -1.437034268070438 | -2.155551402105656 | -2.874068536140875 |
| $\sigma_{xx(1)}$ (x=5mm) : contrainte normale du polyamide. | 0 | -0.511047472419654 | -1.022094944839308 | -1.533142417258961 | -2.044189889678616 |

La figure suivante est obtenue :

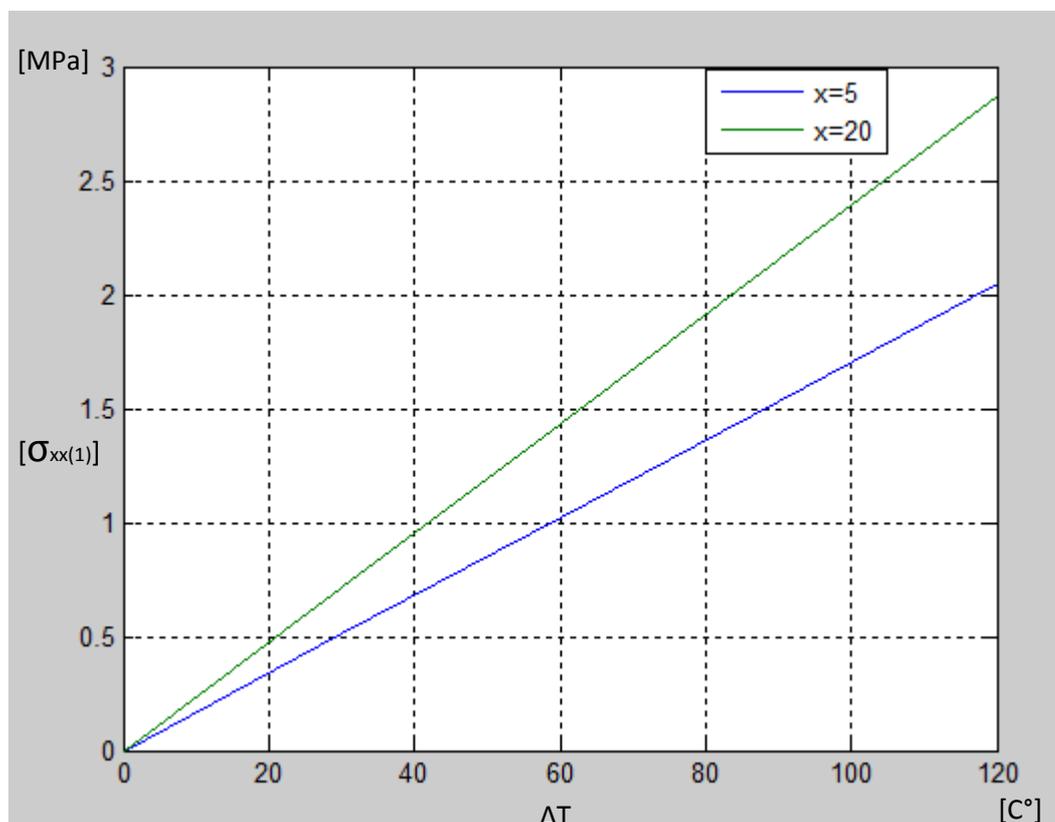


Figure (IV -1b) : variation de la contrainte normale en valeur absolue à $x=20\text{mm}$ (en vert) et à $x=5\text{mm}$ du polyamide en fonction de la température instantanée du panneau solaire.

$$\sigma_{xx(1)} = A \cdot (\Delta T) + B = A \cdot (T - T_0) + B. \quad T_0 \text{ est la température de référence, } T_0 = 0^\circ\text{C}.$$

• $B=0$, la courbe passe par l'origine.

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

• $A = \tan(\alpha)$, à déterminer pour $x=5\text{mm}$ et $x=20\text{mm}$.

Tableau des données permettant de calculer la pente (A) :

| Température (T) du panneau solaire PV | $T_1 = 35\text{ °C}$ | $T_2 = 85\text{ °C}$ |
|---|----------------------|----------------------|
| Contrainte normale $\sigma_{xx(1)}$ ($x=20\text{mm}$) | -0.838269989707755 | -2.035798546433119 |
| Contrainte normale $\sigma_{xx(1)}$ ($x=5\text{mm}$) | -0.596222051156263 | -1.447967838522352 |

$$\begin{aligned} \text{Pour } x=20\text{mm}, A = \tan(\alpha_1) &= (-2.035798546433119 - (-0.838269989707755)) / (85 - 35) \\ &= -0.023950571134507. \end{aligned}$$

La fonction de la contrainte normale du film polyamide $\sigma_{xx(1)}(\Delta T)$ à $x=20\text{mm}$ s'écrit :

$$\sigma_{xx(1)} = -0.023950571134507 * (\Delta T).$$

$$\begin{aligned} \text{Pour } x=5\text{mm}, A = \tan(\alpha_2) &= (-1.447967838522352 - (-0.596222051156263)) / (85 - 35) \\ &= -0.017034915747322. \end{aligned}$$

De même, la fonction de la contrainte normale du film polyamide $\sigma_{xx(1)}(\Delta T)$ à $x=5\text{mm}$ s'écrit :

$$\sigma_{xx(1)} = -0.017034915747322 * (\Delta T).$$

• De même pour la cellule solaire (silicium) et le verre, on montre l'évolution de leurs contraintes normales $\sigma_{xx(2)}$ et $\sigma_{xx(3)}$ ainsi que l'évolution des contraintes tangentielles $\tau_{xy(j)}$ ($j=1,2$) des couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et 2) suite à la variation de la température du panneau solaire.

• On montre aussi la variation de la contrainte normale maximale (à $x=20$) et la contrainte normale à $x=5$ développées dans chacun de ces matériaux (le silicium et le verre) en fonction de l'écart de température enregistré au niveau du panneau solaire instantanément suite à l'apport de chaleur reçu par le rayonnement solaire. De même pour la contrainte tangentielle maximale (à $x=0$) et la contrainte tangentielle à $x=5$ de chacune des couches de liaison 1 et 2.

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

Pour le verre :

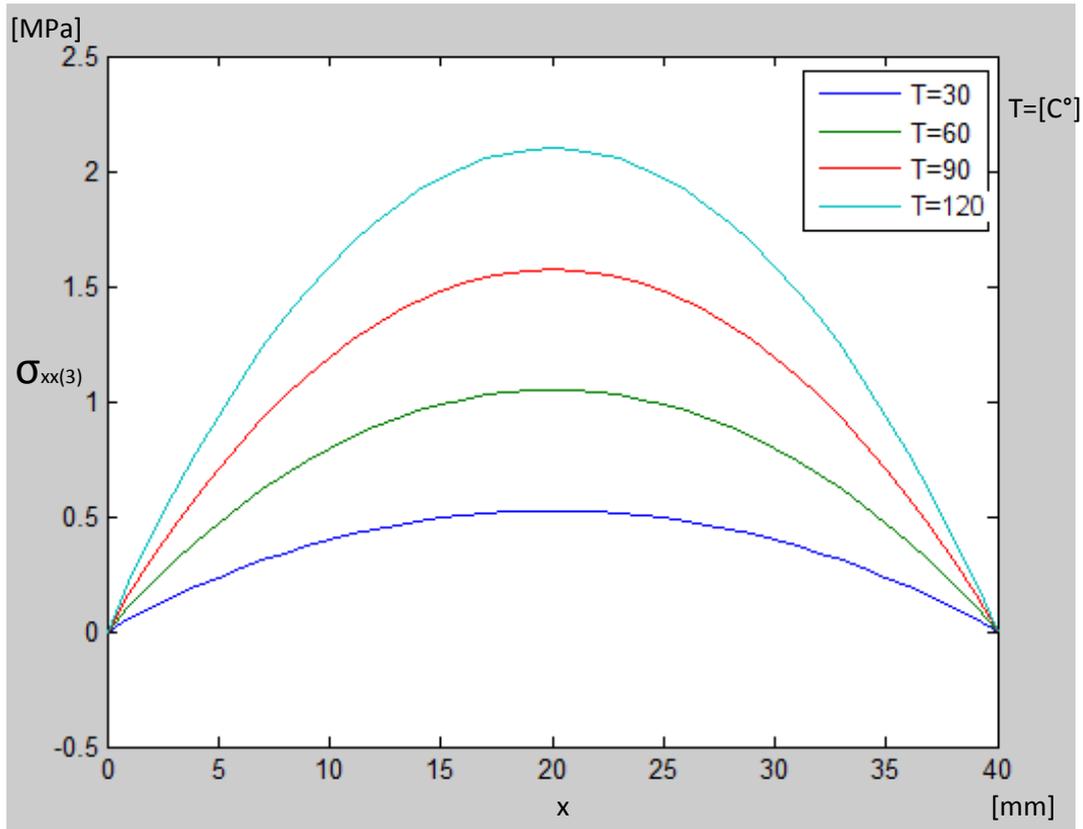


Figure (IV -2a) : Evolution des contraintes normales suivant la longueur de la structure (axe x) $\sigma_{xx(3)}$ du verre en fonction de la température du panneau solaire T

Tableau (IV.2) des données ($\sigma_{xx(3)}$ et T) pour le verre :

| T : température instantanée du panneau solaire. [°C] | 0°C | 30°C | 60°C | 90°C | 120°C |
|---|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\sigma_{xx(3)}$ max ($x=20$ mm): contrainte normale maximale du verre. [MPa] | 0 | 0.524589873159465 | 1.049179746318931 | 1.573769619478411 | 2.098359492637862 |
| $\sigma_{xx(3)}$ ($x=5$ mm) : contrainte normale du verre. | 0 | 0.233997760340061 | 0.467995520680121 | 0.701993281020196 | 0.935991041360242 |

La figure obtenue est la suivante :

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

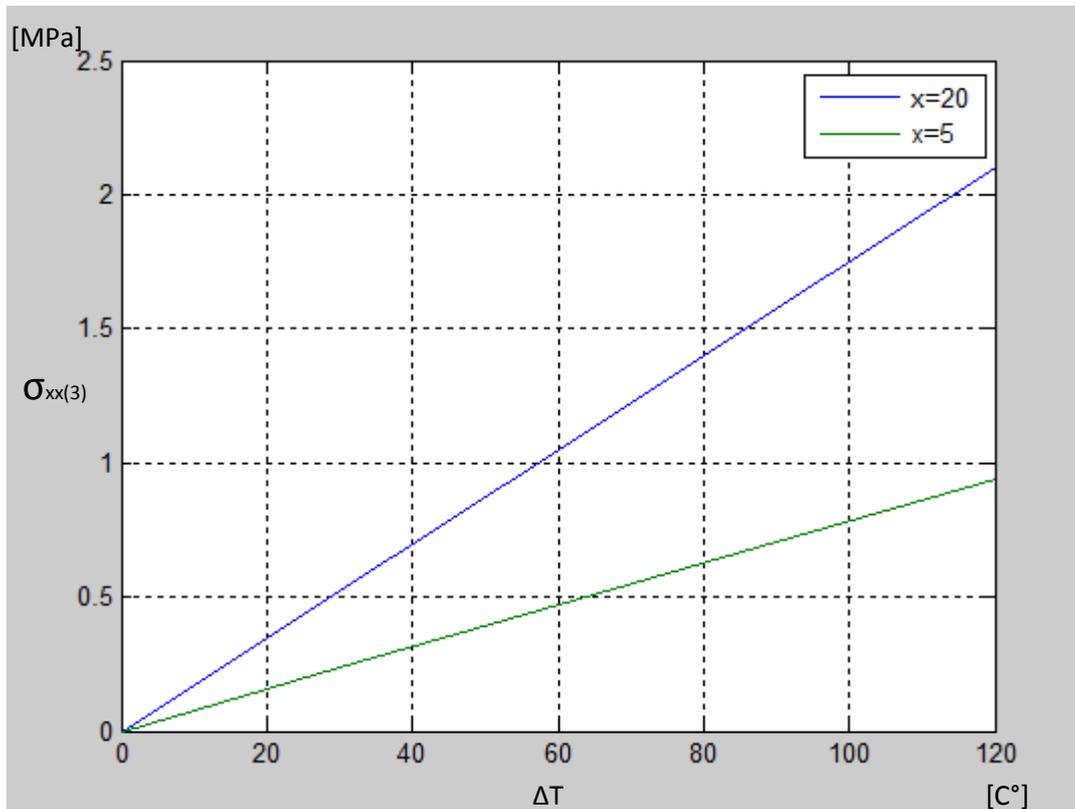


Figure (IV -2b): variation de la contrainte normale à $x=20\text{mm}$ (en bleu) et $x=5\text{mm}$ du verre en fonction de la température instantanée du panneau solaire.

