

REPUBLIQUE DU SENEGAL

Un peuple un but une foi

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GM.0066

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

Centre de THIES

Département Du Génie Electromécanique

# PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception en  
Génie électromécanique

**Titre:**

**Dimensionnement d'un capteur solaire  
plan par la méthode nodale.**

**Présenté par : M. DAOUDA TINE**  
élève-ingénieur en 5<sup>ème</sup> année Génie Electromécanique

**Directeur : M. MAMADOU SARR**

**Codirecteur : M. SALIF GAYE**

Année Universitaire 2001-2002

## **DEDICACES**

Après avoir remercié vivement Allah, le tout puissant de nous avoir donné l'opportunité de penser et d'écrire, nous dédions spécialement ce travail à tous nos parents.

- A nos frères et sœurs
- A nos ami(e)s et camarades de toute promotion

également, nous vous dédions ce travail.

## **REMERCIEMENTS**

Après avoir rendu grâce à Dieu, nous tenons à remercier vivement les personnes que voici :

- M. MAMADOU SARR, directeur du projet, pour la disponibilité, le dynamisme, la rigueur et le sens aigu de l'hospitalité pour ne citer que cela, dont il a fait montre durant toute la durée de ce travail.
- M. SALIF GAYE, codirecteur du projet, qui, lui aussi a apporté tout le soutien nécessaire pour la réussite de ce projet. En effet, il a toujours été à notre côté et a apporté son soutien sans faille par une orientation à chaque fois que besoin en était.

Nos remerciements vont également à l'endroit de tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

## **SOMMAIRE**

Nous aborderons dans ce qui suit, un travail ayant pour finalité la satisfaction des exigences du projet intitulé : dimensionnement d'un capteur solaire plan par la méthode nodale.

Ce présent projet ayant pour modèle thermique de base parmi tant d'autres, le capteur solaire plan a pour objectif global de valider l'utilisation de la méthode nodale pour l'étude des systèmes thermiques.

Pour mener à bien ce travail, nous procéderons d'abord à un dimensionnement du capteur par la méthode classique, puis à une modélisation des flux thermiques au niveau du capteur, compatible au logiciel MICROSIM PSPICE de simulation ensuite à un dimensionnement par la méthode nodale à l'aide du logiciel MICROSIM PSPICE avant de passer enfin à une comparaison des résultats issus des deux méthodes, ce qui nous permettra de tirer une conclusion quant à la fiabilité de la méthode nodale pour l'étude des systèmes thermiques.

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I : Données météorologiques de la station de Thiès.....	14
Tableau II: Grandeurs constantes pour tous les mois dans la simulation avec Excel.....	24
Tableau III: Résultats de calculs de rendements pour différents éclairagements.....	28
Tableau IV: Analogie thermique électrique.....	33
Tableau V: Résumé des primitives PSPICE usuelles.....	53
Tableau VI: Résultats de la comparaison des valeurs issues des deux méthodes.....	61

## **LISTE DES FIGURES**

Figure I: Evolution du rendement global $\eta$ en fonction de l'éclairement E.....	29
Figure II: Evolution du rendement instantané $\eta_i$ en fonction de l'éclairement E.....	29
Figure III: Première analogie électrique des flux thermiques dans un capteur.....	35
Figure IV: Deuxième analogie électrique des flux thermiques dans un capteur.....	36
Figure V: Schéma électrique équivalent du capteur.....	39
Figure VI: Résultats de la simulation en tension.....	56
Figure VII: Résultats de la simulation en courant.....	57
Figure VIII: Vue en coupe d'un capteur solaire plan.....	67
Figure IX: Schéma d'un système solaire.....	68
Figure X : Effet de serre à deux vitres.....	69
Figure XI : Schéma d'un capteur plan vitré.....	70
Figure XII.1 : Coupe d'un tube.....	71
Figure XII.2 : Le capteur non vitré, dit capteur moquette.....	71
Figure XIII.1 : Vue en perspective d'un capteur solaire plan.....	72

Figure XIII.2 : Le capteur plan dans le chauffage domestique.....	72
Figure XIV : Angle d'inclinaison d'un capteur.....	73
Figure XV : Capteur solaire à concentration.....	74
Figure XVI : Capteur solaire à tube sous vide.....	75

# TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I.....</b>	<b>3</b>
Rappels théoriques sur le capteur solaire.....	4
I.1 Introduction.....	4
I.2 Principes de fonctionnement.....	5
I.3 Bilan thermique.....	7
Tableau I: Données météorologiques de la station de Thiès.....	14
Tableau II: Grandeurs constantes pour tous les mois dans la simulation avec Excel.....	21
Tableau III: Résultats de calculs de rendements pour différents éclairagements....	28
Figure I: Evolution du rendement global $\eta$ en fonction de l'éclairement E.....	29
Figure II : Evolution du rendement instantané $\eta_i$ en fonction de l'éclairement E.....	29
I.4 Conclusion.....	30

<b>Chapitre II.....</b>	<b>31</b>
La méthode nodale.....	32
II.1 Introduction.....	32
II.2 Principes de base.....	32
Tableau IV: Analogie thermique électrique.....	33
II.3 Schémas analogiques du capteur plan.....	34
Figure III: Première analogie électrique des flux thermiques dans un capteur.....	35
Figure IV : Deuxième analogie électrique des flux thermiques dans un capteur .....	36
Figure V : Schéma électrique équivalent du capteur.....	39
II.4 Conclusion.....	41
<b>Chapitre III.....</b>	<b>42</b>
Le Logiciel PSPICE de simulation.....	43
III.1 Introduction.....	43
III.2 Domaine d'utilisation.....	43
III.2.a Analyses analogiques classiques et avancées.....	45
III.2.b Analyses digitales avancées.....	45

III.2.c Analyses graphiques des résultat.....	45
❖ Fonction Cross- Probing.....	46
❖ Courbes de résultats.....	46
III.2.d Analyse des sensibilités (sensitivity).....	47
III.2.e Analyse Monte-Carlo.....	47
III.2.f Optimizer.....	48
III.2.g Analyse de stress (Smoke Time Domain).....	49
❖ Efficacité et Performances.....	50
III.3 Le langage PSPICE.....	50
III.3.a Syntaxe.....	50
❖ Généralités.....	50
III.3.b Primitives.....	52
❖ Avant propos.....	52
Tableau V : Résumé des primitives PSPICE usuelles.....	53
III.4 Application au capteur plan.....	56
Figure VI : Résultats de la simulation en tension.....	56
Figure VII : Résultats de la simulation en courant.....	57
III.5 Comparaison des résultats issues des deux méthodes.....	50
Tableau VI : Résultats de la comparaison des valeurs issus des deux méthodes.....	61
III.6 Conclusion.....	63
Conclusion générale.....	64

<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>65</b>
Annexes.....	66
Annexe I.....	67
Figure VIII: Vue en coupe d'un capteur solaire plan.....	67
Annexe II.....	68
Figure IX: Schéma d'un système solaire.....	68
Annexe III.....	69
Figure X: Effet de serre à deux vitres.....	69
Annexe IV.....	70
Figure XI: Schéma d'un capteur plan vitré.....	70
Annexe V.....	71
Figure XII.1: Coupe d'un tube.....	71
Figure XII.2 : Le capteur non vitré, dit capteur moquette.....	71
Annexe VI.....	72
Figure XIII.1 : Vue en perspective d'un capteur solaire plan.....	72
Figure XIII.2 : le capteur solaire dans le chauffage domestique.....	72
Annexe VII.....	73
Figure XIV: Angle d'inclinaison d'un capteur.....	73
Annexe VIII.....	74
Figure XV : Capteur solaire à concentration.....	74
Annexe IX.....	75
Figure XVI : Capteur solaire à tube sous vide.....	75

Annexe X.....	76
Rapport de simulation avec le logiciel.....	76
Annexe XI.....	79
Complément du langage PSPICE.....	79

## NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité
$P_a$	Puissance absorbée par unité de surface	$W/m^2$
$P_u$	Puissance utile par unité de surface	$W/m^2$
$P'$	Pertes thermiques par unité de surface	$W/m^2$
$E$	Eclairement énergétique par unité de surface	$W/m^2$
$\alpha$	Absorptivité de l'absorbeur	-
$\tau$	Transmissivité du vitrage	-
$\rho$	Réflectivité des surfaces réfléchissantes	-
$C$	Concentration géométrique du capteur	-
$q$	Débit massique par unité de surface du flux caloporteur	$kg/s.m^2$
$c$	Chaleur spécifique du fluide caloporteur	$J/kg^\circ C$
$\theta_s$	Température du fluide caloporteur à la sortie du capteur	$^\circ C$
$\theta_e$	Température du fluide caloporteur à l'entrée du capteur	$^\circ C$
$C_p$	Conductance des pertes à la température $\theta_{moy}$	$W/m^2.^\circ C$
$\theta_{moy}$	Température moyenne de l'absorbeur	$^\circ C$
$\theta_a$	Température ambiante	$^\circ C$
$\eta$	Rendement global du capteur	-

$\eta_i$	Rendement instantané du capteur	-
$\Delta\theta$	Ecart de température	-
$h_r$	Coefficient d'échange par rayonnement	$W/m^2\text{°C}$
$h_{cv}$	Coefficient d'échange par convection	$W/m^2\text{°C}$
$h_{ar}$	Coefficient d'échange par conduction	$W/m^2\text{°C}$
$\lambda_{ar}$	Conductivité thermique du matériau isolant à l'arrière de l'absorbeur	$W/m\text{°C}$
$e$	Epaisseur de l'isolant à l'arrière de l'absorbeur	cm
$\theta_{ar}$	Température superficielle de la paroi arrière de l'isolant	$\text{°C}$
$h_r$	Conductance interne par rayonnement	$W/m^2\text{°C}$
$h_{cv}$	Conductance interne par convection	$W/m^2\text{°C}$
$h_r$	Conductance externe par rayonnement	$W/m^2\text{°C}$
$h_{cv}$	Conductance externe par convection	$W/m^2\text{°C}$
$\epsilon_{ac}$	Emissivité du système interne.	-
$\epsilon_v$	Emissivité du vitrage	-
$\epsilon_a$	Emissivité de l'absorbeur	-
$T_{cmoy}$	Température du vitrage	K
$\theta_{cmoy}$	Température du vitrage	$\text{°C}$
$T_{moy}$	Température moyenne de l'absorbeur	K
$T_v$	Température de la voûte environnante	K
$V$	Vitesse du vent	m/s
$E_{moy}$	Eclairement énergétique moyen par unité de surface	$W/m^2$

$\sigma$	Constante de Stephan Boltzmann	$W/m^2.K^4$
$S_f$	Section de passage	$m^2$
$D$	Diamètre des tubes de circulation	cm
$Re$	Nombre de Reynolds	-
$\rho_v$	Masse volumique du fluide caloporteur	$kg/m^3$
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide caloporteur	kg/m.s.
$v_e$	Vitesse d'écoulement du fluide caloporteur	m/s
$U$	Tension	V
$T_e$	Température de face d'entrée	K
$T_f$	Température de face de sortie	K
$\lambda$	Conductivité thermique	$W/m^\circ C$
$\phi$	Flux surfacique	$W/m^2$
$R$	Résistance électrique	$\Omega$
$I$	Courant électrique	A
$R_{f1}$	Résistance au flux par convection entre la face extérieure du vitrage et de l'air ambiant	$m^2K/W$
$R_{r1}$	Résistance équivalente pour le flux par rayonnement entre la face extérieure du vitrage et le milieu extérieur	$m^2K/W$
$R_{f2}$	Résistances au flux par convection entre l'absorbeur et le vitrage	$m^2K/W$
$R_{r2}$	Résistances au flux par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage	$m^2K/W$

$R_{c1}$	Résistance au flux par conduction à travers le vitrage	$m^2K/W$
$R_{c2}$	Résistance au flux par conduction à travers la face arrière du capteur	$m^2K/W$
$R_{c3}$	Résistance au flux par conduction à travers les faces latérales	$m^2K/W$
$R_{13}$	Résistance au flux par convection vers l'arrière et les faces latérales	$m^2K/W$
$R_1$	Résistance thermique entre le milieu extérieur et le vitrage	$m^2K/W$
$R_2$	Résistance thermique entre le vitrage et l'absorbeur	$m^2K/W$
$R_3$	Résistance thermique entre l'absorbeur et la face arrière	$m^2K/W$
$P_1$	Pertes thermiques vers l'avant	$W/m^2$
$P_2$	Pertes thermiques vers l'arrière	$W/m^2$
$k$	kilohms	-
$E_a$	Erreur absolue	-
$E_r$	Erreur relative	-

## **Introduction générale**

Dans une ère de révolution technologique l'énergie sous toutes ses formes occupe une place de choix. C'est sans doute la raison pour laquelle, ces dernières années ont été indiscutablement marquées par un accroissement considérable de l'intérêt général pour l'énergie et de ses possibilités d'utilisation.

Dans aussi bien la production que l'utilisation de l'énergie, la génération et surtout le transfert de chaleur d'un milieu à un autre sont couramment utilisés.

Le transfert de chaleur que nous avons cité ci dessus s'accompagne généralement d'un échange de chaleur par conduction, convection et ou rayonnement. Ainsi beaucoup d'auteurs ont eu à travailler sur ces différents modes de transfert de chaleur et à cet effet beaucoup de méthodes de calcul d'ordre classique ont déjà été proposées.

Dans ce présent projet intitulé dimensionnement d'un capteur solaire plan par la méthode nodale, nous nous proposons d'appliquer la méthode nodale à des systèmes thermiques.

L'aboutissement de l'application de la méthode nodale à des systèmes thermiques contribuera dans une large mesure à la rapidité et à la facilité du calcul de climatisation, de l'énergétique du bâtiment de la réfrigération mais aussi surtout du calcul des échangeurs industriels de chaleur.

Les résultats fiables obtenus sur le capteur solaire plan expliquent son choix comme modèle thermique de base.

Le capteur solaire plan constitue donc pour ce projet, un support de vérification de l'application de la méthode nodale à des systèmes thermiques, comme pourrait le constituer par ailleurs un surchauffeur d'une chaudière industrielle, un local à climatiser, une chambre de réfrigération etc.

---

Pour mener à bien ce projet, nous userons de manière générale des méthodes de calcul de transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement, de l'analogie thermique électrique et d'une simulation avec le logiciel MICROSIM PSPICE.

Ainsi dans le premier chapitre nous ferons des rappels sur le capteur plan, ce qui permettra de comprendre la suite de notre travail.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons la méthode nodale et ferons une analogie électrique des flux thermiques au niveau du capteur, ce qui permettra une étude du capteur par la méthode nodale.

Le troisième chapitre fera l'objet de la simulation avec le logiciel PSPICE, d'une comparaison des résultats issus de la méthode classique et ceux issus de la simulation.

La comparaison ci dessus nous permettra de tirer des conclusions quant à la fiabilité de l'usage de la méthode nodale pour l'étude des systèmes thermiques.

# Chapitre I

---

## Rappels théoriques sur le capteur solaire

### 1.1 Introduction

Les capteurs sont des appareils destinés à transformer l'énergie apportée par le rayonnement solaire en énergie calorifique utilisable, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur, à différents niveaux de températures.

Les fluides caloporteurs qui sont actuellement employés sont essentiellement l'eau, l'air et les fluides thermiques.

Les différentes gammes de températures utilisées pour de nombreuses applications sont les suivantes :

**Température très basse** : 10 à 20 °C.

Cette gamme est utilisée pour le chauffage de l'eau des piscines et la climatisation.

**Basse température** : 40 à 50°C.

Elle est utilisée pour le chauffage de l'eau domestique, la climatisation, la distillation, la production d'eau douce et le séchage.

**Moyenne température** : 80 à 120°C.

C'est une gamme utilisée dans la distillation par procédé Flash, la réfrigération par absorption, la production d'énergie mécanique et la production de chaleur industrielle.

**Haute température** : 200 à 600°C.

Cette gamme est utilisée dans la production d'énergie mécanique et électrique et dans la production de chaleur industrielle.

**Et très haute température** : supérieures à 800°C.

Elle est utilisée dans la production de chaleur pour des transformations chimiques.

Les capteurs solaires appartiennent à deux grandes familles : ils sont soit des non-concentrateurs à expositions directes, qui peuvent être fixes ou mobiles, soit des concentrateurs à expositions indirectes qui sont généralement mobiles.

Les appareils dénommés insolateurs et distillateurs font partie des non-concentrateurs à expositions directes. Les réflecteurs et les refracteurs par contre entrent dans la famille des concentrateurs.

Les capteurs sont généralement inclus dans un système qui a pour rôle d'assurer le stockage et ou la distribution d'énergie vers un point d'utilisation bien déterminé. La conception de ces systèmes fait appel à des techniques plus ou complexes (automatisme, thermique, etc.).

Le capteur solaire plan, dans un tel ensemble, est alors considéré comme un composant qui doit être étudié et réalisé avec soin pour que le succès de l'installation à énergie solaire soit assuré. Le capteur plan fait parti des insolateurs évoluant dans la gamme basse température où l'effet de serre est observé. La figure IX de l'annexe I donne une idée générale sur le système solaire.

## **1.2 Principe de fonctionnement**

Un capteur solaire plan comme le montre la figure VI de l'annexe II est essentiellement constitué :

- d'un panneau noir appelé absorbeur, pourvu d'un réseau de tubulures dans lesquelles circule un fluide caloporteur drainant les calories absorbées vers leur lieu d'utilisation ou de stockage.
- d'une couverture généralement en verre, simple ou double, destinée à réduire les pertes vers l'avant de l'absorbeur, par rayonnement (effet de serre) et par convection (effet de lame d'air immobile).

et d'un boîtier contenant le tout et dont les parois sont tapissées d'une couche isolante destinée à réduire les pertes de l'absorbeur vers l'arrière ou les côtés.

Le fonctionnement de tout capteur à basse température par effet de serre, s'explique par le fait que le verre est un matériau transparent au rayonnement solaire (aux courtes longueurs d'onde) alors qu'il est presque opaque au rayonnement infrarouge (aux grandes longueurs d'onde).

Un flux solaire traversant une vitre et venant chauffer un corps derrière cette vitre se trouve donc piégé, puisque le rayonnement émis par ce corps principalement dans l'infrarouge ne peut traverser la vitre.

Ce principe explique le fonctionnement des capteurs actifs aussi bien que des systèmes passifs tels que serres, murs trombe, distillateurs ou tout simplement fenêtres vitrées. Dans tous ces systèmes, le corps qui sert à capter le rayonnement, appelé absorbeur, est généralement noirci afin d'augmenter son coefficient d'absorption. L'absorbeur chauffé cède sa chaleur à un fluide circulant en bon contact thermique avec lui. Dans certains cas, l'absorbeur peut stocker lui-même cette énergie comme par exemple dans le cas des murs trombe.

D'un point de vue thermique, la surface absorbante absorbe l'énergie incidente, qu'elle transmet par l'intermédiaire de surfaces d'échanges à un fluide caloporteur.

Cette transformation s'effectue plus ou moins efficacement selon, d'une part, le type de capteur, et d'autre part, suivant le niveau de température du fluide caloporteur. Le capteur est le siège de déperditions thermiques. Les surfaces chaudes échangent de la chaleur avec l'environnement par rayonnement, conduction et convection.

### 1.3 Bilan thermique

L'équation caractérisant le fonctionnement d'un capteur solaire, en régime permanent, est par unité de surface de l'absorbeur [1] :

$$P_a = P_u + P' \quad (\text{en W/m}^2) \quad (1-1)$$

avec :

$P_a$  : puissance incidente du rayonnement absorbée par unité de surface.

$P_u$  : puissance utile par unité de surface ( en  $\text{W/m}^2$ ).

$P'$  : Pertes thermiques par unité de surface ( en  $\text{W/m}^2$ )

En régime dynamique (variation de la température de sortie du fluide caloporteur avec le temps ), il faudra faire apparaître un terme qui représente l'inertie thermique de l'appareil solaire.

En phase de démarrage de l'installation également, ce terme n'est pas négligeable. Le rayonnement incident, avant d'atteindre l'absorbeur, peut subir différents affaiblissements ou des modifications de direction.

En désignant par :

$E$  : l'éclairement énergétique par unité de surface au niveau du capteur ( $\text{W/m}^2$ ).

$\alpha$  : l'absorptivité des surfaces absorbantes (%).

$\tau$  : la transmissivité des parois protectrices (%).

$\rho$  : la réflectivité (ou la réfractivité) des surfaces réfléchissantes (ou réfractantes) (%).

l'expression de la puissance du rayonnement absorbé par unité de surface ( $P_a$ ) s'écrit alors

[1]:

$$P_a = E \times \rho \times C \times \tau \times \alpha \quad (1-2)$$

C étant la concentration géométrique du capteur.

**Remarque :**

Dans le cas des capteurs non-concentrateurs auxquels nous avons à faire.  $C=1$ .  $\rho=1$ .

Le fluide caloporteur assure la distribution de la puissance utilisable. L'énergie véhiculée est sous la forme de chaleur sensible et ou de chaleur latente.

Nous considérerons dans cette étude sans perte de généralité, le transport d'énergie sous forme de chaleur sensible.

L'expression de la puissance utile par unité de surface est donc de la forme [1]:

$$P_u = q \times c (\theta_s - \theta_e) \quad (1-3)$$

avec :  $q$  : le débit massique par unité de surface du flux caloporteur ( $\text{kg/s.m}^2$ ).

$c$  : la chaleur spécifique du fluide caloporteur ( $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ ).

$\theta_s$ ,  $\theta_e$  les températures du fluide caloporteur à la sortie et à l'entrée du capteur ( $^\circ\text{C}$ ).

Concernant les pertes thermiques par unité de surface du capteur, l'expression généralement admise qui les caractérise est la suivante [1] :

$$P' = C_p (\theta_{moy} - \theta_a) \quad (1-4)$$

avec:

$C_p$  : la conductance des pertes à la température  $\theta_{moy}$  ( $\text{W/m}^2.^\circ\text{C}$ ).

$\theta_{moy}$  : la température moyenne des surfaces absorbantes ( $^\circ\text{C}$ ).

$\theta_a$  : la température ambiante ( $^\circ\text{C}$ ).

L'expression qui caractérise la conductance apparente des pertes est généralement assez complexe car elle tient compte de l'effet couplé des pertes par convection et rayonnement avec des milieux qui ne sont pas en général à la température ambiante. C'est pourquoi, il est

préférable d'exprimer la température moyenne de l'absorbeur en fonction des températures du fluide entrée sortie et d'un gradient de température  $\Delta\theta$  correspondant au transfert de chaleur entre la surface absorbante et le fluide caloporteur.

La température moyenne d'un capteur évolue (au  $\Delta\theta$  de transfert près) entre la moyenne arithmétique des températures entrées, sorties, et la température du fluide à la sortie de l'appareil, compte tenu du  $\Delta\theta$  de transfert,  $\theta_{moy}$  est donnée par [1]:

$$\theta_{moy} = \frac{3\theta_s + \theta_e}{4} + \Delta\theta \quad (I-5)$$

L'équation (I-1), en remplaçant  $P_a$ ,  $P_u$  et  $P'$  par leurs expressions respectives devient alors [1]:

$$E \times \rho \times C \times \tau \times \alpha = q \times c(\theta_s - \theta_e) + C_p \left[ \frac{3\theta_s + \theta_e}{4} + \Delta\theta - \theta_a \right] \quad (I-6)$$

Le rendement global instantané du capteur est donné par [1] :

$$\eta = \frac{P_u}{C \times E} \quad (I-7)$$

En remplaçant  $P_u$  par sa valeur [1] :

$$P_u = E \times \rho \times C \times \tau \times \alpha \cdot C_p(\theta_{moy} - \theta_a) \quad (I-8) \text{ alors}$$

$$\eta = \rho \times \tau \times \alpha \cdot \frac{C_p(\theta_{moy} - \theta_a)}{C \times E} \quad (I-9)$$

le rendement interne instantané lui est donné par [1]:

$$\eta_i = \frac{P_u}{P_a} \quad (I-10) : \text{ avec } P_a = E \times C \cdot \rho \times \tau \times \alpha \quad (I-11) \text{ et en remplaçant } P_u \text{ par sa valeur nous}$$

obtenons [1] :

$$\eta_i = 1 - \frac{C_p(\theta_{\text{moy}} - \theta_a)}{\rho \times C \times E \times \tau \times \alpha} \quad (I-12)$$

pour un insolateur,  $C=1$  et  $\rho=1$ . Le flux de chaleur à transmettre étant également réduit, l'écart de température entre celles de l'absorbeur et du fluide peut être considéré comme négligeable ( $\Delta\theta=0$ ).

L'équation régissant ces insolateurs se déduit donc de l'équation (I-6) et devient [I] :

$$E \times \tau \times \alpha = q \times c(\theta_s - \theta_e) + C_p \left[ \frac{3\theta_s + \theta_e}{4} - \theta_a \right] \quad (I-13)$$

Pour pouvoir prévoir les performances des capteurs solaires plans, il est nécessaire de connaître leurs propriétés optiques et surtout thermiques. Les propriétés optiques des matériaux absorbants sont généralement assez faciles à estimer (les constantes optiques peuvent être considérées indépendantes de la température).

Par contre, l'évaluation de la conductance des pertes thermiques est plus complexe.

C'est pourquoi, il sera nécessaire de considérer les différentes gammes de fonctionnement qui sont liées à la température du fluide à la sortie de l'insolateur.

Nous considérerons dans cette étude, sans perte de généralité, les systèmes plus classiques.

Deux conductances de pertes sont alors à distinguer : l'une avant pour la convection et le rayonnement thermique ; l'autre arrière pour la conduction thermique à travers l'isolant.

Nous avons alors la relation suivante [I]:

$$C_p = h_r + h_{cv} + h_{ar} \quad (I-14)$$

avec :  $h_r$  : le coefficient d'échange par rayonnement ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),

$h_{cv}$  : le coefficient d'échange par convection ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),

$h_{ar}$  : le coefficient d'échange par conduction ( $W/m^2 \cdot C$ ).

Pour le coefficient d'échange par conduction  $h_{ar}$ , l'expression est indépendante de la gamme

de température et vaut [1] :

$$h_{ar} = \frac{\lambda_{ar}(\theta_{moy} - \theta_{ar})}{e(\theta_{moy} - \theta_a)} \quad (I-15)$$

Avec :  $\lambda_{ar}$  : la conductivité thermique du matériau isolant à l'arrière de l'absorbeur.

$e$  : l'épaisseur de l'isolant à l'arrière de l'absorbeur.

$\theta_{ar}$  : la température superficielle de la paroi arrière de l'isolant

Les coefficients d'échange par rayonnement  $h_r$  et d'échange par convection  $h_{cv}$  sont fonction de la gamme de température: pour ce qui est du capteur plan qui évolue dans la gamme basse température (effet de serre), nous désignerons par  $h_i$  et  $h_{e_i}$  les conductances internes et par  $h_r$  et  $h_{e_r}$  les conductances externes

Ainsi donc [1] :

$$h_r + h_{cv} = \frac{1}{\frac{1}{h_i + h_{e_i}} + \frac{1}{h_r + h_{e_r}}} \quad (I-16)$$

Avec les différentes conductances partielles ayant pour expressions [1] :

$$h_r = \frac{\epsilon_a \times \sigma (T_{moy}^4 - T_{cmoy}^4)}{T_{moy} - T_{cmoy}} \quad (I-17)$$

$$h_{cv} = 1,1(\theta_{moy} - \theta_{cmoy})^{0,75} \quad (I-18)$$

$$h_{e_i} = \frac{\epsilon_c \times \sigma (T_{cmoy}^4 - T_a^4)}{T_{cmoy} - T_a} \quad (I-19)$$

et pour des vitesses  $v$  du vent inférieures à 4m/s :

$$h_{e_{i2}} = 2,2(\theta_{cmoy} - \theta_a)^{0,25} + v \quad (I-20); \text{ mais}$$

$$h_{e_{i2}} = 7,5v^{0,80} \quad (I-21) \text{ pour } 4 < v < 40 \text{m/s}$$

avec :

$\epsilon_{ac}$  : l'émissivité du système interne.

$$\epsilon_{ac} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1}{\epsilon_a} - 1} \quad (1-22)$$

$\epsilon_c$  : l'émissivité de la couverture.