• La figure ci-dessus montre que l'évolution de la contrainte normale dans la couverture de verre en fonction de la température du panneau solaire est linéaire. Sa fonction s'écrit alors pour x donné, $\sigma_{xx(3)} = A \cdot (\Delta T) + B = A \cdot (T - T_0) + B$. T_0 est la température de référence, $T_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

• $B=0$, la courbe passe par l'origine.

• $A = \text{tg}(\alpha)$, à déterminer pour $x=5\text{mm}$ et $x=20\text{mm}$.

Tableau des données permettant de calculer la pente (A) :

| Température (T) du panneau solaire PV | $T_1 = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $T_2 = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
|---|------------------------------------|------------------------------------|
| Contrainte normale $\sigma_{xx(3)}$ ($x=20\text{mm}$) | 0.612021518686047 | 1.486337973951724 |
| Contrainte normale $\sigma_{xx(3)}$ ($x=5\text{mm}$) | 0.272997387063408 | 0.662993654296731 |

Pour $x=20\text{mm}$, $A = \text{tg}(\alpha_1) = (1.486337973951724 - 0.612021518686047) / (85 - 35) = 0.017486329105314$.

La fonction de la contrainte normale du verre $\sigma_{xx(3)}(\Delta T)$ à $x=20\text{mm}$ s'écrit :

$$\sigma_{xx(3)} = 0.017486329105314 \cdot (\Delta T).$$

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

Pour $x=5\text{mm}$, $A=\text{tg}(\alpha_2)= (0.662993654296731-0.272997387063408)/(85-35)= 0.007799925344666$.

De même, la fonction de la contrainte normale du verre $\sigma_{xx(3)}(\Delta T)$ à $x=5\text{mm}$ s'écrit :

$$\sigma_{xx(3)}= 0.007799925344666*(\Delta T)$$

Pour le silicium :

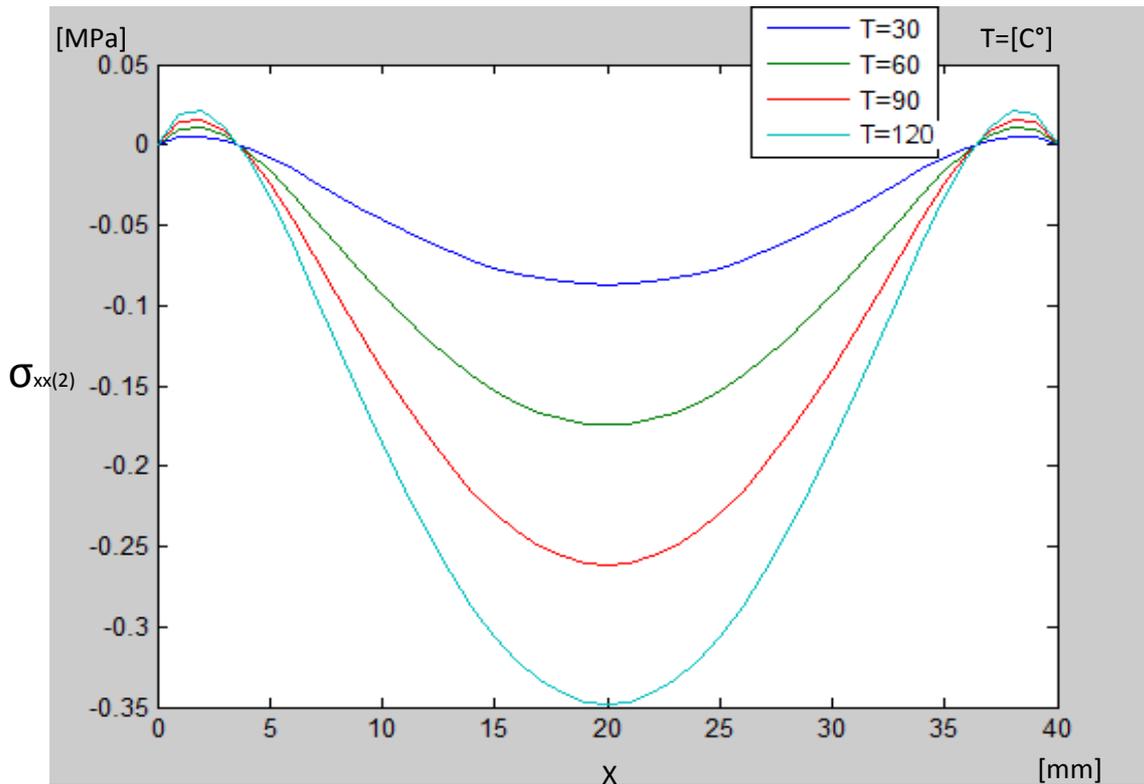


Figure (IV -3a) : Evolution des contraintes normales suivant la longueur de la structure (axe x) $\sigma_{xx(2)}$ du silicium en fonction de la température du panneau solaire.

Tableau(IV.3) des données $(\sigma_{xx(2)})_{\text{max}}$ et T pour le silicium :

| T : température instantanée du panneau solaire. [°C] | 0°C | 30°C | 60°C | 90°C | 120°C |
|---|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\sigma_{xx(2)} \text{ max}$: contrainte normale maximale du silicium. [MPa] | 0 | -0.087177187346387 | -0.174354374692773 | -0.261531562039159 | -0.348708749385546 |
| $\sigma_{xx(2)} (x=5\text{mm})$: contrainte normale du silicium. | 0 | -0.008152766515815 | -0.016305533031630 | -0.024458299547444 | -0.032611066063259 |

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

La figure obtenue est la suivante :

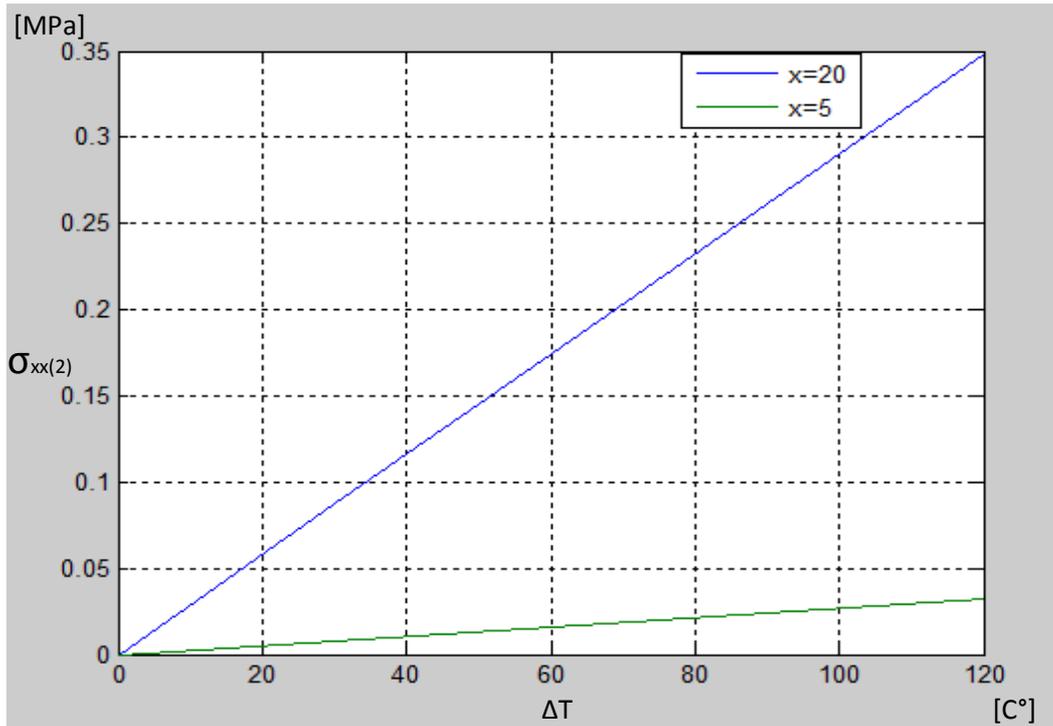


Figure (IV -3b): variation de la contrainte normale en valeur absolue à $x=20\text{mm}$ (raixiale) et $x=5\text{mm}$ du silicium en fonction de la température instantanée du panneau solaire.

•La figure ci-dessus montre que l'évolution de la contrainte normale dans la cellule solaire (silicium) en fonction de la température du panneau solaire est linéaire. Sa fonction s'écrit alors pour x donné, $\sigma_{xx(2)} = A \cdot (\Delta T) + B = A \cdot (T - T_0) + B$. T_0 est la température de référence, $T_0 = 0 \text{ °C}$.

• $B=0$, la courbe passe par l'origine.

• $A = \text{tg}(\alpha)$, à déterminer pour $x=5\text{mm}$ et $x=20\text{mm}$.

Tableau des données permettant de calculer la pente (A) :

| | | |
|---|-----------------------|-----------------------|
| Température (T) du panneau solaire PV | $T_1 = 35 \text{ °C}$ | $T_2 = 85 \text{ °C}$ |
| Contrainte normale $\sigma_{xx(2)}$ ($x=20\text{mm}$) | -0.101706718570784 | -0.247002030814771 |
| Contrainte normale $\sigma_{xx(2)}$ ($x=5\text{mm}$) | -0.009511560935117 | -0.023099505128146 |

$$\text{Pour } x=20\text{mm}, A = \text{tg}(\alpha) = \frac{-0.247002030814771 - (-0.101706718570784)}{85 - 35} = -0.002905906244880.$$

La fonction de la contrainte normale dans la cellule solaire $\sigma_{xx(2)}(\Delta T)$ à $x=20\text{mm}$ s'écrit :

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

$$\sigma_{xx(2)} = -0.002905906244880 * (\Delta T).$$

$$\text{Pour } x=5\text{mm, } A = \text{tg}(\alpha_2) = (-0.023099505128146 - (-0.009511560935117)) / (85 - 35)$$

$$= -2.717588838605800 \text{e-}004.$$

De même, la fonction de la contrainte normale dans la cellule solaire $\sigma_{xx(2)}(\Delta T)$ à $x=5\text{mm}$ s'écrit :

$$\sigma_{xx(2)} = -2.717588838605800 \text{e-}004 * (\Delta T)$$

Pour la couche de liaison 1 (caoutchouc en silicium 1) :

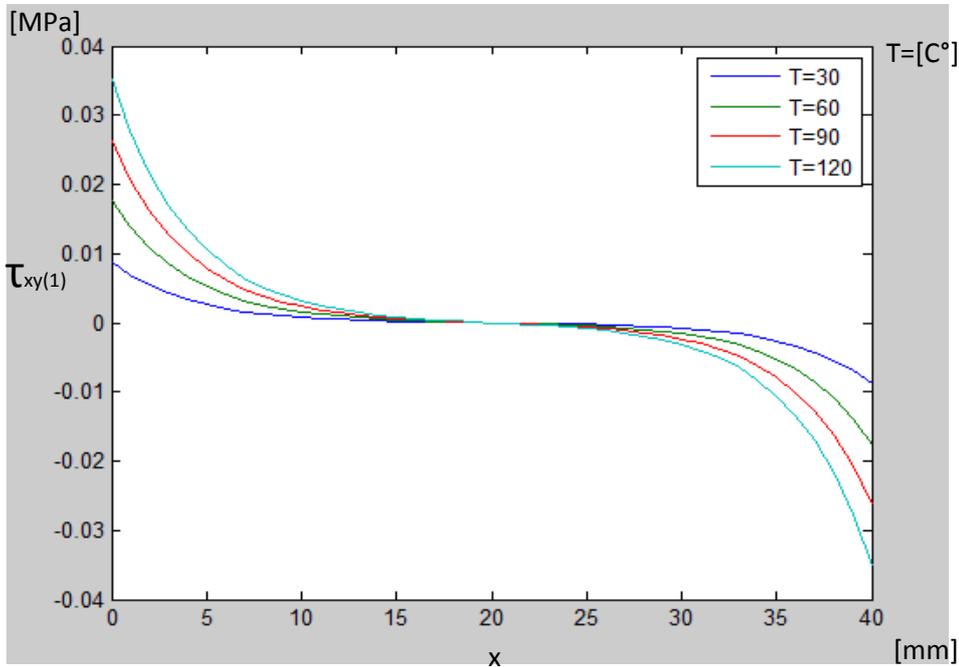


Figure (IV -4a) : Evolution des contraintes tangentielles suivant la longueur de la structure (en x) de la couche de liaison 1 (caoutchouc en silicium 1) en fonction de la température du panneau solaire.

Tableau (IV.4) des données ($\tau_{xy(1)}$ et T) pour la couche de liaison 1 :

| T : température instantanée du panneau solaire. [°C] | 0°C | 30°C | 60°C | 90°C | 120°C |
|---|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\tau_{xy(1)} \text{ max } (x=0)$: contrainte tangentielle maximale de la couche de liaison 1. [MPa] | 0 | 0.008794841347084 | 0.017589682694169 | 0.026384524041253 | 0.035179365388338 |
| $\tau_{xy(1)} (x=5)$: contrainte tangentielle de la couche de liaison 1. [MPa] | 0 | 0.002634615800393 | 0.005269231600785 | 0.007903847401178 | 0.010538463201571 |

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

La figure suivante est obtenue :

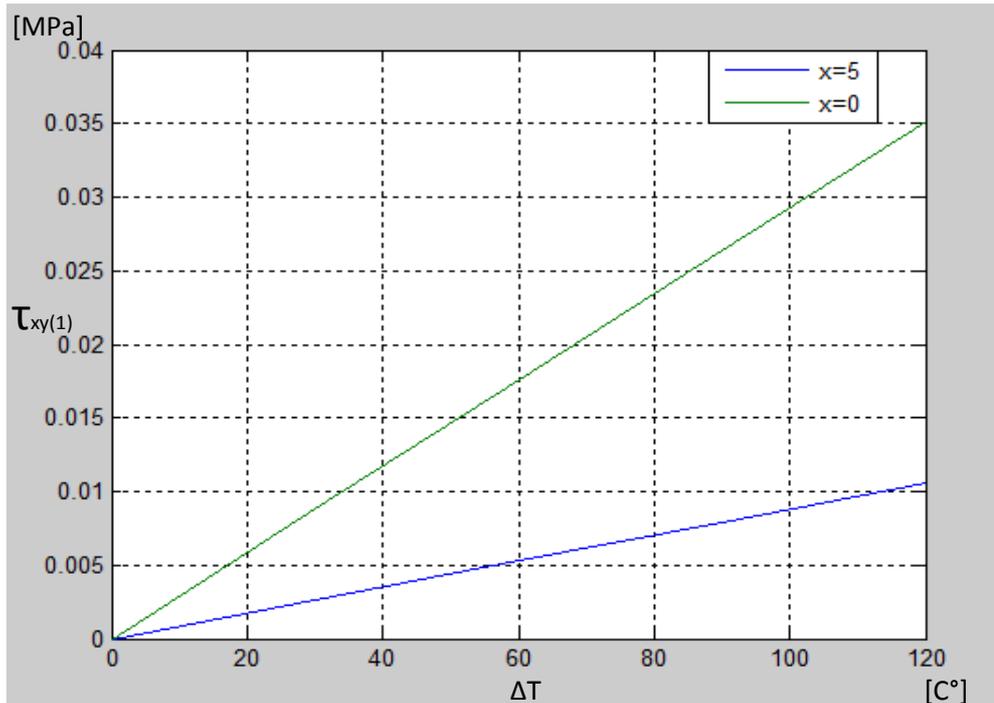


Figure (IV -4b): variation de la contrainte tangentielle à $x=20$ mm (maximale) et à $x=5$ mm de la couche de liaison1 (caoutchouc en silicium 1) en fonction de la température instantanée du panneau solaire.

•La figure ci-dessus montre que l'évolution de la contrainte tangentielle dans la couche de liaison (caoutchouc en silicium1) en fonction de la température du panneau solaire est linéaire. Sa fonction s'écrit alors pour x donné, $\tau_{xy(1)} = A \cdot (\Delta T) + B = A \cdot (T - T_0) + B$. T_0 est la température de référence, $T_0 = 0$ °C.

• $B=0$, la courbe passe par l'origine.

• $A = \tan(\alpha)$, à déterminer pour $x=5$ mm et $x=0$ mm.

Tableau des données permettant de calculer la pente (A) :

| Température (T) du panneau solaire PV | $T_1 = 35$ C° | $T_2 = 85$ C° |
|---|-------------------|-------------------|
| Contrainte normale $\tau_{xy(1)}$ ($x=0$ mm) | 0.010260648238265 | 0.024918717150073 |
| Contrainte normale $\tau_{xy(1)}$ ($x=5$ mm) | 0.003073718433791 | 0.007464744767779 |

Pour $x=20$ mm, $A = \tan(\alpha) = (0.024918717150073 - 0.010260648238265) / (85 - 35)$

$$= 2.931613782361600 \times 10^{-4}$$

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

La fonction de la contrainte tangentielle dans la couche de liaison (caoutchouc en silicium1) $\tau_{xy(1)}$

(ΔT) à $x=20\text{mm}$ s'écrit : $\tau_{xx(1)} = 2.931613782361600\text{e-}004 * (\Delta T)$.

Pour $x=5\text{mm}$, $A=\text{tg}(\alpha_2) = (0.007464744767779 - 0.003073718433791) / (85 - 35) = 8.782052667976\text{e-}005$.

De même, la fonction de la contrainte tangentielle dans la couche de liaison (caoutchouc en silicium1)

$\tau_{xy(1)}(\Delta T)$ à $x=5\text{mm}$ s'écrit : $\tau_{xy(1)} = 8.782052667976000\text{e-}005 * (\Delta T)$

Pour la couche de liaison2 (caoutchouc en silicium 2) :

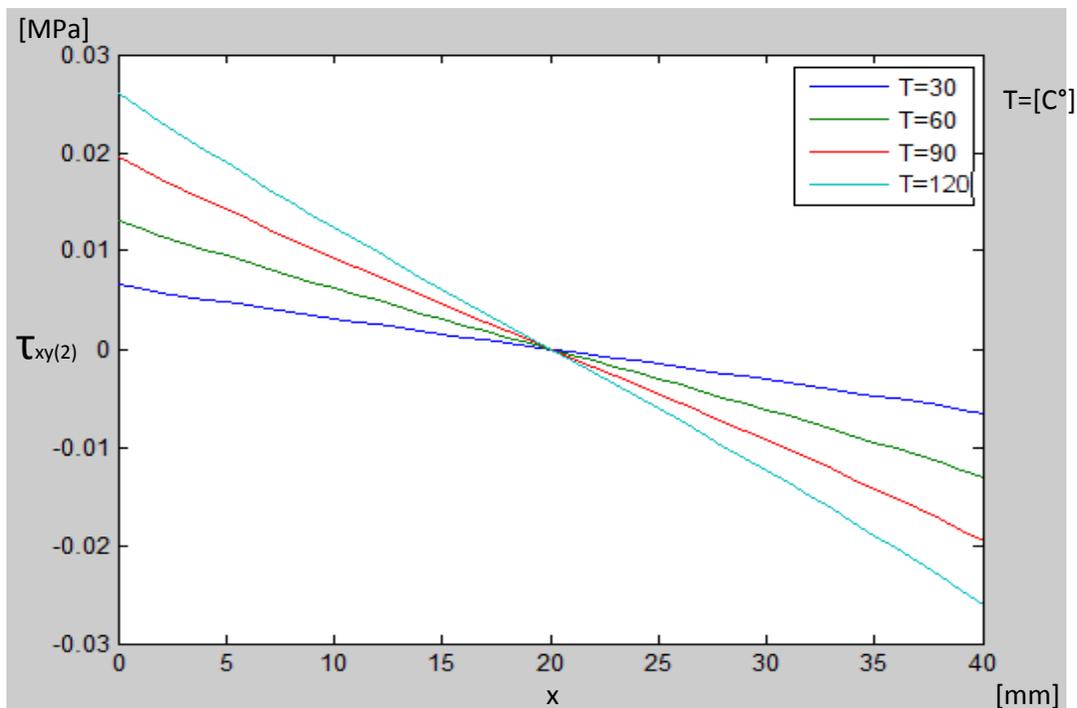


Figure (IV -5a) : Evolution des contraintes tangentielles suivant la longueur de la structure (axe x) $\tau_{xy(2)}$ de la couche de liaison 2 (caoutchouc en silicium 2) en fonction de la température du panneau solaire.

Tableau(IV.5) des données ($\tau_{xy(2)}$ et T) pour la couche de liaison2 :

| T : température instantanée du panneau solaire. [°C] | 0°C | 30°C | 60°C | 90°C | 120°C |
|---|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\tau_{xy(2)} \text{ max } (x=0)$: contrainte tangentielle maximale de la couche de liaison 2. [MPa] | 0 | 0.006513004313893 | 0.013026008627787 | 0.019539012941680 | 0.026052017255574 |
| $\tau_{xy(2)} (x=5)$: contrainte tangentielle de la couche de liaison 2. [MPa] | 0 | 0.004742106465351 | 0.009484212930701 | 0.014226319396052 | 0.018968425861402 |

La figure suivante est obtenue :

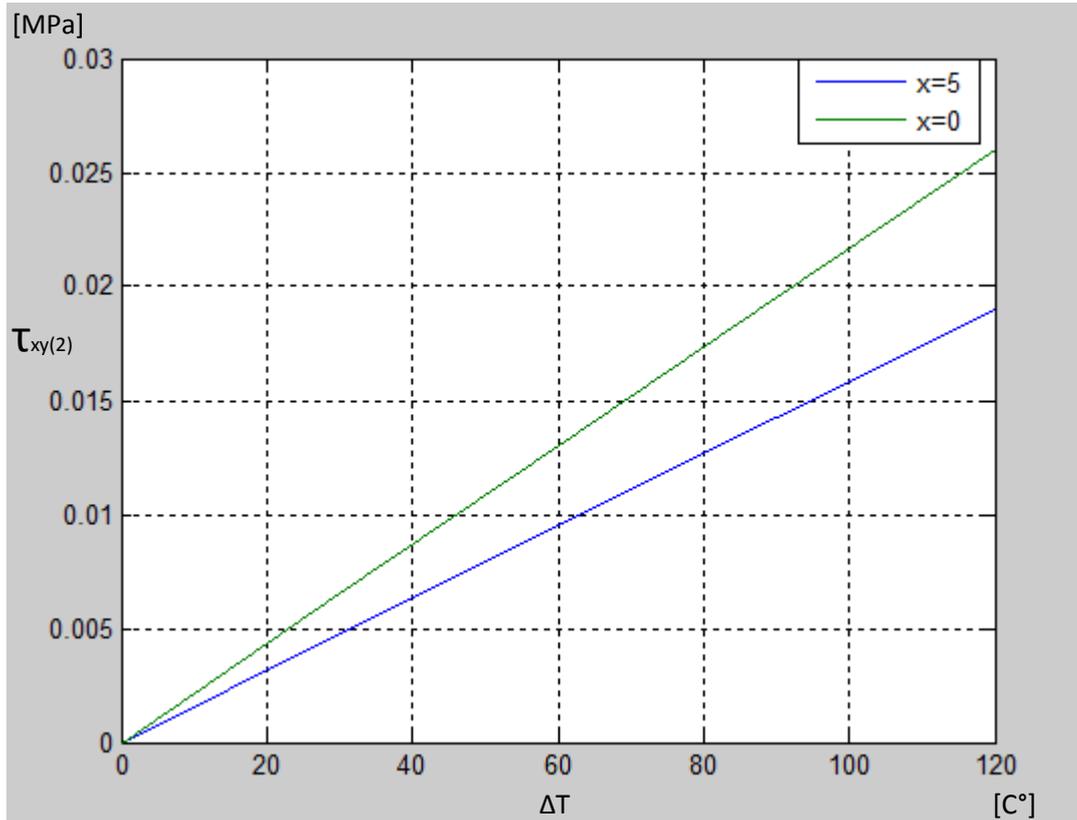


Figure (IV -5b): Variation de la contrainte tangentielle à $x=20\text{mm}$ (maximale) et à $x=5\text{mm}$ de la couche de liaison2 (caoutchouc en silicium 2) en fonction de la température instantanée du panneau solaire

•La figure ci-dessus montre que l'évolution de la contrainte tangentielle dans la couche de liaison (caoutchouc en silicium2) en fonction de la température du panneau solaire est linéaire. Sa fonction s'écrit alors pour x donné, $\tau_{xy(2)} = A * (\Delta T) + B = A * (T - T_0) + B$. T_0 est la température de référence, $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

- $B=0$, la courbe passe par l'origine.
- $A = \text{tg}(\alpha)$, à déterminer pour $x=5\text{mm}$ et $x=0\text{mm}$.