$\epsilon_a$  : l'émissivité de l'absorbeur.

$T_{cmoy}$ ,  $\theta_{cmoy}$  : la température de la couverture (K, °C).

$T_{moy}$  : la température moyenne de l'absorbeur (K).

$T_v$  : la température de la voûte environnante (K).

La température de la couverture pour le cas du capteur plan évoluant dans l'effet de serre et pour des vitesses du vent inférieures à 4m/s est déterminée par une résolution de l'équation suivante [1] :

$$\epsilon_{ac} \cdot \sigma (T_{moy}^4 - T_{cmoy}^4) + 1,1(\theta_{moy} - \theta_{cmoy})^{1,25} = \epsilon_c \times \sigma (T_{cmoy}^4 - T_v^4) + 2,2(\theta_{cmoy} - \theta_a)^{0,25} + 4v \quad (1-23)$$

Pour tenter une simulation de l'étude précédente, nous avons interrogé la station de la météorologie sénégalaise basée à Thiès qui nous a livré les données figurant sur le tableau I. Ces données sont celles moyennes pour Thiès et pour trente ans de la station de météorologie de Thiès.

En effet des données comme la température, la vitesse du vent et la radiation varient en fonction du lieu (altitude, coordonnées géographiques) et de la période.

---

Les données du tableau nous permettront donc d'avoir la valeur moyenne de chacune de ces variables. Les valeurs moyennes de ces variables nous serviront de variables de base pour la simulation.

Dans ce tableau, nous nous intéresserons seulement aux deuxième, troisième, cinquième et septième colonnes contenant respectivement la température maximale, la température minimale, la vitesse du vent et la radiation journalière par unité de surface.

## THIÈS (SENEGAL)

Pays :SENEGAL	Altitude :76m	Coordonnées :	14.48LN	16.57LO
---------------	---------------	---------------	---------	---------

MOIS	TEMP Max.°C	TEMP Min °C	Humid %	Vent Km/jour	Insolt. heures	Radiation MJ/m <sup>2</sup> .jour	ET <sub>0</sub> PenMon mm/jour	Précipitat. mm/jour
Janvier	31.5	15.0	48	216	8.4	18.4	5.40	0.0
Février	31.7	16.0	52	251	9.2	21.2	6.00	2.0
Mars	33.2	16.7	51	268	10.4	24.7	7.00	0.0
Avril	32.6	17.6	56	276	10.4	26.3	7.10	0.0
Mai	32.5	19.2	66	216	9.9	24.6	6.10	2.0
Juin	33.1	21.8	71	156	9.0	23.0	5.40	24.0
Juillet	31.6	23.0	76	156	7.6	20.8	4.80	122.0
Août	30.5	22.7	84	104	5.7	18.2	4.00	273.0
Septembre	31.1	22.5	86	104	7.1	19.9	4.20	206.0
Octobre	32.5	21.8	80	78	8.4	20.5	4.20	57.0
Novembre	33.5	18.6	69	104	8.9	19.5	4.30	3.0
Décembre	31.1	15.5	55	130	7.8	17.1	4.20	5.0
<b>ANNEE</b>	<b>32.1</b>	<b>19.2</b>	<b>66</b>	<b>172</b>	<b>8.6</b>	<b>21.2</b>	<b>5.225</b>	<b>57.833</b>

**Tableau I** : Données météorologiques de la station de Thiès.

Nous prendrons une température ambiante voisine de la demi-somme de la moyenne des températures maximales et de la moyenne des températures minimales.

Ainsi donc du tableau ci dessus, la demi-somme vaut :  $\frac{32,1+19,2}{2}=25,65$ .

Nous prendrons alors une température ambiante  $\theta_a=26^\circ\text{C}$ .

La vitesse moyenne du vent donnée par le tableau est  $v_{moy}=172\text{km/jour}=1,9907\text{m/s}$ .

Nous prendrons une vitesse du vent de  $v=2\text{m/s}$ .

Pour ce qui est de l'éclairement énergétique, le tableau donne  $E_{moy}=21,2\text{MJ/m}^2\cdot\text{jour}$   
 $=245,37037\text{ W/m}^2$ .

Nous prendrons une valeur de l'éclairement énergétique  $E=245\text{W/m}^2$ .

Nous choisirons également comme fluide caloporteur, l'eau avec les conditions suivantes [1]:

-température d'entrée du fluide caloporteur :  $\theta_e=20^\circ\text{C}$

-température de sortie du fluide caloporteur :  $\theta_s=60^\circ\text{C}$

-température de la voûte céleste :  $T_v=283\text{K}$

-émissivité de l'absorbeur :  $\epsilon_a=0,88$

-émissivité de la couverture :  $\epsilon_c=0,88$

-transmissivité de la couverture :  $\tau=85\%$

-absorptivité de l'absorbeur :  $\alpha=90\%$

-réflectivité de la surface réfléchissante :  $\rho=1$

-concentration géométrique du capteur :  $C=1$

-constante de Stephan Boltzmann :  $\sigma=5,67\cdot 10^{-8}\text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$

-chaleur spécifique de l'eau :  $c=4180\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Les propriétés optiques ci-dessus sont des propriétés optiques moyennes et pour un capteur fixe et incliné sur le plan horizontal d'un angle voisin de la latitude du lieu.

La transmissivité moyenne de la lame de verre, elle, est constante pour des angles d'incidence ne dépassant pas 60°.

Pour assurer l'isolation de l'arrière de l'absorbeur, nous choisirons comme matériau, la laine de verre avec les caractéristiques suivantes[1] :

-conductivité thermique de la laine de verre :  $\lambda_{ar} = 0.034 \text{ W/m.K}$

-épaisseur de l'isolant :  $e=20\text{cm}$ .

-température superficielle de la paroi arrière de l'isolant :  $\theta_{ar} = 30^\circ\text{C}$

Dans ces conditions, la puissance du rayonnement absorbée par unité de surface vaut d'après

$$(1-2) : P_a = 245 \times 1 \times 1 \times 0.85 \times 0.9 = 187.425$$

$$P_a = 187.425 \text{ W/m}^2$$

La température moyenne au niveau de l'absorbeur d'après (1-5) est donnée par :

$$\theta_{moy} = \frac{3 \times 60 + 20}{4} = 50$$

$$\theta_{moy} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

Pour pouvoir déterminer la conductance des pertes thermiques  $C_p$ , déterminons d'abord les coefficients d'échange  $h_r$ ,  $h_{cv}$  et  $h_{ar}$ .

Le coefficient d'échange par conduction est donné d'après (1-15) par :

$$h_{ar} = \frac{0.034(50-30)}{0.2(50-26)} = 0.1417 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{ar} = 0.1417 \text{ W/m}^2\text{K}$$

L'émissivité apparente du système interne  $\epsilon_{ac}$  vaut d'après (I-22) :  $\epsilon_{ac} = \frac{1}{\frac{1}{0,88} + \frac{1}{0,88}} = 0,7857$

$$\boxed{\epsilon_{ac} = 0,7857}$$

La température de la couverture peut être déterminée par la résolution de l'équation (I-23):

En effet dans cette équation du quatrième degré, seule la température de couverture  $T_{cmoy}$  reste inconnue.

En remplaçant toutes les autres grandeurs par leur valeur respective, nous obtenons alors:

$$4,4549 \cdot 10^{-8} (323^4 - T_{cmoy}^4) + 1,1 (323 - T_{cmoy})^{1,25} = 4,9896 \cdot 10^{-8} (T_{cmoy}^4 - 283^4) + 2,2 (T_{cmoy} - 299)^{0,25} + 8 \quad (I-25)$$

La résolution de cette équation par une calculette (TI92 : Texas Instruments 92+) donne :

$$\boxed{T_{cmoy} = 306,238 \text{ k}}$$

Ainsi donc  $\boxed{\theta_{cmoy} = 33,238^\circ \text{C}}$

La somme  $h^r + h^{cv}$  est déterminée par l'équation (I-16) après la détermination des différentes conductances partielles  $h^r$ ,  $h^{cv}$ ,  $h''_r$  et  $h''_{cv}$ .

Ces coefficients valent respectivement :

-d'après (I-17) :  $h^r = \frac{0,7857 \times 5,67 \cdot 10^{-8} (323^4 - 306,238^4)}{323 - 306,238} = 5,553 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$\boxed{h^r = 5,553 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

-d'après (I-18) :  $h^{cv} = 1,1 (50 - 33,238)^{0,25} = 2,226 \text{ W/K}$

$$\boxed{h^{cv} = 2,226 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

-d'après (I-19) :

$$h'' = \frac{0,88 \times 5,67 \cdot 10^{-8} (306,238^4 - 283^4)}{306,238 - 299} = 16,412 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h''_r = 16,412 \text{ W/m}^2\text{K}$$

-d'après (I-20) :  $h''_{cv} = 2,2(33,238-26)^{0,25} + 8 = 11,609 \text{ W/K}$

$$h''_{cv} = 11,609 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ainsi donc la somme  $h_r + h_{cv}$  vaut d'après (I-16) :

$$h_r + h_{cv} = \frac{1}{\frac{1}{5,553} + \frac{1}{2,226} + \frac{1}{16,412} + \frac{1}{11,609}} = 6,089 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_r + h_{cv} = 6,089 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Et la conductance apparente des pertes à la température  $\theta_{moy}$  vaut d'après (I-14) :

$$C_p = 6,089 + 0,1417 = 6,2307 \text{ W/K.} \quad C_p = 6,2307 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Les pertes thermiques au niveau du capteur valent alors d'après (I-4) :

$$P' = 6,2307(50-26) = 149,5368 \quad P' = 149,5368 \text{ W/m}^2$$

Quant à la puissance du rayonnement absorbée par unité de surface, elle vaut d'après (I-2) :

$$P_a = 245 \times 1 \times 1 \times 0,85 \times 0,9 = 187,425 \text{ W/m}^2$$

$$P_a = 187,425 \text{ W/m}^2$$

L'équation (I-1), nous permettra par différence de calculer la puissance utile par unité de

$$\text{surface : } P_u = 187,425 - 149,5368 = 37,8882 \quad P_u = 37,8882 \text{ W/m}^2$$

Cette puissance nous servira à déterminer le débit massique par unité de surface  $q$ .

En effet de (I-3) il ressort :  $q = \frac{37,8882}{4180(60-20)} = 0,00023 \text{ kg/s.m}^2$

$$q = 0,00023 \text{ kg/s.m}^2$$

Le rendement global instantané vaut d'après (I-7) :

$$\eta = \frac{37,8882}{1 \times 245} = 0,1546$$

$$\eta = 0,1546$$

Le rendement interne instantané lui est donné par (I-10) :

$$\eta_i = \frac{37,8882}{187,425} = 0,2022$$

$$\eta_i = 0,2022$$

La section de passage  $S_f$  est donnée par  $S_f = \frac{q}{v_c}$  (I-24), avec  $v_c$  la vitesse d'écoulement

du fluide. Cette vitesse d'écoulement est fixée selon les conditions de confort.

Nous prendrons sans pertes de généralité  $v_c = 0,5 \text{ m/s}$ .

Dans ces conditions :

$$S_f = \frac{0,00023}{0,5} = 0,00046 \quad S_f = 0,00046 \text{ m}^2 = 4,6 \text{ cm}^2$$

Le diamètre du tube de circulation est alors donné par :

$$D = 2\sqrt{\frac{S_f}{\pi}} \quad (I-25) : \quad D = 2\sqrt{\frac{0,00046}{\pi}} = 0,0242$$

$$D = 0,0242 \text{ m} = 24,2 \text{ mm}$$

Le nombre de Reynolds est donné par :

$$R_e = \frac{\rho_v \times v_c \times D}{\mu} \quad \text{avec :}$$

$\rho_v$  la masse volumique et  $\mu$  la viscosité dynamique du fluide caloporteur :

$$\rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3, \quad \mu = 0,65 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s.}$$

$$\text{Ainsi donc : } R_e = \frac{1000 \times 0,5 \times 0,0242}{0,65 \times 10^{-3}} = 18615,385$$

$$R_e = 18615,385$$

Le régime d'écoulement est donc franchement turbulent car  $R_e$  est supérieur à 9000.

Les valeurs que nous venons de calculer sont des valeurs issues des grandeurs moyennes de bases telles que la température, l'ensoleillement et la vitesse du vent du tableau I.

Ces valeurs moyennes sont beaucoup plus représentatives mais néanmoins, nous donnerons sous forme de tableaux, les valeurs mensuelles de ces grandeurs issues d'une simulation avec Excel des différentes grandeurs de base du tableau I.

Les valeurs obtenues par cette simulation permettront de voir les performances mensuelles du capteur mais aussi et surtout de localiser les périodes annuelles où ses performances atteignent leurs valeurs maximales.

Pour la simulation avec Excel, les valeurs du tableau II restent inchangées. Ces grandeurs auront pour valeurs pour tous les mois les suivantes :

$\sigma$	$5.67.10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
$\epsilon_c$	0.88
$\tau$	85%
$\alpha$	90%
$\rho$	1
C	1
$\epsilon_a$	0.88
c	4180J/kg $^{\circ}\text{C}$
$T_v$	283 $^{\circ}\text{K}$
$\theta_e$	20 $^{\circ}\text{C}$
$\theta_s$	60 $^{\circ}\text{C}$
$\lambda_{ar}$	0.034 W/m.K
e	20cm.
$\theta_{moy}$	50 $^{\circ}\text{C}$
$\epsilon_{ac}$	0.7857

**Tableau II:** Grandeurs constantes pour tous les mois dans la simulation avec Excel

Les résultats de la simulation avec Excel sont donnés dans les pages 22 à 27 suivantes.