Tableau des données permettant de calculer la pente (A) :

| Température (T) du panneau solaire PV | $T_1 = 35^\circ\text{C}$ | $T_2 = 85^\circ\text{C}$ |
|--|--------------------------|--------------------------|
| Contrainte normale $\tau_{xy(2)}$ ($x=0\text{mm}$) | 0.007598505032876 | 0.018453512222698 |
| Contrainte normale $\tau_{xy(2)}$ ($x=5\text{mm}$) | 0.005532457542909 | 0.013435968318493 |

Pour $x=20\text{mm}$, $A = \text{tg}(\alpha_1) = (0.018453512222698 - 0.007598505032876) / (85 - 35)$

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

$$= 2.1710014379644e-004.$$

La fonction de la contrainte tangentielle dans la couche de liaison (caoutchouc en silicium2) $\tau_{xy(2)}$ (ΔT) à $x=20\text{mm}$ s'écrit : $\tau_{xy(2)} = 2.171001437964400e-004 * (\Delta T)$.

Pour $x=5\text{mm}$, $A=\text{tg}(\alpha_2) = (0.013435968318493 - 0.005532457542909) / (85 - 35)$
 $= 1.580702155116800e-004.$

De même, la fonction de la contrainte tangentielle dans la couche de liaison (caoutchouc en silicium1) $\tau_{xy(2)}(\Delta T)$ à $x=5\text{mm}$ s'écrit : $\tau_{xy(2)} = 1.580702155116800e-004 * (\Delta T)$

IV.4 Analyse des résultats analytiques:

- Au fur et à mesure que la température du panneau solaire PV augmente suite à la radiation solaire, les contraintes thermiques suivant la longueur de la structure deviennent plus importantes dans chacun des matériaux constitutifs du panneau, y-compris les couches de liaison.
- Pour chacun des matériaux collés tels que la couverture de verre, la cellule solaire en silicium et le film polyamide, la courbe des contraintes thermiques normales à une forme parabolique. Ils s'annulent aux deux extrémités de la structure (à $x=0$ et à $x=L$) et la contrainte maximale est à $x=L/2$.
- Pour différentes valeurs de la température du panneau solaire ($T=30, 60, 90$ et 120 [$^{\circ}\text{C}$]), les résultats montrent qu'au niveau du polyamide et du silicium se forment des contraintes thermiques normales de compression. C'est réciproque pour la couverture de verre.
- Pour les couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et 2), la contrainte tangentielle maximale est enregistrée à $x=0$ et à $x=L$, où celle de compression est à $x=L$. Au milieu de la structure, la contrainte tangentielle de chacun des matériaux de liaison 1 et 2 s'annule.
- Pour les matériaux collés tels que la couverture de verre, la cellule solaire en silicium et le film polyamide, la contrainte normale maximale est enregistrée dans le film polyamide et la minimale dans la cellule solaire (silicium).
- Pour les couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et 2), la contrainte tangentielle maximale est enregistrée dans la couche 1 adjacente au film polyamide.

On a étudié la variation de la contrainte normale maximale (à $x=20\text{mm}$) et celle qui correspond à $x=5\text{mm}$ en fonction de la température du panneau solaire PV pour chacun des matériaux collés, à savoir la couverture de verre, la cellule en silicium et le film polyamide.

De même pour les couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et 2), on a montré la variation de la contrainte tangentielle suivant x maximale (à $x=0\text{mm}$) et celle qui correspond à $x=5\text{mm}$ en fonction de la température du panneau solaire PV. Les résultats montrent :

- Au fur et à mesure que la température augmente, la valeur de la contrainte normale maximale s'éloignent de celle qui correspond à $x=5\text{mm}$ pour chacun des matériaux collés. La même remarque à tirer concernant la variation de la contrainte tangentielle maximale des couches de liaison par rapport à celle enregistrée à $x=5\text{mm}$.

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

- L'écart entre les deux valeurs des contraintes normales enregistrées à $x=20\text{mm}$ et à $x=5\text{mm}$ sur la longueur de la structure pour chacun des matériaux collés varie considérablement dans la cellule solaire (silicium) puis un peu moins dans la couverture de verre et encore moins dans le film polyamide.
- L'écart entre les deux valeurs des contraintes tangentielles enregistrées à $x=20\text{mm}$ et à $x=5\text{mm}$ sur la longueur de la structure pour chacun des couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et 2) varie considérablement dans la couche 1 adjacente au film polyamide par rapport à la couche 2 mise entre la couverture de verre et la cellule solaire.

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

IV.5 Etude de l'effet de la propriété élastique du matériau sur les contraintes thermiques maximales développées dans le panneau solaire PV étudié:

Pour rappel, les données de la propriété élastique du matériau intervenues dans la méthode analytique établie pour la détermination des contraintes thermiques dans le panneau solaire photovoltaïque sont les suivantes :

- le module d'élasticité E_i (1,2 et3) de chacun des matériaux collés, à savoir la couverture de verre, le silicium et le polyamide.
- le module de cisaillement G_{cj} (1 et2) de chacune des deux couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et2).

On montre dans cette étude, l'évolution de la contrainte normale maximale de chacun des matériaux collés en fonction de leurs modules d'élasticité E_i et des modules de cisaillement des deux couches de liaison G_{c1} et G_{c2} . De même quant à la contrainte tangentielle maximale de chacune des couches de liaison. Enfin, on tire l'effet de la propriété élastique sur la contrainte maximale de la structure normale et tangentielle. On fixe la température instantanée du panneau solaire PV à 100 °C.

IV.5.1 Influence des propriétés élastiques de chaque matériau du panneau (E_i (1,2 et3) et G_{cj} (1 et2)) sur la valeur de la contrainte thermique normale maximale de chacun des matériaux collés

$\sigma_{xx(i)max}$:

Tableau (IV.6) des données $\sigma_{xx(i)max}(E_1)$:

| Module d'élasticité du polyamide E_1 [MPa] | 600 | 1000 | 1600 | 2500 |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Contrainte normale maximale du polyamide $\sigma_{xx(1)max}$ [MPa] | -0.912988537981472 | -1.515388150819190 | -2.395057113450729 | -3.640337424526431 |
| Contrainte normale maximale du silicium $\sigma_{xx(2)max}$ [MPa] | -0.525377762041766 | -0.429978083449233 | -0.290590624487964 | -0.093173191353775 |
| Contrainte normale maximale du verre $\sigma_{xx(3)max}$ [MPa] | 1.737637776100125 | 1.742188445085206 | 1.748632910531456 | 1.757504671216411 |

Tableau (IV.7) des données $\sigma_{xx(i)max}(E_2)$:

| Module d'élasticité du silicium E_2 [MPa] | 100000 | 140000 | 180000 | 200500 |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Contrainte normale maximale du polyamide $\sigma_{xx(1)max}$ [MPa] | -2.396782965265906 | -2.395678484966132 | -2.395057113450729 | -2.394833383026720 |
| Contrainte normale maximale du silicium $\sigma_{xx(2)max}$ [MPa] | -0.287088201711019 | -0.289329021368373 | -0.290590624487964 | -0.291045039519783 |
| Contrainte normale maximale du verre $\sigma_{xx(3)max}$ [MPa] | 1.740304089947519 | 1.745632673937419 | 1.748632910531456 | 1.749713595020409 |

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

Tableau(IV.8) des données $\sigma_{xx(i)max}(E3)$:

| | | | | |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Module d'élasticité du verre $E3$ [MPa] | 45000 | 55000 | 65000 | 85000 |
| Contrainte normale maximale du polyamide $\sigma_{xx(1)max}$ [MPa] | -2.394893675881169 | -2.395057113450729 | -2.395176139310328 | -2.395337891918312 |
| Contrainte normale maximale du silicium $\sigma_{xx(2)max}$ [MPa] | -0.270297025030057 | -0.290590624487964 | -0.305371124431836 | -0.325459129060890 |
| Contrainte normale maximale du verre $\sigma_{xx(3)max}$ [MPa] | 1.696139679611352 | 1.748632910531456 | 1.786865462828261 | 1.838826871706776 |

Tableau (IV.9) des données $\sigma_{xx(i)max}(Gc1)$:

| | | | | |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Module de cisaillement du caoutchouc en silicium1 $Gc1$ [MPa] | 0.65 | 0.8 | 0.93 | 1.2 |
| Contrainte normale maximale du polyamide $\sigma_{xx(1)max}$ [MPa] | -2.347866552939320 | -2.378653644105685 | -2.395057113450729 | -2.413913044002925 |
| Contrainte normale maximale du silicium $\sigma_{xx(2)max}$ [MPa] | -0.297942563042795 | -0.293136879082242 | -0.290590624487964 | -0.287689890627102 |
| Contrainte normale maximale du verre $\sigma_{xx(3)max}$ [MPa] | 1.747962684918600 | 1.748375956006263 | 1.74863291053145 | 1.748995985787822 |

Tableau (IV.10) des données $\sigma_{xx(i)max}(Gc2)$:

| | | | | |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Module de cisaillement du caoutchouc en silicium2 $Gc2$ [MPa] | 0.7 | 0.85 | 0.97 | 1.3 |
| Contrainte normale maximale du polyamide $\sigma_{xx(1)max}$ [MPa] | -2.393700839794497 | -2.394468958009021 | -2.395057113450729 | -2.396564562324999 |
| Contrainte normale maximale du silicium $\sigma_{xx(2)max}$ [MPa] | -0.124483562427821 | -0.218581921994368 | -0.290590624487964 | -0.474963455204982 |
| Contrainte normale maximale du verre $\sigma_{xx(3)max}$ [MPa] | 1.318957886186336 | 1.562365364322301 | 1.748632910531456 | 2.225557493581427 |

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

Les figures suivantes sont obtenues :