Pour avoir ces résultats, il suffit d'introduire les grandeurs constantes du tableau II et d'écrire les relations liant ces grandeurs à celles cherchées par l'intermédiaire de fonctions prédéfinies dans Excel, comme dans le bilan classique.

Janvier	$\sigma$	5.67E-08	$\theta_a$	23.25	$T_a$	296.25
	$\varepsilon_c$	0.88	$v$	2.5		
	$\tau$	0.85	$F$	212,9629		
	$\alpha$	0.9	$Pa$	162.916619		
	$\rho$	1	$har$	0.14457944		
	$C$	1	$T_{moy}$	306,07		
	$\varepsilon_a$	0,88	$h'r$	5,54908252		
	$c$	4180	$h'cv$	2,23129465		
	$T_v$	283	$h''cv$	13.8944896		
	$\theta_e$	20	$h''r$	0.38497177		
	$\theta_s$	60	$hr+hcv$	5.24821537		
	$\lambda_{ar}$	0.034	$C_p$	5.39279481		
	$e$	0.2	$P'$	144.257261		
	$\theta_{ar}$	27.25	$Pa$	162.916619		
	$\theta_{moy}$	50	$Pu$	18.6593574		
	$\varepsilon_{ac}$	0.7857	$q$	0.00011159		
	$T_{moy}$	323	$\eta$	<b>0,08761788</b>		
	$\theta_{cmoy}$	33.07	$\eta_i$	<b>0,11453317</b>		

Février	$\sigma$	5.67E-08	$\theta_a$	23.85	$T_a$	296,85
	$\varepsilon_c$	0.88	$v$	2.9051		
	$\tau$	0.85	$F$	245.3704		
	$\alpha$	0.9	$Pa$	187.708356		
	$\rho$	1	$har$	0.14399618		
	$C$	1	$T_{moy}$	305.956		
	$\varepsilon_a$	0.88	$h'r$	5.54612197		
	$c$	3000	$h'cv$	2.23504137		
	$T_v$	283	$h''cv$	15.4420824		
	$\theta_e$	20	$h''r$	0.38298417		
	$\theta_s$	60	$hr+hcv$	5.40290032		
	$\lambda_{ar}$	0.034	$C_p$	5.54689649		
	$e$	0.2	$P'$	145.051343		
	$\theta_{ar}$	27.85	$Pa$	187.708356		
	$\theta_{moy}$	50	$Pu$	42.6570127		
	$\varepsilon_{ac}$	0.7857	$q$	0.00025512		
	$T_{moy}$	323	$\eta$	<b>0,17384743</b>		
	$\theta_{cmoy}$	32.956	$\eta_i$	<b>0,22725154</b>		

Mars	$\sigma$	5,67E-08	$\theta_a$	24,95	Ta	297,95
	$\epsilon_c$	0,88	v	3,1019		
	$\tau$	0,85	E	285,8796		
	$\alpha$	0,9	Pa	218,697894		
	$\rho$	1	har	0,14285429		
	C	1	Tcmoy	305,908		
	$\epsilon_a$	0,88	h'r	5,54487585		
	c	3000	h'cv	2,23661332		
	Tv	283	h"cv	16,1026785		
	$\theta_e$	20	h"r	0,38214756		
	$\theta_s$	60	hr+hcv	5,46335122		
	$\lambda_{ar}$	0,034	Cp	5,60620551		
	e	0,2	P'	140,435448		
	$\theta_{ar}$	28,95	Pa	218,697894		
	$\theta_{moy}$	50	Pu	78,262446		
	$\epsilon_{ac}$	0,7857	q	0,00046807		
	Tmoy	323	$\eta$	<b>0,27376016</b>		
	$\theta_{cmoy}$	32,908	$\eta_i$	<b>0,35785642</b>		

Avil	$\sigma$	5,67E-08	$\theta_a$	25,1	Ta	298,1
	$\epsilon_c$	0,88	v	3,1944		
	$\tau$	0,85	E	304,3981		
	$\alpha$	0,9	Pa	232,864547		
	$\rho$	1	har	0,14269076		
	C	1	Tcmoy	305,882		
	$\epsilon_a$	0,88	h'r	5,54420098		
	c	3000	h'cv	2,2374634		
	Tv	283	h"cv	16,4520766		
	$\theta_e$	20	h"r	0,38169446		
	$\theta_s$	60	hr+hcv	5,49411072		
	$\lambda_{ar}$	0,034	Cp	5,63680148		
	e	0,2	P'	140,356357		
	$\theta_{ar}$	29,1	Pa	232,864547		
	$\theta_{moy}$	50	Pu	92,5081895		
	$\epsilon_{ac}$	0,7857	q	0,00055327		
	Tmoy	323	$\eta$	<b>0,30390528</b>		
	$\theta_{cmoy}$	32,882	$\eta_i$	<b>0,3972618</b>		

Mai	$\sigma$	5,67E-08	$\theta_a$	25,85	Ta	298,85
	$\epsilon_c$	0,88	v	2,5		
	$\tau$	0,85	E	284,7222		
	$\alpha$	0,9	Pa	217,812483		
	$\rho$	1	har	0,14184265		
	C	1	Tcmoy	306,091		
	$\epsilon_a$	0,88	h'r	5,54962804		
	c	3000	h'cv	2,23060241		
	Tv	283	h"cv	13,608879		
	$\theta_e$	20	h"r	0,385338		
	$\theta_s$	60	hr+hcv	5,21745634		
	$\lambda_{ar}$	0,034	Cp	5,35929899		
	e	0,2	P'	129,427071		
	$\theta_{ar}$	29,85	Pa	217,812483		
	$\theta_{moy}$	50	Pu	88,3854123		
	$\epsilon_{ac}$	0,7857	q	0,00052862		
	Tmoy	323	$\eta$	<b>0,31042684</b>		
	$\theta_{cmoy}$	33,091	$\eta_i$	<b>0,40578672</b>		

Juin	$\sigma$	5,67E-08	$\theta_a$	27,45	Ta	300,45
	$\epsilon_c$	0,88	v	1,8056		
	$\tau$	0,85	E	266,2037		
	$\alpha$	0,9	Pa	203,645831		
	$\rho$	1	har	0,13984479		
	C	1	Tcmoy	306,308		
	$\epsilon_a$	0,88	h'r	5,55526795		
	c	3000	h'cv	2,22341115		
	Tv	283	h"cv	10,6450306		
	$\theta_e$	20	h"r	20,3468523		
	$\theta_s$	60	hr+hcv	4,84810834		
	$\lambda_{ar}$	0,034	Cp	4,98795313		
	e	0,2	P'	112,478343		
	$\theta_{ar}$	31,45	Pa	203,645831		
	$\theta_{moy}$	50	Pu	91,1674875		
	$\epsilon_{ac}$	0,7857	q	0,00054526		
	Tmoy	323	$\eta$	<b>0,34247265</b>		
	$\theta_{cmoy}$	33,308	$\eta_i$	<b>0,44767667</b>		

Juillet	$\sigma$	5,67E-08	$\theta_a$	27,3	Ta	300,3
	$\epsilon_c$	0,88	v	1,8056		
	$\tau$	0,85	E	240,7407		
	$\alpha$	0,9	Pa	184,166636		
	$\rho$	1	har	0,14004405		
	C	1	Tcmoy	306,307		
	$\epsilon_a$	0,88	h'r	5,55524195		
	c	3000	h'cv	2,22344445		
	Tv	283	h"cv	10,6665899		
	$\theta_e$	20	h"r	0,38910676		
	$\theta_s$	60	hr+hcv	4,85117275		
	$\lambda_{ar}$	0,034	Cp	4,9912168		
	e	0,2	P'	113,300621		
	$\theta_{ar}$	31,3	Pa	184,166636		
	$\theta_{moy}$	50	Pu	70,8660141		
	$\epsilon_{ac}$	0,7857	q	0,00042383		
	Tmoy	323	$\eta$	<b>0,29436657</b>		
	$\theta_{cmoy}$	33,307	$\eta_i$	<b>0,3847929</b>		

Aout	$\sigma$	5,67E-08	$\theta_a$	26,6	Ta	299,6
	$\epsilon_c$	0,88	v	1,2037		
	$\tau$	0,85	E	210,6481		
	$\alpha$	0,9	Pa	161,145797		
	$\rho$	1	har	0,14094017		
	C	1	Tcmoy	306,475		
	$\epsilon_a$	0,88	h'r	5,55961189		
	c	3000	h'cv	2,21782897		
	Tv	283	h"cv	8,37718502		
	$\theta_e$	20	h"r	17,4764419		
	$\theta_s$	60	hr+hcv	4,48508898		
	$\lambda_{ar}$	0,034	Cp	4,62602915		
	e	0,2	P'	108,249082		
	$\theta_{ar}$	30,6	Pa	161,145797		
	$\theta_{moy}$	50	Pu	52,8967144		
	$\epsilon_{ac}$	0,7857	q	0,00031636		
	Tmoy	323	$\eta$	<b>0,25111413</b>		
	$\theta_{cmoy}$	33,475	$\eta_i$	<b>0,32825376</b>		

Septembre	$\sigma$	5,67E-08	$\theta_a$	26,8	Ta	299,8
	$\epsilon_c$	0,88	v	1,2037		
	$\tau$	0,85	E	230,324		
	$\alpha$	0,9	Pa	176,19786		
	$\rho$	1	har	0,14068966		
	C	1	Tcmoy	306,476		
	$\epsilon_a$	0,88	h'r	5,55963791		
	c	3000	h'cv	2,21779542		
	Tv	283	h"cv	8,35112167		
	$\theta_e$	20	h"r	0,39205772		
	$\theta_s$	60	hr+hcv	4,48040325		
	$\lambda_{ar}$	0,034	Cp	4,62109291		
	e	0,2	P'	107,209355		
	$\theta_{ar}$	30,8	Pa	176,19786		
	$\theta_{moy}$	50	Pu	68,9885046		
	$\epsilon_{ac}$	0,7857	q	0,00041261		
	Tmoy	323	$\eta$	<b>0,29952808</b>		
	$\theta_{cmoy}$	33,476	$\eta_i$	<b>0,39153997</b>		

Octobre	$\sigma$	5,67E-08	$\theta_a$	27,15	Ta	300,15
	$\epsilon_c$	0,88	v	0,9028		
	$\tau$	0,85	E	237,2685		
	$\alpha$	0,9	Pa	181,510403		
	$\rho$	1	har	0,1402407		
	C	1	Tcmoy	306,567		
	$\epsilon_a$	0,88	h'r	5,56200628		
	c	3000	h'cv	2,21473566		
	Tv	283	h"cv	7,11271258		
	$\theta_e$	20	h"r	18,8061931		
	$\theta_s$	60	hr+hcv	4,24089987		
	$\lambda_{ar}$	0,034	Cp	4,38114057		
	e	0,2	P'	100,109062		
	$\theta_{ar}$	31,15	Pa	181,510403		
	$\theta_{moy}$	50	Pu	81,4013404		
	$\epsilon_{ac}$	0,7857	q	0,00048685		
	Tmoy	323	$\eta$	<b>0,3430769</b>		
	$\theta_{cmoy}$	33,567	$\eta_i$	<b>0,44846653</b>		

Novembre	$\sigma$	5,67E-08	$\theta_a$	26,05	Ta	299,05
	$\epsilon_c$	0,88	v	1,2037		
	$\tau$	0,85	E	225,6944		
	$\alpha$	0,9	Pa	172,656216		
	$\rho$	1	har	0,14160752		
	C	1	Tcmoy	306,47		
	$\epsilon_a$	0,88	h'r	5,55948179		
	c	3000	h'cv	2,21799671		
	Tv	283	h"cv	8,44577833		
	$\theta_e$	20	h"r	0,39195292		
	$\theta_s$	60	hr+hcv	4,49737763		
	$\lambda_{ar}$	0,034	Cp	4,63898515		
	e	0,2	P'	111,103694		
	$\theta_{ar}$	30,05	Pa	172,656216		
	$\theta_{moy}$	50	Pu	61,5525217		
	$\epsilon_{ac}$	0,7857	q	0,00036813		
	Tmoy	323	$\eta$	<b>0,27272507</b>		
	$\theta_{cmoy}$	33,47	$\eta_i$	<b>0,35650336</b>		

Décembre	$\sigma$	5,67E-08	$\theta_a$	23,3	Ta	296,3
	$\epsilon_c$	0,88	v	1,5046		
	$\tau$	0,85	E	197,9167		
	$\alpha$	0,9	Pa	151,406276		
	$\rho$	1	har	0,14453184		
	C	1	Tcmoy	306,36		
	$\epsilon_a$	0,88	h'r	5,55662023		
	c	3000	h'cv	2,22167749		
	Tv	283	h"cv	9,93646987		
	$\theta_e$	20	h"r	11,8777538		
	$\theta_s$	60	hr+hcv	4,74355832		
	$\lambda_{ar}$	0,034	Cp	4,88809015		
	e	0,2	P'	130,512007		
	$\theta_{ar}$	27,3	Pa	151,406276		
	$\theta_{moy}$	50	Pu	20,8942684		
	$\epsilon_{ac}$	0,7857	q	0,00012496		
	Tmoy	323	$\eta$	<b>0,10557102</b>		
	$\theta_{cmoy}$	33,36	$\eta_i$	<b>0,13800134</b>		

A partir des valeurs de l'éclairement  $E$  issues des tableaux ci-dessus, nous pouvons tenter de tracer l'évolution des deux rendements en fonction de l'éclairement à  $\theta_e$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_a$  et  $v$  fixées.

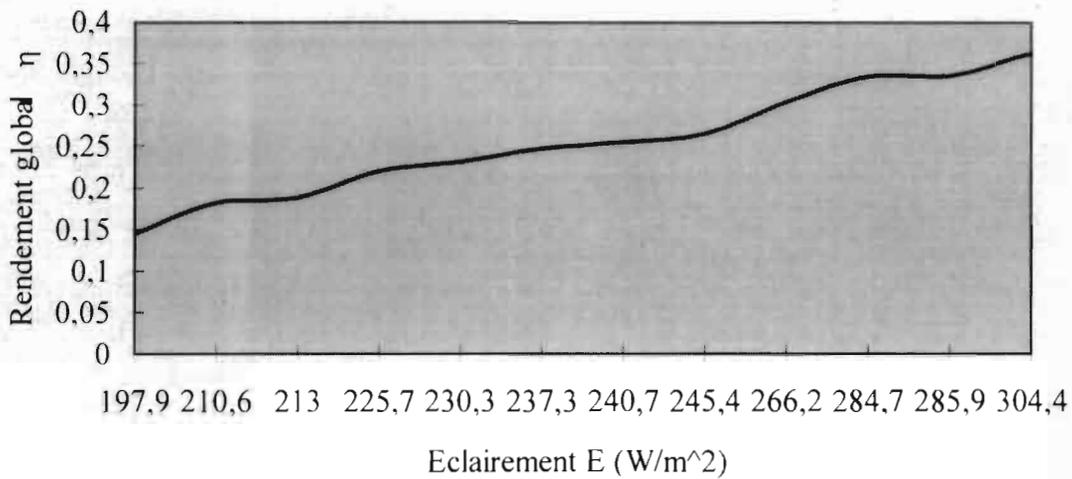
Pour se faire, nous prendrons  $\theta_e=20^\circ\text{C}$ ,  $\theta_s=60^\circ\text{C}$ ,  $\theta_a=26^\circ\text{C}$  et  $v=2\text{m/s}$ . Dans ces conditions nous obtenons le tableau III suivant :

$E(\text{W/m}^2)$	$\eta$	$\eta_i$
212,9629	0,18806475	0,24583627
245,3704	0,26436967	0,34558127
285,8796	0,33534817	0,43836362
304,3981	0,36150674	0,47255783
284,7222	0,33345482	0,43588865
266,2037	0,30325834	0,39641613
240,7407	0,25442107	0,33257656
210,6481	0,18131833	0,23701742
230,324	0,23117967	0,30219564
237,2685	0,24672847	0,32252088
225,6944	0,22023487	0,28788872
197,9167	0,14388953	0,18809088

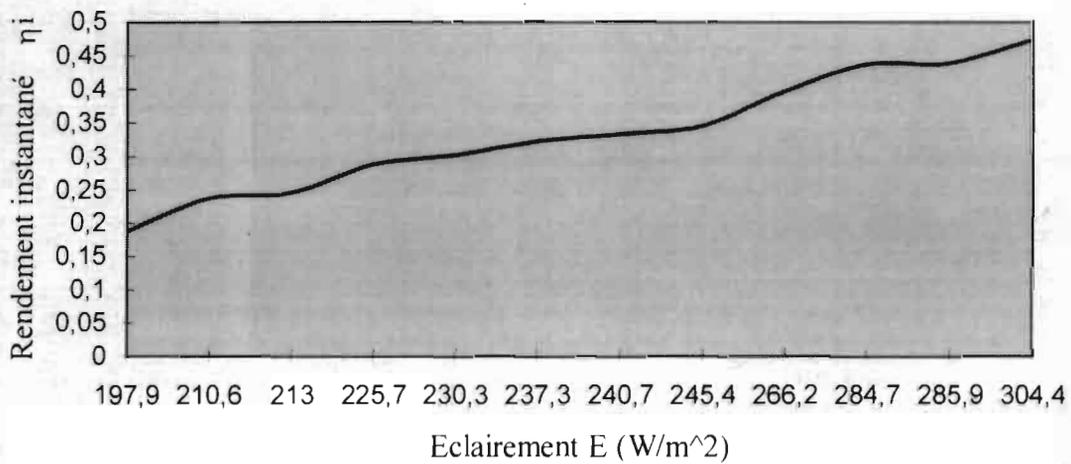
**Tableau III** : Résultats de calculs de rendements pour différents éclairagements

Avec Excel nous obtenons les courbes suivantes :

**Figure I:** Evolution du rendement global  $\eta$  en fonction de l'éclairement E



**Figure II:** Evolution du rendement instantané  $\eta_i$  en fonction de l'éclairement E



---

#### **I.4 Conclusion :**

Cette partie nous a permis de passer en revue un certain nombre de paramètres du capteur solaire plan.

De ce qui précède également, il ressort que l'obtention de ces paramètres par cette méthode passe par la manipulation d'équations parfois difficiles à résoudre.

La simulation sur Excel avec les données sur les douze mois nous permet de voir que les rendements aussi bien instantané que global atteignent leur valeur maximale au mois d'octobre et valent respectivement  $\eta_i=0,44846653$  et  $\eta=0,3430769$ .

La courbe donnant l'évolution du rendement en fonction de l'éclairement montre que le rendement augmente avec l'éclairement Cette évolution du rendement par rapport à l'éclairement colle bien avec les résultats théoriques [I].

Ainsi dans la suite nous tenterons de confronter les résultats précédents à d'autres issus d'une autre méthode qui aurait pour objectif entre autres, d'alléger les difficultés de calcul des différents paramètres ci-dessus.

# Chapitre II

---

## La méthode nodale

### II.1 Introduction

Comme précédemment annoncé, nous utiliserons la méthode nodale pour essayer d'alléger les calculs relatifs à certains systèmes thermiques d'une manière générale et particulièrement au capteur solaire plan. En effet la méthode nodale appliquée aux systèmes thermiques est celle-là, qui à l'aide d'une analogie thermique électrique, transforme un système thermique par l'intermédiaire d'une modélisation physique en un système électrique.

Ainsi, toutes les lois physiques relatives aux systèmes électriques ( Thévenin, Maxwell, Kirchhoff, etc. ) sont applicables au nouveau système obtenu, ce qui aura pour finalité de faciliter le calcul des différents paramètres d'un tel système étant entendu que des méthodes numériques très puissantes et maîtrisées existent pour l'étude des systèmes électriques.

### II.2 Principes de base

Lorsque deux phénomènes physiques sont régis par des équations identiques et que l'un d'eux est facilement accessible aux mesures, on peut avec profit utiliser ces mesures pour étudier l'autre phénomène. Ainsi les équations de LAPLACE, POISSON et FOURIER sont communes à la thermique et à l'électricité. Le réseau des équipotentielles, ( $U=\text{constante}$ ) correspond au réseau des isothermes ( $T=\text{constante}$ ). C'est pourquoi nous utiliserons l'analogie électrique des problèmes thermiques dans la suite.

En effet, cette analogie s'avère intéressante par sa facilité de mise en œuvre surtout s'agissant des problèmes bidimensionnels. Ainsi la relation donnant le flux surfacique  $\Phi$  traversant une plaque d'épaisseur  $e$ , de conductivité thermique  $\lambda$  et de températures aux faces d'entrée et de sortie respectives  $T_e$  et  $T_f$ ,

$\phi = \frac{T_r - T_c}{\frac{e}{\lambda}}$  peut être rapprochée par analogie thermique électrique à la relation donnant le

courant  $I$  traversant un conducteur de résistance  $R$  et de tension aux bornes de ce dernier  $U$ .

$$I = \frac{U}{R}$$

Dans ces conditions, le flux  $\phi$  est l'analogie thermique du courant  $I$ , la température l'analogie de la tension  $U$ , et le rapport  $\frac{e}{\lambda}$  l'analogie de la résistance  $R$ .

Nous donnerons de manière plus générale, sous forme de tableau, la correspondance des différentes grandeurs d'après l'analogie thermique électrique.

Grandeur thermique	Symbole	Grandeur électrique correspondante	Symbole
Flux surfacique	$\phi$	Courant	$I$
Température	$T$	Tension	$U$
Rapport $\frac{e}{\lambda}$	$\frac{e}{\lambda}$	Résistance	$R$
Conductivité thermique	$\lambda$	Conductivité électrique	$\frac{1}{\rho}$

**Tableau IV :** Analogie thermique électrique

### II.3 Schémas analogiques du capteur plan

La visualisation des flux thermiques dans un capteur à simple vitrage peut être illustrée par l'analogie électrique de la figure III. Ce schéma, bien qu'il soit assez complexe, suppose un certain nombre d'hypothèses en particulier celle qui consiste à supposer une température homogène pour chaque élément. La seconde hypothèse que l'on fait concerne les flux par rayonnement qui sont supposés dépendre linéairement des résistances  $R_r$ . On fait également l'hypothèse de régime permanent, ce qui implique l'absence de capacité thermique de chacun des éléments représentés.

Dans ce schéma, nous avons :

$R_{f1}$  : résistance au flux par convection entre la face extérieure du vitrage et de l'air ambiant.

$R_{r1}$  : résistance équivalente pour le flux par rayonnement entre la face extérieure du vitrage et le milieu extérieur ayant une température équivalente  $T_{re}$ .

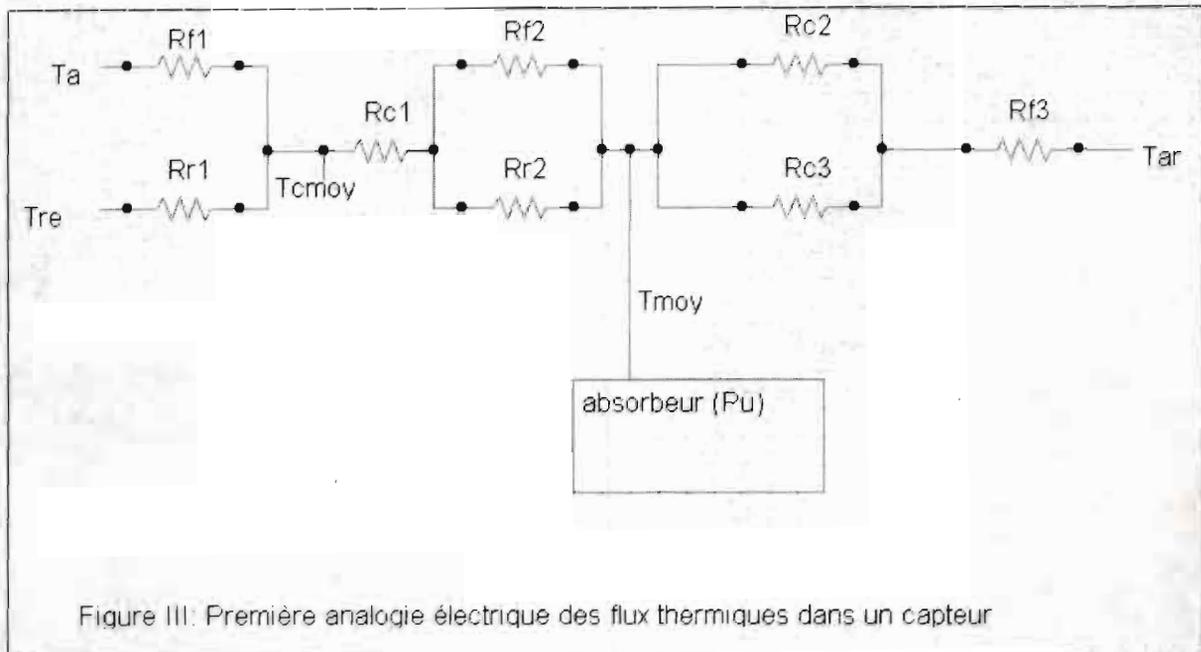
$R_{f2}$  et  $R_{r2}$  : résistances au flux par convection et rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage.

$R_{c1}$  : résistance au flux par conduction à travers le vitrage.

$R_{c2}$  et  $R_{c3}$  : résistance au flux par conduction à travers la face arrière du capteur et les faces latérales.

$R_{f3}$  : résistance au flux par convection vers l'arrière et les faces latérales.

Dans notre cas, la température  $T_{re}$  n'est rien d'autre que la température ambiante  $T_a$  car la face arrière du capteur est en contact direct avec l'atmosphère.



**Figure III** : Première analogie électrique des flux thermiques dans un capteur

L'expérience montre [II] que certaines des résistances précédentes sont négligeables en comparaison d'autres avec lesquelles elles sont en série ou parallèle.

C'est notamment le cas de  $R_{c1}$  qui est très faible en comparaison des  $R_{f1}$  et  $R_{r1}$ .

Bien que le verre ne soit pas un bon conducteur thermique, les épaisseurs sont telles que les températures des deux faces sont pratiquement identiques.

La dernière résistance que l'on négligera est  $R_{f3}$  qui est très faible [II] en comparaison de  $R_{c2}$  et  $R_{c3}$ : en effet, les capteurs sont généralement très bien isolés sur leurs faces arrières et latérales.

De ces simplifications, il ressort une seconde analogie que nous présentons à la figure IV.

Dans cette figure nous avons [II] :

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{r1}} \quad (\text{II-1}); \quad \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R_{r2}} \quad (\text{II-2})$$

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_{c2}} + \frac{1}{R_{c3}} \quad (\text{II-3})$$

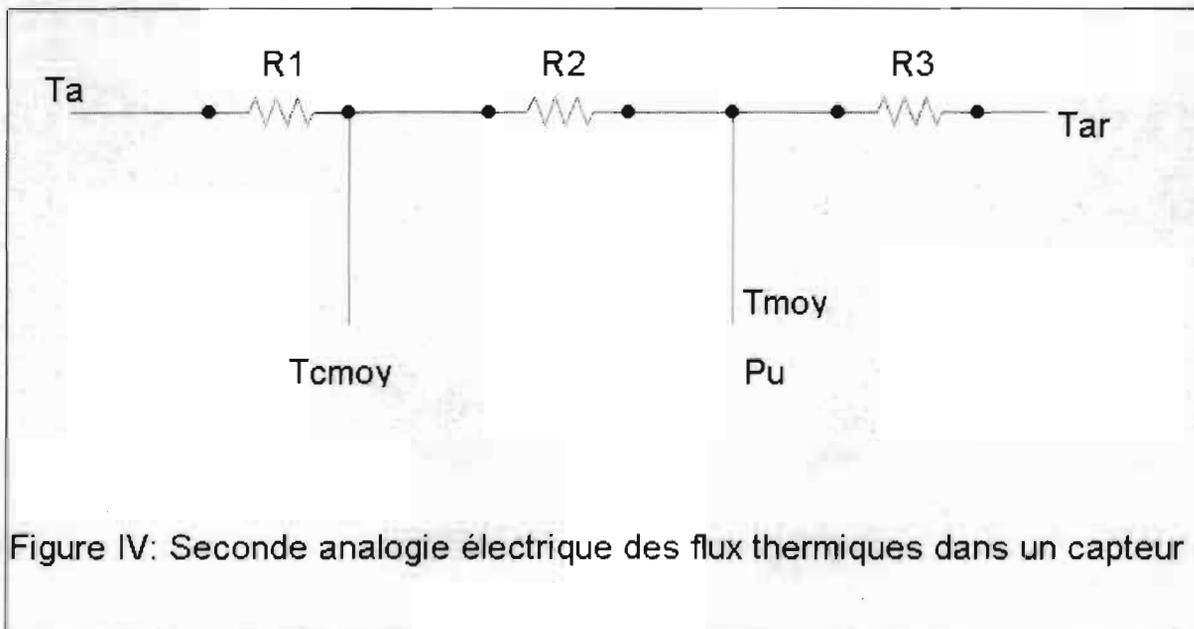


Figure IV: Seconde analogie électrique des flux thermiques dans un capteur

**Figure IV** : Deuxième analogie électrique des flux thermiques dans un capteur

Nous pouvons diviser les pertes thermiques  $P'$  en deux parties :

$$P' = P'_1 + P'_2 \quad (II-4) \text{ où :}$$

$P'_1$  : Pertes thermiques vers l'avant.