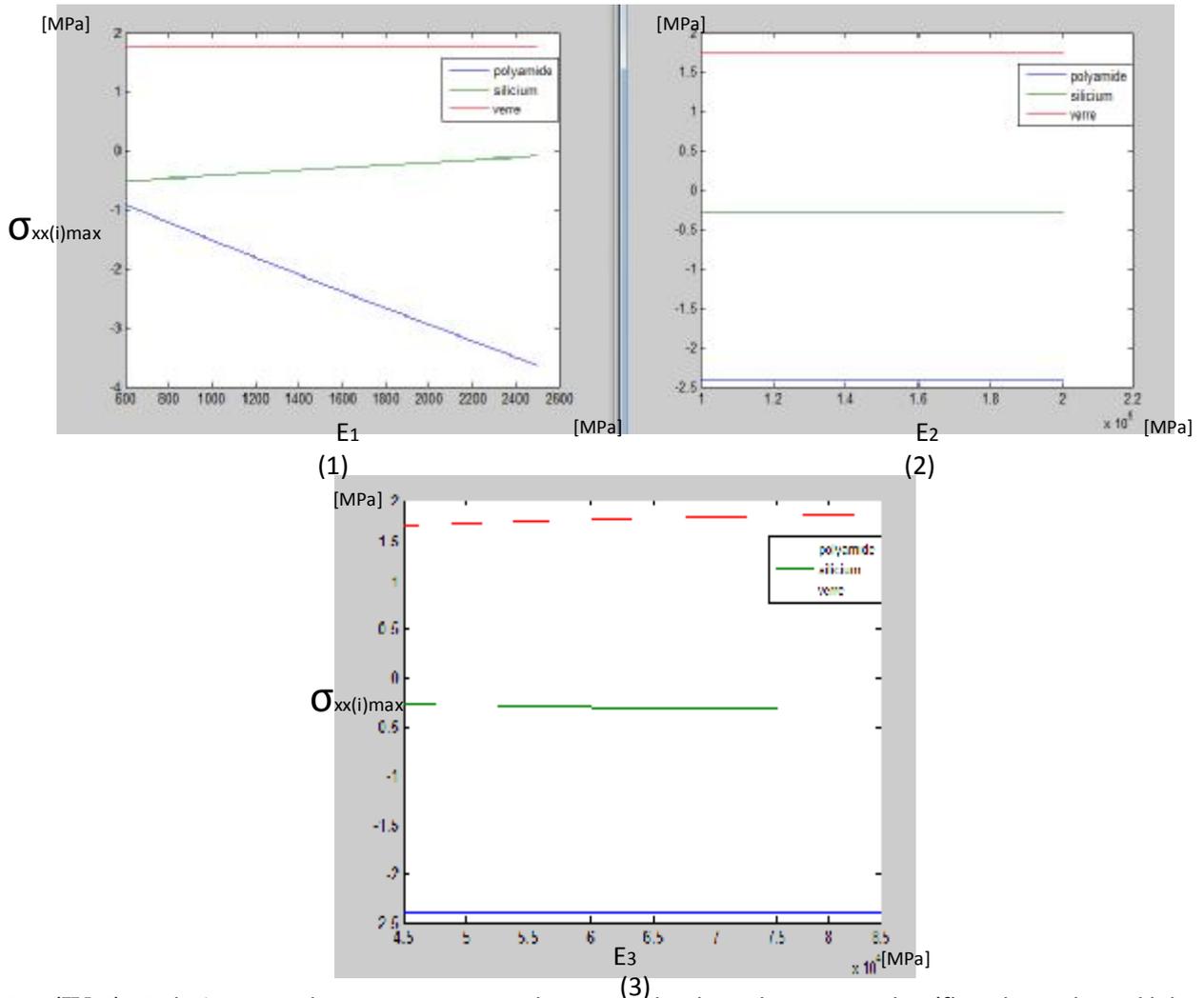


Fig. (IV-6) : Relation entre la contrainte normale maximale dans chaque couche (film d'amiante et cellule solaire et la couverture de verre) et le module d'élasticité de chacun de ces différents matériaux : (1) polyamide, (2) silicium, (3) verre.

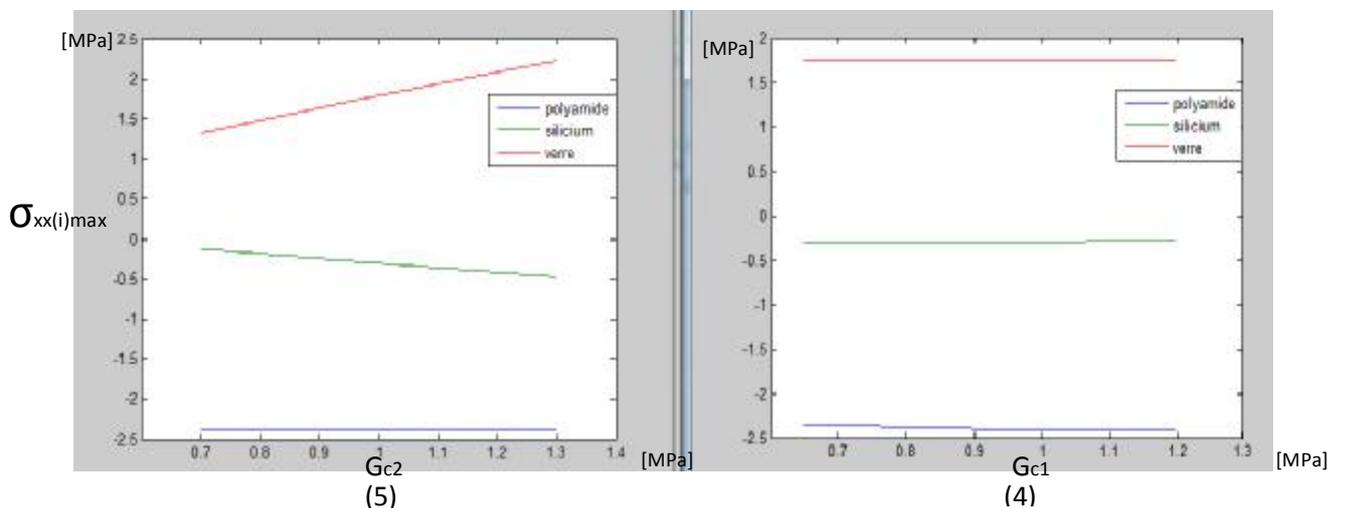


Fig. (IV-7): Relation entre la contrainte normale maximale dans chaque couche (film d'amiante et cellule solaire et la couverture de verre) et le module de cisaillement de chacune des couches de liaison ((4) caoutchouc en silicium 1 et (5) caoutchouc en silicium 2).

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

• Fig. (IV-6) montre l'effet des matériaux de différents modules d'élasticité sur la contrainte normale maximale développée dans chaque matériau du panneau solaire PV. La figure (1) montre qu'avec le changement du module d'élasticité du polyamide, la contrainte normale maximale du polyamide varie considérablement suivi d'une légère variation (diminution) de la contrainte maximale de la cellule solaire (silicium). Par contre, la valeur de cette contrainte dans le verre reste quasiment inchangée. La figure (1) montre aussi qu'avec un module d'élasticité du polyamide inférieur à 1300 MPa environ, la contrainte normale maximale de compression/traction du panneau solaire PV est localisée dans la couverture de verre. Pour un module d'élasticité supérieur à 1300 MPa, cette contrainte normale maximale devient dans le film polyamide. On peut montrer à partir des figures (2) et (3) que le choix du silicium et du verre avec un module d'élasticité de valeurs différentes pour chacun exerce un petit effet sur les contraintes normales maximales, où la courbe de relation est approximativement une ligne horizontale.

• Fig. (IV-7) montre l'effet des matériaux de chacune des couches liaison de différents modules de cisaillement sur la contrainte normale maximale développée dans chaque matériau du panneau solaire PV, à savoir le polyamide, le silicium et le verre. La figure (4) montre que le changement du module de cisaillement du caoutchouc en silicium1 n'exerce aucun effet sur la contrainte normale maximale dans chacun des matériaux du panneau. Cependant, on enregistre une évolution considérable de cette contrainte au niveau du verre suivi d'une légère évolution dans le silicium avec le changement du module de cisaillement du caoutchouc en silicium2 (fig. (5)).

• les figures (IV-6) et (IV-7) indiquent l'effet de la propriété élastique des matériaux du panneau solaire PV, à savoir les modules d'élasticité E_i ($i=1,2$ et3) et les modules de cisaillement G_{c_j} ($j=1$ et2) sur la contrainte normale de compression/traction maximale de la structure du panneau. On voit bien que $(\sigma_{xx})_{max}$ reste constante avec le changement du module d'élasticité de silicium et du verre. Cependant, l'augmentation du module d'élasticité du polyamide mène à une élévation rapide de cette contrainte normale maximale de la structure au niveau du film polyamide. L'effet du changement du module de cisaillement du caoutchouc en silicium1 sur l'évolution de la contrainte normale maximale pourrait être ignoré. Cependant, avec l'augmentation du module de cisaillement du caoutchouc en silicium2 ($G_{c_j} > 1.35$ MPa environ) mène à une élévation rapide de cette contrainte normale maximale de la structure qui devienne au niveau de la couverture de verre.

IV.5.2 Influence des propriétés élastiques de chaque matériau du panneau (E_i ($i=1,2$ et3) et G_{c_j} ($j=1$ et2)) sur la valeur de la contrainte thermique tangentielle maximale de chacune des couches de liaison $\tau_{xy(j)max}$:

Tableau (IV.11) des données $\tau_{xy(j)max}(E1)$:

| Module d'élasticité du polyamide E_1 [MPa] | 600 | 1000 | 1600 | 2500 |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Contrainte tangentielle maximale du caoutchouc en silicium1 $\tau_{xy(1)max}$ [MPa] | 0.017957904662427 | 0.023182223132692 | 0.029316137823615 | 0.036607956026643 |
| Contrainte tangentielle maximale du caoutchouc en silicium2 $\tau_{xy(2)max}$ [MPa] | 0.021597713563002 | 0.021644913245129 | 0.021710014379645 | 0.021797741278422 |

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

Tableau (IV.12) des données $\tau_{xy(j)\max}(E2)$:

| | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Module d'élasticité du polyamide $E2$ [MPa] | 100000 | 140000 | 180000 | 200500 |
| Contrainte tangentielle maximale du caoutchouc en silicium1 $\tau_{xy(1)\max}$ [MPa] | 0.029318551475735 | 0.029317017678726 | 0.029316137823615 | 0.029315818067778 |
| Contrainte tangentielle maximale du caoutchouc en silicium2 $\tau_{xy(2)\max}$ [MPa] | 0.021642441438526 | 0.021685644175472 | 0.021710014379645 | 0.021718800378246 |

Tableau (IV.13) des données $\tau_{xy(j)\max}(E3)$:

| | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Module d'élasticité du polyamide $E3$ [MPa] | 45000 | 55000 | 65000 | 85000 |
| Contrainte tangentielle maximale du caoutchouc en silicium1 $\tau_{xy(1)\max}$ [MPa] | 0.029315487385486 | 0.029316137823615 | 0.029316611242536 | 0.029317254261398 |
| Contrainte tangentielle maximale du caoutchouc en silicium2 $\tau_{xy(2)\max}$ [MPa] | 0.021202691291156 | 0.021710014379645 | 0.022079113312978 | 0.022580245816452 |

Tableau (IV.14) des données $\tau_{xy(j)\max}(Gc1)$:

| | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Module d'élasticité du polyamide $Gc1$ [MPa] | 0.65 | 0.8 | 0.93 | 1.2 |
| Contrainte tangentielle maximale du caoutchouc en silicium1 $\tau_{xy(1)\max}$ [MPa] | 0.024499285036855 | 0.027187761254677 | 0.029316137823615 | 0.033301530414404 |
| Contrainte tangentielle maximale du caoutchouc en silicium2 $\tau_{xy(2)\max}$ [MPa] | 0.021699877342273 | 0.021705954501631 | 0.021710014379645 | 0.021716275407637 |

Tableau (IV.15) des données $\tau_{xy(j)\max}(Gc2)$:

| | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Module d'élasticité du polyamide $Gc2$ [MPa] | 0.7 | 0.85 | 0.97 | 1.3 |
| Contrainte tangentielle maximale du caoutchouc en silicium1 $\tau_{xy(1)\max}$ [MPa] | 0.029310106698655 | 0.029313515610213 | 0.029316137823615 | 0.029322910309499 |
| Contrainte tangentielle maximale du caoutchouc en silicium2 $\tau_{xy(2)\max}$ [MPa] | 0.016217608155397 | 0.019314436034221 | 0.021710014379645 | 0.027955239961370 |

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

Les figures suivantes sont obtenues :