$P'_2$  : Pertes thermiques vers l'arrière.

Dès lors,  $P'_1$  traverse les résistances  $R_1$  et  $R_3$ , alors que  $P'_2$  traverse uniquement la résistance  $R_2$ . Nous aurons se faisant, par analogie à la loi d'Ohm:

$$P'_1 = \frac{T_{\text{moy}} - T_a}{R_1} \quad (II-5) \quad \text{et} \quad P'_2 = \frac{T_{\text{moy}} - T_a}{R_2} \quad (II-6)$$

$$\text{Avec : } R_{e1} = \frac{e_1}{\lambda} \quad (II-7) \quad \text{et} \quad R_{e2} = \frac{e_2}{\lambda} \quad (II-8)$$

$e_1$  et  $e_2$  étant l'épaisseur de l'isolant sur la face arrière et sur les faces latérales du capteur,  $\lambda$  étant la conductivité de l'isolant.

Nous travaillerons sans perte de généralité avec  $e_1 = e_2 = e = 20 \text{ cm}$ , et comme isolant la laine de verre et ainsi,  $\lambda = \lambda_{\text{air}} = 0,034 \text{ W/m.K}$ .

$$\text{De ce fait d'après (II-7) et (II-8) } R_{e1} = \frac{0,2}{0,034} = 5,8823$$

$$R_{e2} = 5,8823 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$R_{e1} = \frac{0,2}{0,034} = 5,8823$$

$$R_{e2} = 5,8823 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$\text{Et ainsi d'après (II-3) : } R_1 = \frac{5,8823 \times 5,8823}{5,8823 + 5,8823} = 2,9411$$

$$R_3 = 2,9411 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$\text{La résistance } R_1 \text{ est donnée par [II] : } R_1 = \frac{1}{h_{c1} + h_{r1}} \quad (II-8)$$

$$\text{Avec : } h_{r1} = \varepsilon_c \times \sigma (T_{\text{moy}} + T_a) (T_{\text{moy}} + T_a) \quad (II-9)$$

$$h_{c1} = 5.7 + 3.8V \quad (II-10)$$

V étant la vitesse du vent,  $h_r$  et  $h_c$  le coefficient d'échange par rayonnement et convection respectivement du vitrage.

Nous travaillerons pour une vitesse moyenne du vent  $V = 2$  m/s. Dans ces conditions,

$$h_{c1} = 5.7 + 3.8 \times 2 = 13.3$$

$$h_{c1} = 13.3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{r1} = 0.88 \times 5.67 \cdot 10^{-8} (306.238 + 299) (306.238^2 + 299^2) = 5.5319$$

$$h_{r1} = 5.5319 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ainsi, d'après (II-8).

$$R_1 = \frac{1}{13.3 + 5.5319} = 0.0531 \quad R_1 = 0.0531 \text{ m}^2\text{K/W}$$

la résistance  $R_2$  est donnée par :

$$R_2 = \frac{1}{h_{c2} + h_{r2}} \quad (II-11), \text{ avec :}$$

$$h_{r2} = \frac{\sigma (T_{\text{ext}} + T_{\text{int}}) (T_{\text{ext}}^2 + T_{\text{int}}^2)}{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (II-12)$$

$h_{c2}$  est toujours donné [VI] selon Ferries par :

$$h_{c2} = 2.1 |32.75 - \theta_{\text{ext}}|^{0.33} \quad (II-13)$$

ainsi donc :

$$h_{r2} = \frac{5.67 \cdot 10^{-8} \times (306.238 + 323) (306.238^2 + 323^2)}{0.88 + 0.88 - 1} = 5.5535$$

$$h_{r2} = 5.5535 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{c2} = 2,1 |32,75|^{0,33} = 5,3747$$

$$h_{c2} = 5,3747 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Donc, d'après (II-11),  $R_s = \frac{1}{5,3747 + 5,5535} = 0,0915$

$$R_2 = 0,0915 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Dans les conditions ci-dessus, nous obtenons le schéma électrique équivalent définitif du capteur plan suivant :

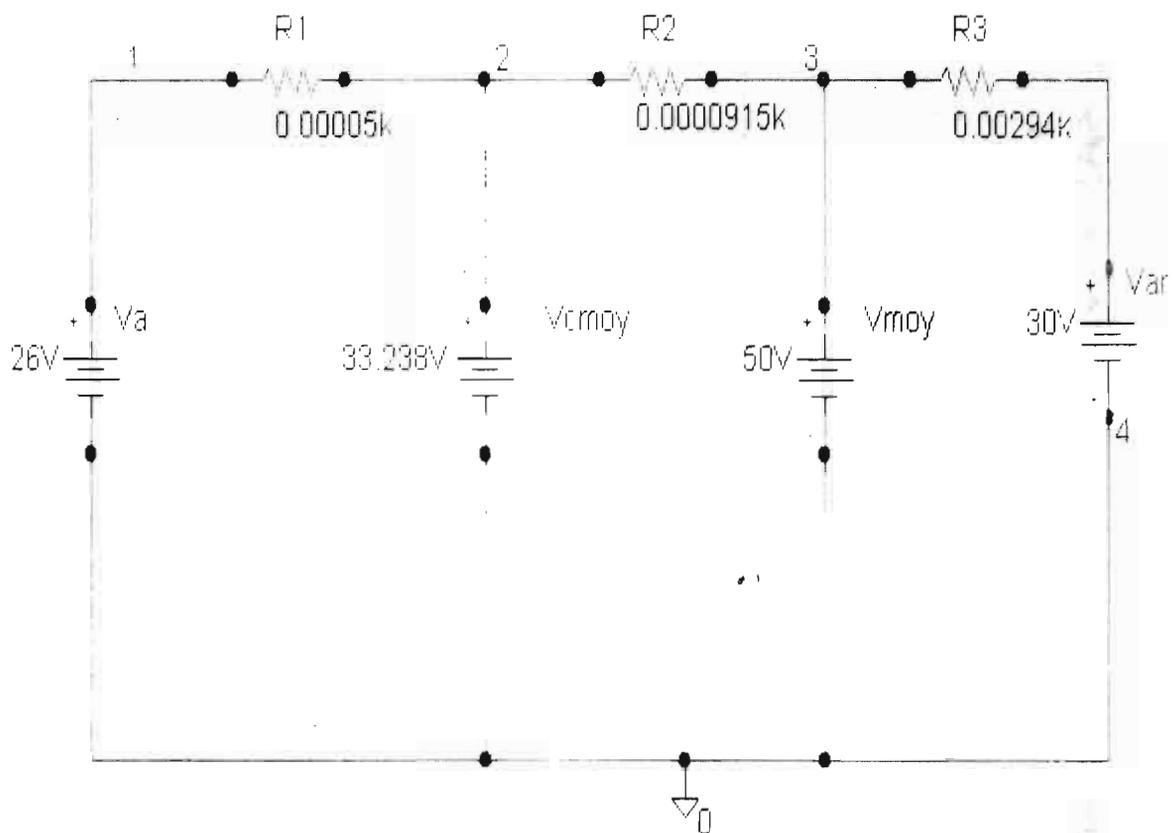


Figure V : Schéma électrique équivalent du capteur

Dans la figure V nous avons :

**Nœud 0** : masse :référence des températures

**Nœud 1** : air ambiant

**Nœud 2** : vitrage

**Nœud 3** : absorbeur

**Nœud 4** : face arrière du vitrage

---

## II.4 Conclusion

Cette partie nous a permis d'aboutir, par l'intermédiaire d'une analogie thermique électrique à un schéma électrique équivalent du capteur plan.

Ce schéma nous permettra avec l'appui du logiciel PSPICE de faire une simulation du bilan thermique du capteur suivant différentes valeurs des grandeurs caractéristiques de ce dernier.

Les valeurs issues de cette simulation seront comparées aux valeurs provenant de l'étude classique du capteur, ce qui nous permettra de tirer une conclusion quant à l'usage de cette méthode pour l'étude du capteur.

# Chapitre III

---

## Le logiciel PSPICE de simulation

### III.1 Introduction

**PSPICE** est un logiciel de simulation électronique. La simulation rend en effet d'énormes services aux électroniciens pendant la phase de conception des circuits. Elle permet de limiter les essais réels. Ce procédé fait donc gagner du temps et de la souplesse puisque, dans l'idéal, on n'a plus besoin de câbler un circuit pour vérifier son fonctionnement.

Cependant la simulation n'évitera en aucun cas l'essai réel, seule étape permettant de valider rigoureusement un circuit. L'appel au noyau **PSPICE** est complètement transparent pour l'utilisateur : il suffit d'entrer le circuit sous forme graphique puis de lancer la simulation. Pendant la simulation, **PSPICE** utilisera les modèles des composants qu'il doit simuler. Ces modèles sont décrits sous formes de fichiers écrits en langage SPICE.

### III.2 Domaine d'utilisation

MicroSim **PSPICE** est un logiciel de simulation électronique mixte (analogique et numérique) qui permet d'évaluer de manière très précise les performances d'un circuit électronique.

Devenu un véritable standard industriel pour des milliers de concepteurs électroniques.

**PSPICE** est l'un des logiciels de conception pour Windows, qui garantit une simulation analogique/digitale/mixte fiable et totalement intégrée.

Pour concevoir des projets à la fois analogiques et digitaux, l'utilisation d'un simulateur mixte analogique/digital est indispensable.

Ainsi, grâce à une intégration parfaite des simulations analogique et digitale au sein du même programme, avec fusion des netlistes, des fichiers de simulation et des fichiers de résultat, PSPICE répond au besoin précité.

Intuitif et très souple d'emploi, **PSPICE** répond aux attentes des ingénieurs; la phase de simulation s'enchaîne en toute simplicité, et il est possible de se consacrer entièrement à la conception de son projet.

Précis, performant, rapide, intuitif : voilà les caractéristiques de **PSPICE**.

Pour cette raison, **PSPICE** est reconnu par plus de 20 000 utilisateurs [VII].

Bien plus qu'un simple simulateur, PSPICE est parfaitement intégré dans la gamme de solutions Orcad-Cadence que voici:

### **Capture**

La saisie de schémas la plus vendue dans le monde. Facile, rapide et universelle.

### **Capture CIS**

C'est un environnement de conception intégrant la saisie de schémas Capture et le système de gestion des données et composants CIS.

### **Gamme Layout : *Layout EE - Layout Std - Layout Plus***

C'est une gamme complète de placement/routage PCB pour concevoir tous les circuits imprimés, jusqu'au placement et routage automatique hors grille.

### **Package Allegro PCB Design Studio**

C'est un package particulièrement attractif pour concevoir vos circuits imprimés :  
Capture CIS + Allegro PCB + Spectra 6 couches.

### **PSPICE Advanced Analysis**

Il permet l'optimisation et la conception virtuelle des projets électroniques.

PSPICE intervient dans plusieurs domaines tels :

#### **III.2.a Analyses analogiques classiques et avancées**

**PSPICE** permet d'effectuer les analyses de base comme les analyses de bruit, les analyses DC (Direct Current), AC (alternating current) et les analyses temporelles afin d'étudier le comportement du projet.

Les analyses avancées (paramétrique, Monte Carlo, « worst-case ») permettent d'identifier l'évolution du comportement de votre circuit en fonction des composants.

#### **III.2.b Analyses digitales avancées**

**PSPICE** propose un éventail de sept états et de soixante quatre niveaux, des temps de propagation dépendant de la charge et le repérage des timings à respecter.

Il est le premier simulateur offrant une simulation digitale «worst- -case » avec prise en compte des temps de propagation minimum et maximum.

Le simulateur identifie les violations sur les temps de setup et de hold, ainsi que les erreurs détectées sur le temps de propagation.

---

### III.2.c Analyse graphique des résultats

**PSpICE** intègre un oscilloscope rapide et puissant, le plus utilisé en CAO (Conception Assistée par Ordinateur) électronique.

Vous pouvez analyser les résultats à partir d'histogrammes affichés simultanément sur des fenêtres multiples.

#### ❖ **Fonction Cross-Probing**

Vous pouvez spécifier les signaux par leur nom ou en pointant sur un nœud du schéma.

Ces marqueurs de cross-probing sont placés une fois pour toutes sur le schéma.

A chaque nouvelle itération, les signaux ainsi spécifiés sont systématiquement affichés après chaque simulation.

#### ❖ **Courbes de résultats**

Vous pouvez tracer les parties réelles et imaginaires des courants et des tensions du circuit, y compris les diagrammes de Bode et les dérivées des signaux.

Les analyses paramétriques, Monte Carlo et « worst-case » vous permettent de modifier la valeur de chaque composant sur une série de simulations, et de visualiser rapidement les résultats des groupes de courbes.