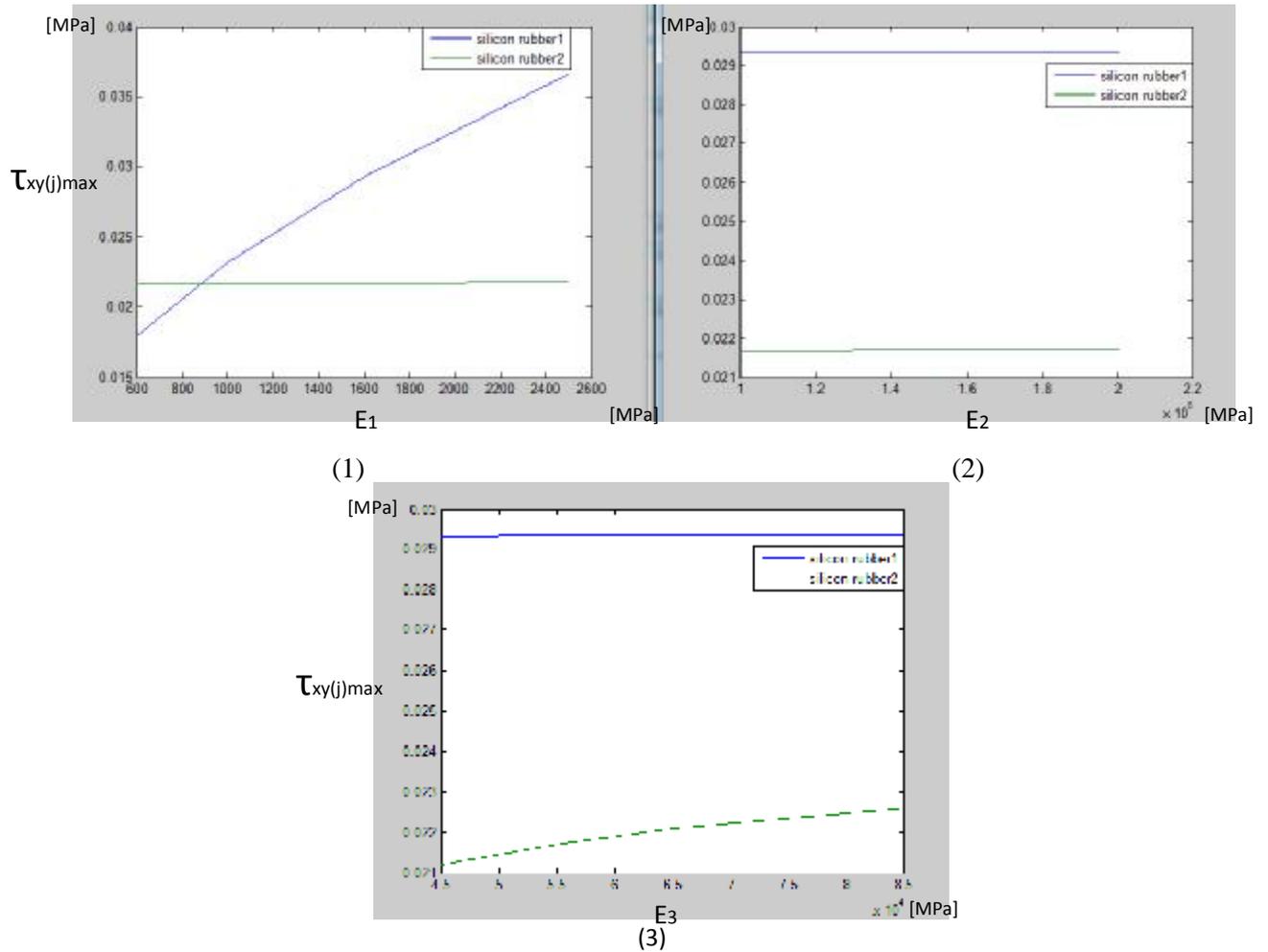


Fig. (IV-8) : Relation entre la contrainte tangentielle maximale dans chacune des couches de liaison (1) caoutchouc en silicium 1 et 2) et le module d'élasticité de chacun de ces différents matériaux : (1) polyamide, (2) silicium, (3) verre

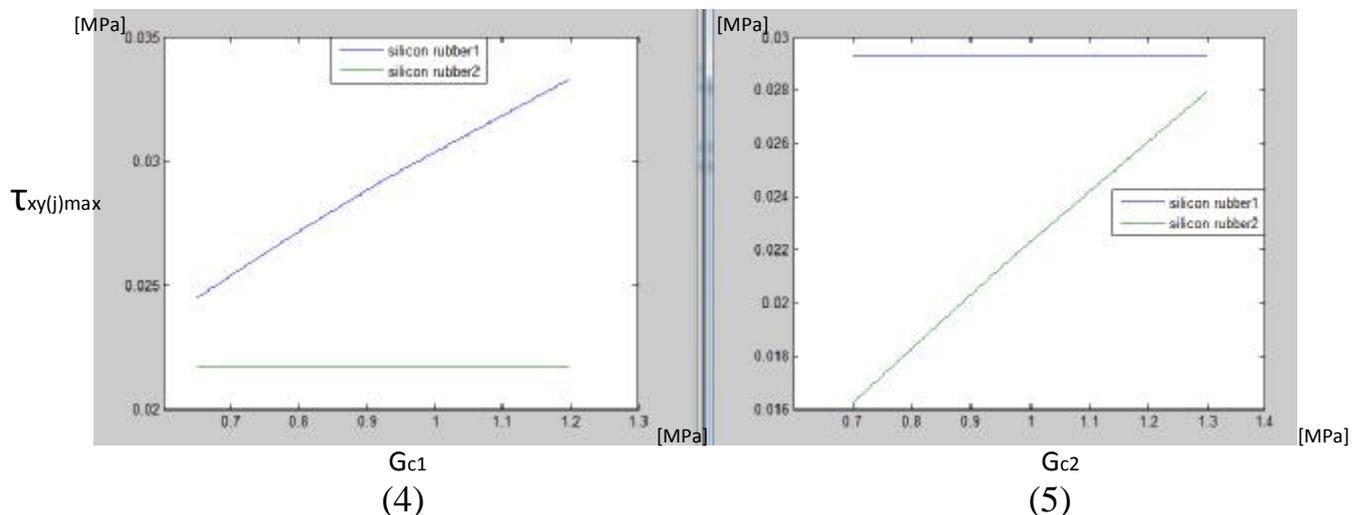


Fig. (IV-9) : Relation entre la contrainte tangentielle maximale dans chacune des couches de liaison (1) caoutchouc en silicium 1 et 2) et le module de cisaillement de chacune des couches de liaison ((4) caoutchouc en silicium1 et (5) caoutchouc en silicium2).

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

- fig. (IV-8) montre les courbes de relation entre la contrainte tangentielle maximale de chacune des couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et 2) et le module d'élasticité de chacun des matériaux du panneau solaire PV, à savoir le polyamide, le silicium et le verre. La figure (1) montre qu'avec l'augmentation du module d'élasticité du polyamide, la contrainte tangentielle maximale du caoutchouc en silicium1 s'élève rapidement. La figure (1) montre aussi qu'avec un module d'élasticité du polyamide inférieur à 840 MPa environ, la contrainte tangentielle maximale du panneau solaire est localisée dans le caoutchouc en silicium2. Pour un module d'élasticité supérieur à 840 MPa, la contrainte tangentielle maximale devient dans le caoutchouc en silicium1. On montre à partir des figures (2) et (3) que mis à part une légère variation de celle du caoutchouc en silicium1 en fonction du module d'élasticité du verre, la contrainte tangentielle maximale dans chacune des couches de liaison reste presque constante avec l'augmentation du module d'élasticité du silicium et du verre.

- fig. (IV-9) montre les courbes de relation entre la contrainte tangentielle maximale de chacune des couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et 2) et le module de cisaillement de chacune de couches de liaison. Les figures (4) et (5) sont caractérisées par les deux remarques suivantes :

- 1- La contrainte tangentielle maximale dans chacune des couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et 2) croît considérablement avec l'augmentation de son module de cisaillement correspondant.
- 2- Aucun de ces matériaux (caoutchouc en silicium 1 et 2) exerce un effet sur la contrainte tangentielle maximale de l'autre suite à l'augmentation de son module de cisaillement.

- les figures (IV-8) et (IV-9) montrent que mis à part la condition ($E_1 < 840$ MPa environ) du polyamide où la contrainte tangentielle maximale de la structure du panneau solaire est enregistrée au niveau du caoutchouc en silicium2, cette dernière est toujours localisée au niveau du caoutchouc en silicium1.

IV.6 Simulation numérique:

On s'intéresse dans cette partie à résoudre numériquement le problème des contraintes thermiques développées dans un panneau solaire photovoltaïque décrit précédemment (chapitre III). Le problème des contraintes thermiques résiduelles dans une structure multicouche (composite) donnée peut être étudié à l'aide d'un logiciel multi physique « COMSOL ».

Pour rappel, la structure du panneau solaire photovoltaïque à étudier est composée de trois couches de matériaux différents, à savoir la couverture de verre, la cellule solaire (silicium) et le film polyamide, respectivement de haut en bas. Ces couches sont collées entre elle à l'aide de deux couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et 2) (figure III-1). Les caractéristiques géométriques et thermo élastiques des matériaux constitutifs du panneau sont données dans le tableau (IV.16) ci-dessous.

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

| Matériaux | E [MPa] module d'élasticité | G [MPa] module de cisaillement | α [1/K] coefficient de dilatation thermique | ν coefficient de poisson | δ [mm] épaisseur |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------|----------------------------|
| Film polyamide | 1600 | 667 | $17,7 \cdot 10^{-6}$ | 0.3 | 0.05 |
| Cellule solaire (silicium) | 180000 | 75000 | $2,5 \cdot 10^{-6}$ | 0.2 | 0.31 |
| Couverture de verre | 55000 | 22500 | $0,6 \cdot 10^{-6}$ | 0.22 | 0.12 |
| Caoutchouc en silicium1 | 2.68 | 0.93 | $3,1 \cdot 10^{-5}$ | 0.45 | 0.2 |
| Caoutchouc en silicium2 | 2.74 | 0.97 | $4,1 \cdot 10^{-5}$ | 0.45 | 0.15 |

Comparativement à la méthode analytique établie, il s'agit donc de tracer la courbe des contraintes thermiques normales $\sigma_{xx(i)}$ ($i=1, 2, 3$) de chacun de ces matériaux collés et la courbe des contraintes thermiques tangentielles $\tau_{xy(j)}$ ($j=1, 2$) de chacun des matériaux de liaison (caoutchouc en silicium1 et 2).

IV.6.1 Simulation sous COMSOL:

Une fois le logiciel « COMSOL » est lancé, on sélectionne dans le cas de notre travail à travers le menu Navigateur de modèles l'application correspondante :

- Mécanique des structures.

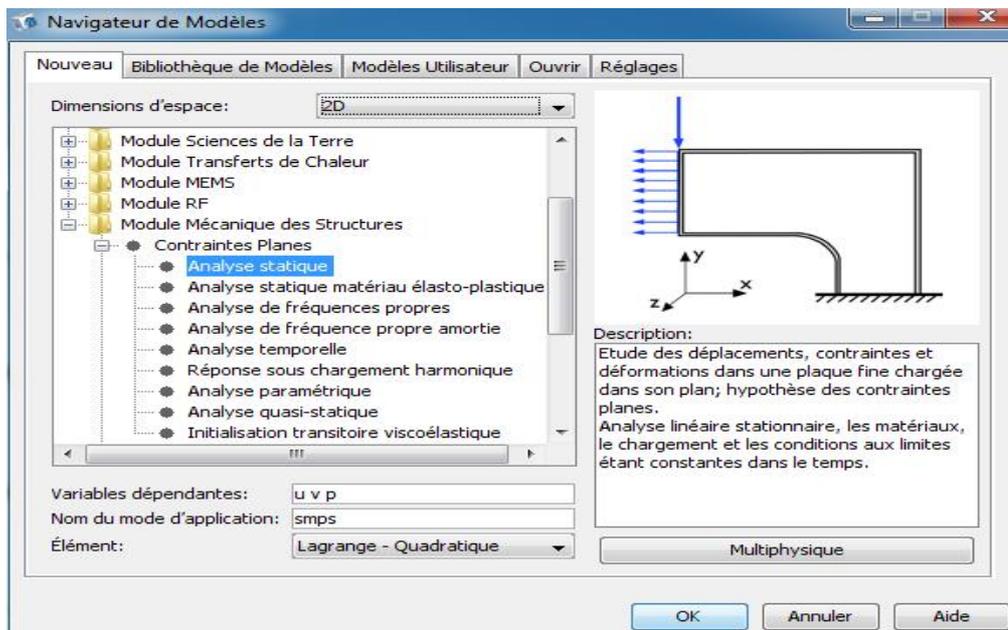


Figure (IV-10) : Navigateur de modèles

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

IV.6.1.a) Modélisation de la structure: la procédure de création de notre géométrie consisté en la superposition de cinq rectangles de largeurs différentes (axes y) et de même longueur (axes x). Chaque rectangle correspond à l'un des matériaux constitutifs du panneau solaire PV à étudier. On obtient un objet composite qui correspond à la face de profil (épaisseur, longueur) de la structure du panneau solaire photovoltaïque étudié (figure (III-2)). Le maillage adopté pour cette géométrie est rectangulaire. Illustration ci-dessous.

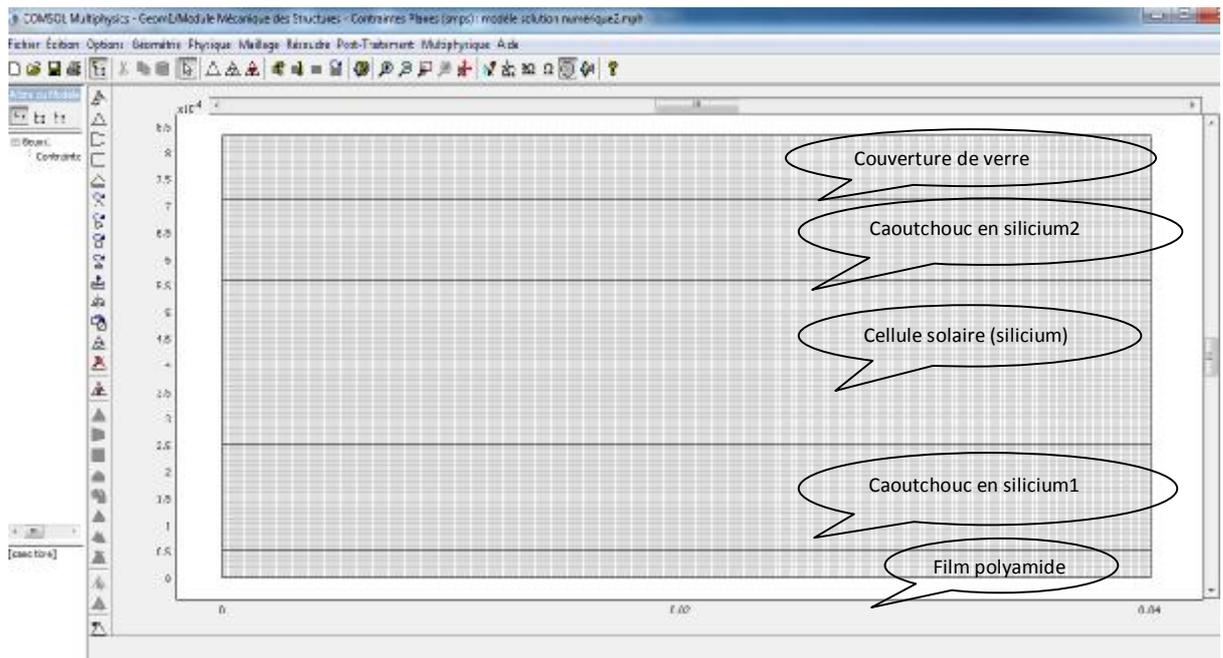


Figure (IV-11) : La géométrie maillée de la face de profil (épaisseur, longueur) de la structure du panneau solaire photovoltaïque étudié.

IV.6.1.b) Conditions aux limites :

- On met pour chaque sous-domaine (matériau) les valeurs de ces caractéristiques géométriques et thermo élastiques.

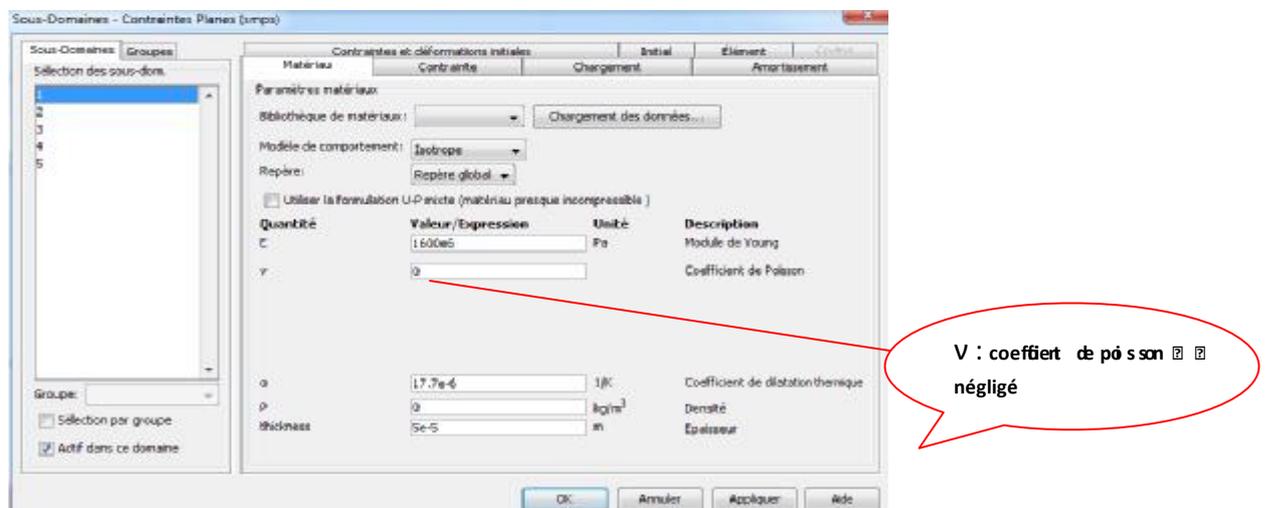


Figure (IV-12) : Spécification des propriétés du matériau (polyamide)

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

De même que la méthode analytique, on néglige le coefficient de poisson ν pour chaque matériau ($\nu=0$. Figure (IV-12)).

- la structure du panneau solaire PV étudié est libre de toute force extérieure. Elle est soumise uniquement à la radiation solaire qui fait augmenter sa température supposée uniforme.

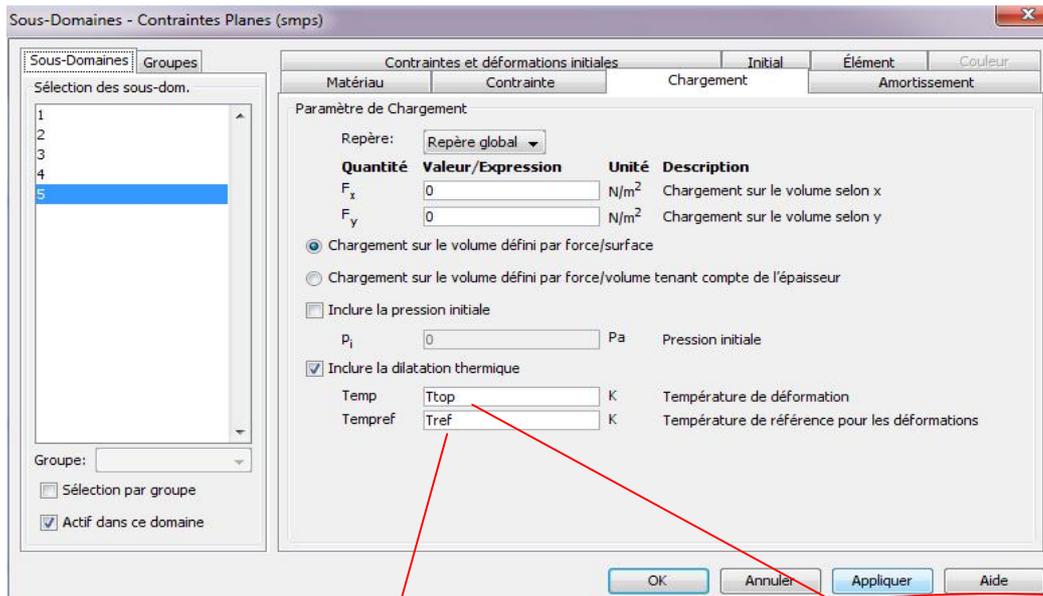


Figure (IV-13) : Chargement sur la structure du panneau solaire PV étudié.

- Pour satisfaire l'hypothèse prise dans la méthode analytique qui indique que les contraintes thermiques normales et tangentielles à déterminer sont uniformes le long de l'épaisseur, on a mis comme condition de contrainte pour chaque sous-domaine, limite et point de la structure un déplacement imposé suivant les directions x et y tel que $R_y=0$ (translation suivant y est nulle). Figure ci-dessous.



Figure (IV-14) : Condition de contrainte sur la structure du panneau solaire PV étudié

Chapitre IV

Résolution du problème des contraintes thermiques dans un panneau solaire photovoltaïque

IV.6.2 Superposition des courbes $\sigma_{xx(i)}$ et $\tau_{xy(j)}$ obtenus suivant la méthode analytique et numérique: On prend la température instantanée de la structure du panneau solaire $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pour le polyamide :

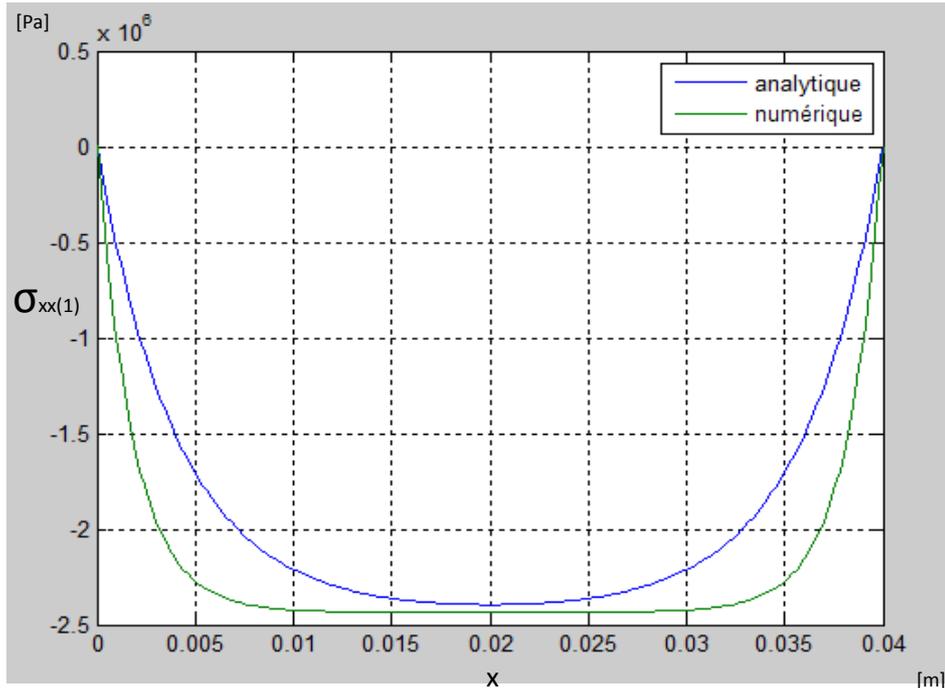


Figure (IV-15) : Superposition de la courbe $\sigma_{xx(1)}(x)$ analytique avec la courbe donnée par la solution numérique.

Pour le silicium :

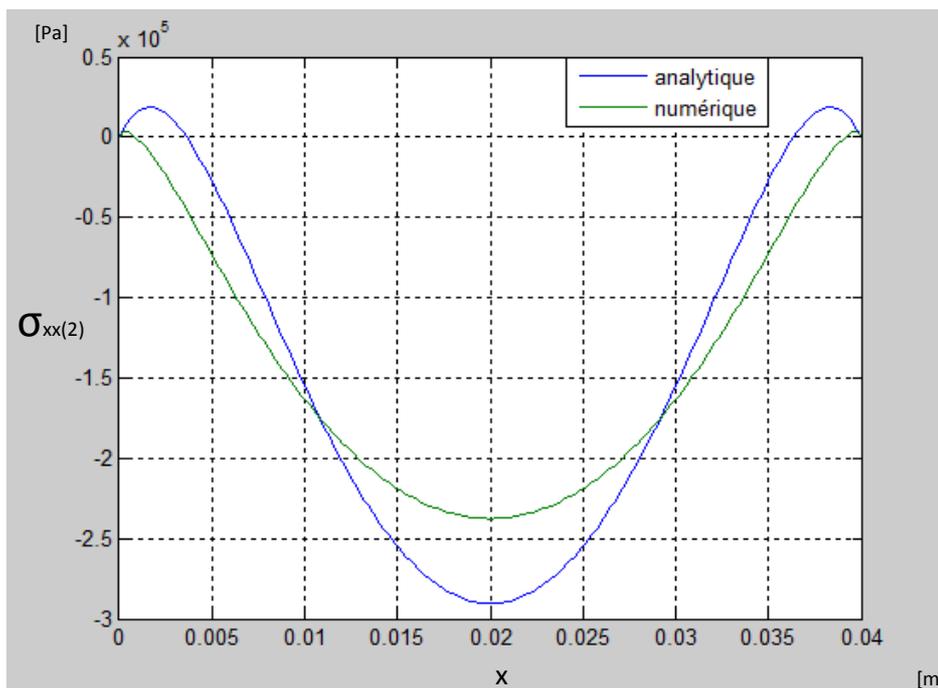


Figure (IV-16) : Superposition de la courbe $\sigma_{xx(2)}(x)$ analytique avec la courbe donnée par la solution numérique.