L'analyse paramétrique vous permet également de tracer les caractéristiques des résultats, telles que le temps de montée en fonction d'un paramètre, température ou tension d'alimentation.

---

L'analyse Monte Carlo propose des histogrammes indiquant la répartition des caractéristiques comme le dépassement.

L'examen graphique des courbes permet une analyse plus avancée des résultats, en particulier le calcul du niveau de dépassement en fonction des valeurs des composants.

#### **III.2.d Analyse des sensibilités (Sensitivity)**

L'analyse de sensibilité permet d'identifier les composants critiques dans un circuit; ceux-ci pourront être spécifiés avec des tolérances plus fines.

L'analyse "*Sensitivity*" est effectuée sur les paramètres du circuit sur lesquels une tolérance est définie. Les fonctions d'évaluation ou mesures effectuées sous PSPICE, et importées dans l'outil, sont alors prises en considération pendant l'analyse.

Lors de l'analyse, Advanced Analysis effectue plusieurs simulations afin de calculer la sensibilité de chaque paramètre par rapport aux mesures spécifiées.

En final, des simulations sont effectuées pour déterminer les "worst-cases" sur chaque mesure.

#### **III.2.e Analyse Monte-Carlo**

L'analyse Monte-Carlo permet de prédire les performances statistiques du design suivant les tolérances des composants.

Avant le lancement en production, vous pouvez estimer le rendement en plaçant les spécifications minimales et maximales souhaitées sur le design.

---

L'analyse avancée Monte-Carlo dans **PSPICE Advanced Analysis** s'appuie sur les mesures PSPICE.

Lors des simulations (ou "RUNS"), PSPICE Advanced Analysis affecte aléatoirement des valeurs aux composants suivant une distribution probabiliste et les tolérances définies. Après chaque simulation, les mesures obtenues sont évaluées, et les résultats sont stockés pour une analyse statistique.

Pour chaque mesure, un histogramme de densité de probabilité et une fonction de distribution cumulée sont disponibles. Sur ces graphes, l'utilisateur peut spécifier les limites minimales et maximales.

L'analyse réalise également des calculs statistiques pour chaque mesure : valeur médiane, valeur moyenne, écart type à trois Sigma, à six Sigma. Ces calculs tiennent compte des limites minimales et maximales spécifiées.

Un tableau permet de connaître la valeur des mesures pour chaque "RUN". Les valeurs affectées aux composants sont éditées dans un fichier rapport.

### **III.2.f Optimizer**

La nouvelle version Optimizer dans le module PSPICE Advanced Analysis propose des améliorations majeures: il autorise un nombre illimité de paramètres et de spécifications; les spécifications sont issues des mesures, et peuvent être importées de PSPICE; il n'est pas nécessaire de définir les paramètres dans l'éditeur de schémas : les paramètres sont sélectionnés dans une liste dans Optimizer, ou transmis depuis la fenêtre d'analyse de sensibilité (Sensitivity); les paramètres peuvent être renvoyés (cross-probing) à l'éditeur de schémas.

Optimizer propose quatre moteurs de recherche pour optimiser le projet :

---

**LSQ** : utilise les moindres carrés,

**LSQ avancée** : les objectifs et les contraintes "pilotent" l'optimisation, quelques itérations suffisent,

**Random** : des valeurs aléatoires sont appliquées aux paramètres,

**Discrete** : les valeurs sont issues de tables, par exemple résistance à 5%.

A chaque étape, un graphe d'erreur affiche la contribution des spécifications à l'erreur globale suivant son coefficient (poids) et son écart par rapport à l'objectif.

### III.2.g Analyse de stress (Smoke Time Domain)

L'analyse de stress fournit des informations sur le stress des composants lors d'une simulation temporelle. Elle permet d'identifier les composants qui dépassent leurs limites (Puissance dissipée, température, courant et tension maximale, tension de claquage, etc.).

Les limites maximales des composants peuvent être enregistrées avec les bibliothèques de modèles, ou spécifiées sur le schéma.

Plusieurs types de limites peuvent être utilisés : *maximum forward current for diodes*, VCE maximal pour les transistors bipolaires, dissipation de puissance maximale, ou encore la température de fonctionnement.

### ❖ Efficacité et performances

Neuf ans d'expérience dans la conception de programmes de simulation mixtes permettent à Orcad de vous offrir aujourd'hui une vitesse et des performances inégalées.

Le simulateur **PSPICE** reconnaît automatiquement les interconnexions entre les composants analogiques et les composants digitaux dans votre circuit et y insère des sous-circuits d'interface.

L'intégration des algorithmes analogiques et digitaux vous permet de visualiser les résultats de vos simulations analogiques, digitales et mixtes sur un seul histogramme.

### III.3 Le langage PSPICE

**PSPICE** est architecturé autour d'un algorithme complexe, dont la version la plus utilisée a été développée par l'Université de Berkeley.

Pendant la simulation, **PSPICE** utilise des modèles de composants décrits sous formes de fichiers écrits en langage PSPICE.

#### III.3.a Syntaxe

##### ❖ Généralités

Le langage PSPICE est une suite de lignes de code SPICE, chacune de ces lignes place ou définit un composant.

Pour fixer la valeur d'une primitive ou d'un paramètre, on peut utiliser indifféremment la notation réelle (*exemple* : -2.54, .5, 1743,...), exponentielle (*exemple* : 25E-06, 17.3e+02,...) ou enfin la notation symbolique : on écrit le coefficient multiplicateur à la suite du nombre (*exemple* : 25.3P, 72.4MEG, .54M). Les coefficients disponibles dans SPICE sont :

**F** : femto, **P** : pico, **N** : nano, **U** : micro, **M** : milli, **K** : kilo, **MEG** : méga, **G** : giga, **T** : téra.

Le nœud **0** est réservé par PSPICE : c'est la **masse**. Il peut cependant être utilisé pour relier des composants à la masse du circuit.

#### ❖ Placer des primitives simples, dites de bas niveau

Constitution d'une ligne de **code SPICE** plaçant une primitive simple (non paramétrable) :

```

L0, 1, 4, 1.50E-04
primitive connexions valeur
  
```

La ligne de cet exemple permet de brancher une **self** nommée **L0** entre les nœuds **1** et **4**. cette self a pour valeur **150 µH**.

#### ❖ Placer des primitives paramétrables, dites de haut niveau.

Description d'une ligne de **code SPICE** plaçant une primitive paramétrable :

```

Q8, 4, 8, 12, QP, 10
primitive connexions modele condition
           utilisation initiale
  
```

Le nom du modèle utilisé pour simuler la primitive doit être défini grâce à une commande **MODEL** située dans le fichier. Ici, on placera un **transistor** nommé **Q8** entre les nœuds **4**, **8** et **12**. Ce transistor sera un modèle **QP** (défini ailleurs grâce à une ligne **MODEL**) qui aura pour valeur initiale **10**.

---

**Cas particulier** : les primitives R (résistance) et D (diode) peuvent être définies sans nom du modèle, dans ce cas PSPICE utilisera le modèle par défaut (presque idéal).

*ex* : D4 3 4 ou R6 10 11 4,7K.

### III.3.b Primitives

#### ❖ Avant propos

Une primitive est l'élément de base qui sert à la construction des circuits et des modèles électriques. Quand SPICE simule un circuit, il étudie l'assemblage de ces primitives. Cette information lui est fournie par la netlist. Il existe deux types de primitives :

**-les primitives simples** : ce sont les plus basiques, on peut simplement leur affecter une valeur. Il est impossible de redéfinir les paramètres internes. *Par exemple* : *self*, *condensateur*, *générateurs purs ou commandés*,...

**-les primitives paramétrables** : on peut redéfinir leurs paramètres grâce à la commande.MODEL. *Par exemple* : *résistance*, *transistor*, *diode*, *MOS*,...

Nous présenterons dans le tableau suivant quelques primitives PSPICE usuelles.

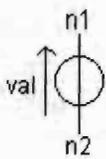
Primitive	Description
Vn	source de tension pure
In	source de courant pur
En	source de tension contrôlée par une tension
Fn	source de courant contrôlée par un courant
Gn	source de tension contrôlée par un courant
Hn	source de courant contrôlée par une tension
Bn	source universelle
Rn	résistance
Ln	inductance - self parfaite
Cn	condensateur parfait
Dn	diode
Qn	transistor bipolaire (2 types : NPN et PNP)
Jn	transistor à effet de champ (2 types : N et P)
Mn	MOSFET (types N et P + 7 niveaux de modèles)
Sn	interrupteur commandé par une tension
Xn	Utilisation d'un macro-circuit utilisateur .SUBCKT
Kn	mutuelle inductance
Tn	ligne de transmission parfaite

**Tableau V** : Résumé des primitives PSPICE usuelles

**Source de tension V** : Vn n1 n2 type val

*n1* est le + de la tension de sortie.

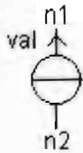
*n2* est le - de la tension de sortie.



*Type* fixe la source en continu (type=DC) ou en sinusoïdal (type=AC).

*val* représente la tension, exprimée en Volts.

**Source de courant I :** In n1 n2 type val



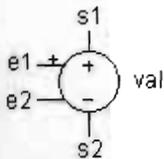
*n1* est le + du courant de sortie.

*n2* est le - du courant de sortie.

*type* fixe la source en continu (*type=DC*) ou en sinusoïdal (*type=AC*).

*val* représente le courant, exprimé Ampères.

**Source de tension commandée en tension :** En s1 s2 e1 e2 val



*s1* est le + de la tension de sortie.

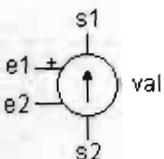
*s2* est le - de la tension de sortie.

*e1* est le + de la tension d'entrée.

*e2* est le - de la tension de l'entrée.

*val* représente le coefficient de multiplication de la tension d'entrée (en V/V).

**Source de courant commandée en tension :** Gn s1 s2 e1 e2 val



*s1* est le + du courant de sortie.

*s2* est le - du courant de sortie.

*e1* est le + de la tension d'entrée.

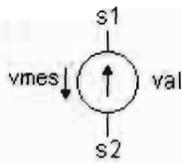
*e2* est le - de la tension de l'entrée.

*val* représente le coefficient de multiplication de la tension d'entrée (en A/V).

**Source de courant commandée en courant :** Hn s1 s2 vmes val

s1 est le + du courant de sortie.

s2 est le - du courant de sortie.



vmes est le nom de la sonde de courant.

val représente le coefficient de multiplication du courant d'entrée (en A/A).

**Résistance :** Rn n1 n2 val (modele)

n1 et n2 sont les pattes de la résistance.

val est la valeur de la résistance (en Ohms).



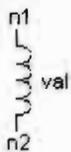
modele donne le nom du modèle à utiliser pour la simulation, si on a redéfini une résistance avec.MODEL. A défaut la résistance est idéale.

**Inductance parfaite :** Ln n1 n2 val (i0)

n1 et n2 sont les pattes de la self.

val est la valeur de la self (en Henry).

i0 est le courant initial dans la self en A, facultatif.



### III.4 Application au capteur plan

Le schéma électrique équivalent de la figure V nous permet de faire une simulation avec le logiciel PSPICE.

Cette simulation nous permettra d'avoir les tensions et courants dans les différentes portions du circuit. Puisque la tension électrique est l'analogie de la température et le courant électrique l'analogie du flux surfacique, grâce à notre modélisation, nous pourrions en déduire les différentes pertes thermiques au niveau du capteur et par la suite, les différents paramètres relatifs au capteur.