Pour le verre :

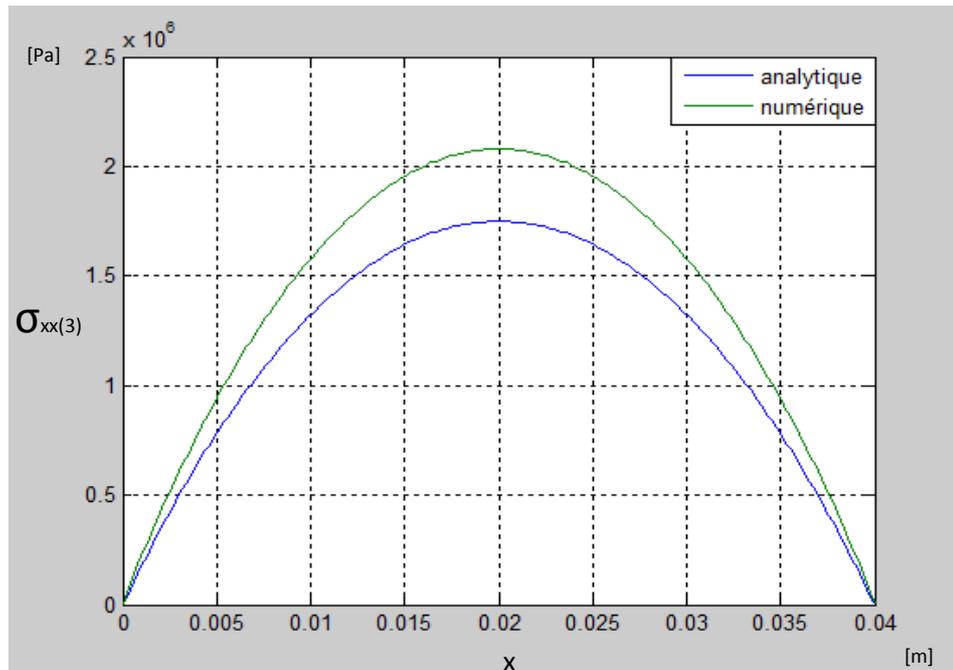


Figure (IV-17) : Superposition de la courbe $\sigma_{xx(3)}(x)$ analytique avec la courbe donnée par la solution numérique.

Pour la couche de liaison (caoutchouc en silicium1) :

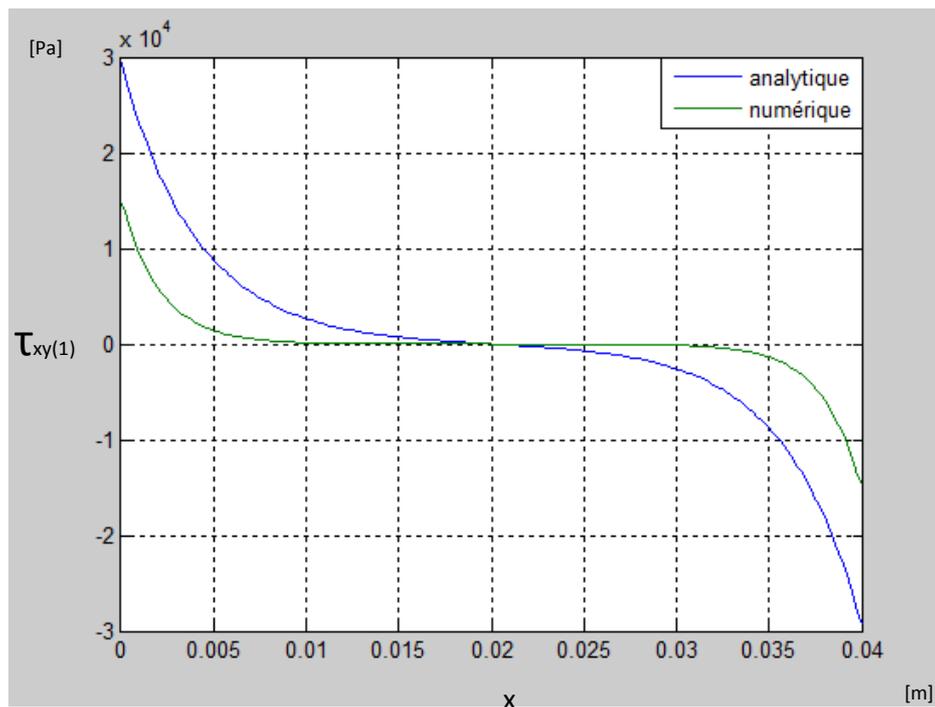


Figure (IV-18) : Superposition de la courbe $\tau_{xy(1)}(x)$ analytique avec la courbe donnée par la solution numérique.

Pour la couche de liaison (caoutchouc en silicium2) :

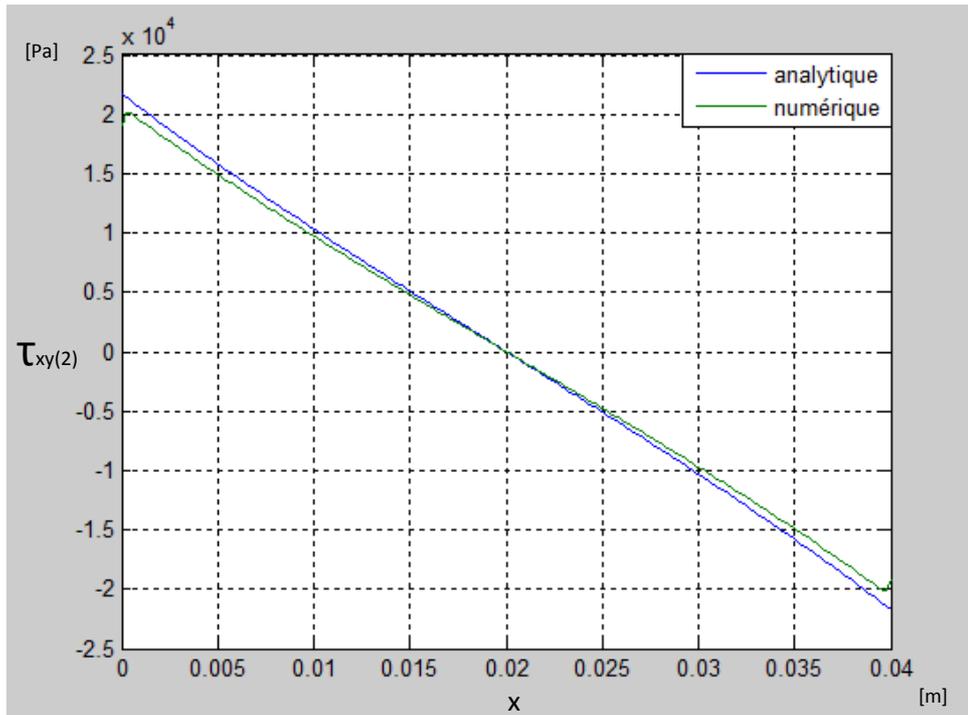


Figure (IV-19) : Superposition de la courbe $\tau_{xy(2)}(x)$ analytique avec la courbe donnée par la solution numérique.

IV.6.3 Interprétation des résultats :

- Ø Pareillement à la solution analytique, chaque courbe des contraintes normales ou tangentielles obtenue numériquement a la même allure que sa courbe analytique correspondante.
- Ø La superposition a montré un écart important entre les courbes dans certains points pour chaque matériau. Ceci est dû aux conditions aux limites choisies et à la qualité de maillage adopté.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans cette étude nous nous sommes intéressés à étudier le développement des contraintes thermiques pour un panneau solaire photovoltaïque soumis aux radiations solaire.

Plus précisément, dans cette contribution, nous avons déterminé sous des conditions données la distribution des contraintes thermiques sur la structure d'un panneau solaire photovoltaïque ainsi exposé à la radiation solaire.

Pour ce faire, nous avons effectué l'étude en considérant l'aspect théorique d'une part et la résolution numérique d'autre part.

Les résultats intéressants obtenus tant à travers un modèle analytique que par la simulation numérique sont en bon accord. Ils montrent que :

∅ L'élévation de la température, supposée uniforme, du panneau solaire sur toute sa structure causera :

a) des contraintes thermiques normales σ_{xx} de compression sur le film polyamide et la plaque de silicium.

b) des contraintes thermiques normales σ_{xx} de traction sur la couverture de verre.

La valeur maximale de ces contraintes pour chacun de ces matériaux est localisée au milieu (soit à $x=L/2$).

c) des contraintes thermiques tangentielles (τ_{xy}) pour chacune des couches de liaison (caoutchouc en silicium 1 et 2).

La valeur maximale de ces contraintes pour chacune des couches est localisée aux deux extrémités (soit à $x=0$ et $x=L$).

∅ Pour chaque matériau constitutif du panneau solaire, la contrainte maximale s'élève plus rapidement que celles enregistrées en d'autres points. De plus, sa courbe d'évolution à une forme quasi linéaire.

En utilisant le model analytique, nous avons étudié l'effet de la propriété élastique des matériaux sur l'évolution des contraintes thermiques. Les résultats suivants ont été obtenus.

∅ L'application du film polyamide avec un module d'élasticité plus petit diminue considérablement les contraintes maximales de la structure.

∅ Les matériaux utilisés pour les deux couches de liaison à faible module de cisaillement pour chacune d'elle contribuent également à diminuer les contraintes maximales de la structure.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

[1]- Wang Xiaoyan et Zheng Shuang

Publication “analytical model of thermal stress distribution of bonded structure under temperature field “

International Journal of Adhesion. Elsevier.2010

[2]- Xiaoyan Wang, Hong bin Geng, Shiyu He et Dezhuang Yang

Publication “Effect of geometric dimension on the stress in solar panel under temperature field “

Materials letters. Elsevier.2005

[3]- Wang Xiaoyan, Hongbin Geng, Shiyu He, Y.O.Pokhyl et K.V.Koval

Publication “Effect of thermal expansion coefficient on the stress distribution in solar panel “

International Journal of Adhesion. Elsevier.2006

[4]- Buratti.C et Goretti.M

Publication “Experimental Evaluation and Mapping of the Deformations Induced by Thermal Stress on Photovoltaic Panels “

Department of industrial engineering, University of Perugia, Italy. 2005.

[5]- Chowdhury.H et Cortie.M.B

Publication “Thermal stresses and cracking in absorptive solar glazing “

University of technology Sydney, Australia. 2005

[6]- A. El Amrani, A. Mahrane, F.Y. Moussa et Y. Boukennous

Publication « Procédé d’encapsulation des modules photovoltaïques type mono-verre ». Unité de développement de la technologie du silicium.02, Bd Frantz Fanon, Bp.399.Alger.2006

[7]- M. PETIBON Stéphane

Thèse doctorale « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat ; Université de Toulouse.2009

[8] -B. Flèche et D. Delagnes

Livre : énergie solaire photovoltaïque.2007

Internet :(www.4shared.com).

[9]- PFE 2010: installations thermiques et photovoltaïques pour une maison individuelle.

Bibliothèque : Département de génie mécanique, UMMTO.

[10] -« Techniques de l'ingénieur ».

[11] – **Professeur : J-J-PIREAUX**

Physique et énergie, travail sur les travaux photovoltaïques. Facultés Universitaires Notre –Dame de la paix, Namur.2006/2007

[12]- Titre : énergie solaire.doc

www.4shared.com.

[13]- **M.VIGHETTI Stéphane**

« Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble.2010

[14]- Titre : panneau solaire thermique

www.4shared.com.

[15]- **Peuser, Remmers et Schnauss**

Installations solaires thermiques. Edition le Moniteur ; ISBN : 2-913620-29-9.2005

Bibliothèque: Département de génie mécanique, UMMTO.

[16]- **M. Nichiporuk Oleksiy**

« Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités ». Thèse de doctorat, École doctorale de Lyon.2005

[17]- Titre : énergie solaire.doc

www.4shared.com.

[18]- Document intitulé : résumé théorique et guide des travaux pratiques, énergie solaire. Office de la formation professionnelle et de la promotion du travail. Royaume du maroc.2004