La simulation en tension donne le résultat suivant

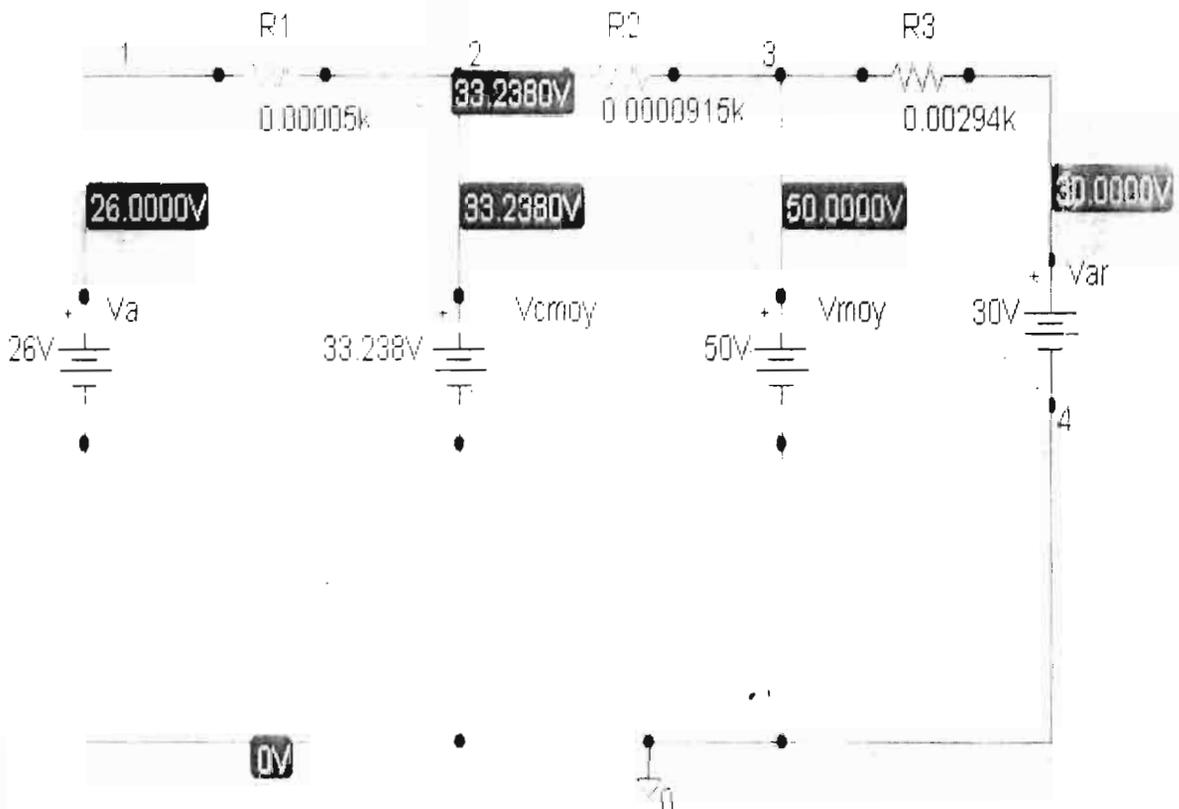
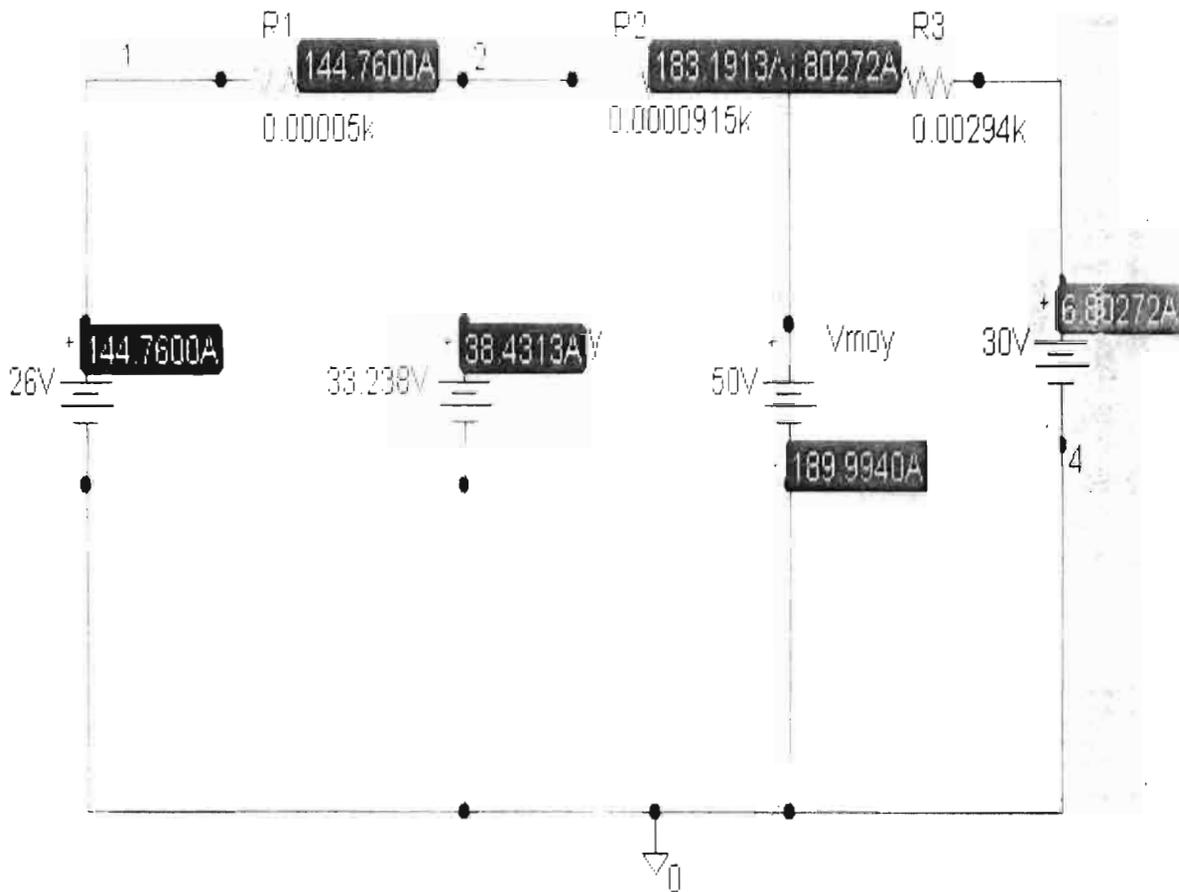


Figure VI : Résultats de la simulation en tension

Quant à la simulation en courant, elle donne le résultat suivant :



**Figure VII :** Résultats de la simulation en courant

En plus de ces résultats, un rapport beaucoup plus exhaustif généré par la simulation sera illustré en annexe.

De la figure VII et conformément aux relations (II-4), (II-5), (II-6) et à la figure IV, nous tirons directement les pertes thermiques totales  $P^*$ , somme des courants traversant les résistances  $R_1$ ,  $R_2$  d'une part et  $R_3$  d'autre part et la puissance utile  $P_u$ , différence des courants traversant les résistances  $R_2$  et  $R_1$ .

Dès lors,  $P^*=144.7600+6.80272=151,56272$

$$P^*=151,56272 \text{ W/m}^2$$

$$P_u=183,1913-144,7600=38,43913$$

$$P_u=38,43913 \text{ W/m}^2$$

De la connaissance de ces deux puissances, il découle la puissance absorbée  $P_a$ , somme de la puissance utile  $P_u$  et des pertes thermiques  $P^*$ ,  $P_a=151,56272+38,43913=189,99402$ .

$$P_a=189,99402 \text{ W/m}^2$$

Ainsi, le débit massique par unité de surface du capteur devient d'après (I-3),

$$q=\frac{38,43913}{4180(60-20)}=0,00023 \quad q=0,00023 \text{ kg/s.m}^2$$

Le rendement interne instantané vaut d'après (I-10) :  $\eta_i=\frac{38,43913}{189,99402}=0,2023$

$$\eta_i=0,2023$$

Quant au rendement global, il est donné d'après (I-7) par :

$$\eta=\frac{38,43913}{245}=0,1568 \quad \eta=0,1568$$

La section de passage  $S_1$  est donnée d'après (1-24) par, avec  $v_c$  la vitesse d'écoulement du fluide. Dans ces conditions :

$$S_1 = \frac{0,00023}{0,5} = 0,00046 \quad \boxed{S_1 = 0,00046 \text{ m}^2 = 4,6 \text{ cm}^2}$$

Le diamètre du tube de circulation est alors donné d'après (1-25) par :

$$D = 2\sqrt{\frac{S_1}{\pi}} \quad ; \quad D = 2\sqrt{\frac{0,00046}{\pi}} = 0,0242$$

$$\boxed{D = 0,0242 \text{ m} = 24,2 \text{ mm}}$$

Le nombre de Reynolds est donné par :

$$R_e = \frac{\rho_v \times v_c \times D}{\mu} \quad \text{avec :}$$

$\rho_v$  la masse volumique et  $\mu$  la viscosité dynamique de du fluide caloporteur :

$$\rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3, \quad \mu = 0,65 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s.}$$

$$\text{Ainsi donc : } R_e = \frac{1000 \times 0,5 \times 0,0242}{0,65 \times 10^{-3}} = 18615,385$$

$$\boxed{R_e = 18615,385}$$

Le régime d'écoulement est donc franchement turbulent car  $R_e$  est supérieur à 9000

### III.5 Comparaison des résultats issus des deux méthodes

Nous comparerons dans cette partie les grandeurs issues des deux méthodes que voici : la puissance absorbée  $P_a$ , la puissance utile  $P_u$ , les pertes thermiques  $P'$ , le débit massique  $q$ , le rendement interne instantané  $\eta_i$ , le rendement global  $\eta$ , la section de passage  $S_f$ , le diamètre du tube de circulation et le nombre de Reynolds

Nous aborderons cette comparaison par un tableau dans lequel figureront les valeurs des différentes grandeurs issues des deux méthodes, les erreurs absolues et relatives commises en privilégiant une méthode par rapport à une autre.

Nous prendrons sans perte de généralité comme références la méthode classique.

Dès lors, l'erreur absolue sur la grandeur  $i$  sera donnée en valeur absolue par :

$$E_a = i(\text{méthode nodale}) - i(\text{méthode classique})$$

Et l'erreur relative par :

$$E_r = \frac{E_a}{i(\text{méthode classique})}$$

Ainsi nous obtenons le tableau suivant :

Puis sance absorbée Pa (W/m <sup>2</sup> )	Puis sance utile Pu (W/m <sup>2</sup> )	Pertes ther miques P'(W/m <sup>2</sup> )	Débit mas sique q (kg s.m <sup>-3</sup> )	Rende ment interne instan tane. ( $\eta_i$ )	Rende ment global ( $\eta$ )	Section de pas sage S <sub>d</sub> (cm <sup>2</sup> )	Dia Mètre de tube D(cm)	Nom Bre de Rey Nolds Re	Mé tho de
189.994	38.4391	151.5627	0.00023	0.2023	0.1568	4.6	2.242	18615	No dale
187.425	37.8882	149.5368	0.00023	0.2022	0.1546	4,6	2,242	18615	clas si que
									Err eur
2.569	0.5509	2.0259	0	0.0001	0.0022	0	0	0	Abs so lue E <sub>a</sub>
0.013	0.014	0.013	0	0.0004	0.014	0	0	0	Re la tive E <sub>r</sub>

**Tableau VI** : Résultats de la comparaison des valeurs issues des deux méthodes.

De la lecture du tableau VI, nous tirons que l'écart en pourcentage entre les valeurs issues des deux méthodes pour une seule grandeur est maximal au niveau de la puissance utile par unité de surface  $P_u$  et du rendement global et vaut 1.4%.

L'écart minimal est observé au niveau du débit massique par unité de surface, de la section de passage, du diamètre du tube de passage et du nombre de Reynolds et vaut 0 %.

De ce tableau, il ressort également que la méthode nodale surestime toutes les grandeurs thermiques du tableau VI comparée à la méthode classique.

De tous les écarts du tableau VI, les plus représentatifs pour cette étude seront l'écart sur le débit massique par unité de surface et celui sur les dimensions du capteur telles que la section de passage et le diamètre des tubes.

En effet, les erreurs sur les puissances absorbée et utile mais aussi sur les pertes induisent les déperditions thermiques au sein des différentes surfaces constituant le capteur.

Ces déperditions peuvent effectivement varier suivant la modélisation qu'on s'en fixe pour l'étude d'un tel système.

Par contre, les dimensions et le débit étant des caractéristiques essentielles recherchées pour le capteur, leur variation sera d'une grande importance pour cette étude.

C'est la raison pour laquelle, les écarts sur le débit massique par unité de surface et les dimensions précitées seront déterminants pour ce présent commentaire.

### III.6 Conclusion

Au terme de l'analyse précédente, nous pouvons tirer que les résultats issus de la méthode nodale reflètent globalement ceux de la méthode classique à 1.4 % près si nous nous basons sur l'erreur issue du rendement global ou de la puissance utile par unité de surface.

Cela correspond à une fiabilité de 98.6%.

Si nous nous basons sur l'erreur issue de la puissance absorbée par unité de surface ou sur les pertes thermiques, la fiabilité de la méthode nodale par rapport à la méthode classique est de 98,7 %.

Pour ce qui est des autres grandeurs telles que le débit massique par unité de surface, la section de passage, le diamètre de tube et le nombre de Reynolds l'erreur est nulle conduisant à une fiabilité de 100%.

### Conclusion générale

Ce présent projet nous a permis de passer en revue d'une part toutes les grandes lignes ayant trait au capteur solaire plan et d'autre part à la technique de modélisation et de simulation.

A travers cette étude, nous avons pu découvrir que la méthode nodale reflète quasi totalement la méthode classique avec une fiabilité variant de 98,6% à 100%.

Cette différence entre les deux méthodes peut être due d'une part aux approximations faites pour la détermination de certaines résistances et d'autre part à l'hypothèse de la température homogène émise dans le chapitre II.

De cette étude également il ressort une parfaite validation de l'usage du logiciel MICROSIM PSPICE, logiciel de simulation électronique, pour l'étude des systèmes thermiques, moyennant une simple analogie thermique électrique.

Nous tenons également à signaler que cette étude faite en utilisant le capteur solaire plan comme modèle thermique de base permet d'appliquer la même méthode surtout à l'énergétique du bâtiment, aux calculs des charges en climatisation et aux calculs des déperditions thermiques au niveau des chambres de combustion des chaudières industrielles.

Néanmoins nous regrettons le fait de ne pas pouvoir effectuer parallèlement à cette étude des essais qui auraient dû permettre non seulement de mesurer par la même occasion le gap entre les résultats théoriques et ceux pratiques mais aussi d'avoir une idée nette des performances réelles d'un capteur installé dans la zone à n'importe quelle période de l'année.

## Références bibliographiques

[I] : JACQUES DESAUTEL « les capteurs héliothermiques. 1979: EDISUD, la Galade-13100 Aix-en-Provence, Pyc-EDITION, 254, rue de Vaugirard »

[II] : A.A.SFEIR ET G.GUARRACINO « Ingénierie des systèmes solaires : Application à l'habitat », Technique et Documentation, 8 Rue royale, 14401 Bayeux, France (1981).

[III] : Météorologie sénégalaise « Station de Thiès ».

[IV] : Bulletin technique N°3 « Energie Solaire, J.Lamadien, chef service technique, Verchage, ingénieur ECP, Mai 1978 » de l'IEER de Ouagadougou.

[V] : Jean-François Sacadura « Initiation aux Transferts Thermiques », 1<sup>ère</sup> édition tirage 1993. Technique et Documentation 11, rue Lavoisier 75008 PARIS.

[VI] : Cours de Transmission de la chaleur de SALIF GAYE « DICIE, ESP de Thiès, 2001 ».

[VII] : Internet « <http://www.alsdesign.com> »

[VIII] : « Construire avec le climat », Ministère du de l'environnement et du cadre de vie Paris ( 1979).

[IX] : F.Trombe « Brevet CNRS. (1979), Trombe et Michel, Brevets ANVAR (1974) et (1979) ».

[X] : PSPICE « Guide d'évaluation » ALSDESIGN, 160, rue de Paris 92645 BOULOGNE CEDEX.

[XI] : Cours d'Energie renouvelable de PAPE MODY NDIAYE « DICIE, ESP de Thiès, 2001 ».

[XII] : R. Bernard, G. Mendy et M. Schwartz, « Le rayonnement solaire, Conversion thermique et applications », Techniques et Documentation, 11, rue Lavoisier, Paris (1980).

[XIII] : Internet « <http://www.microsim.com> »

# Annexes

Annexe I

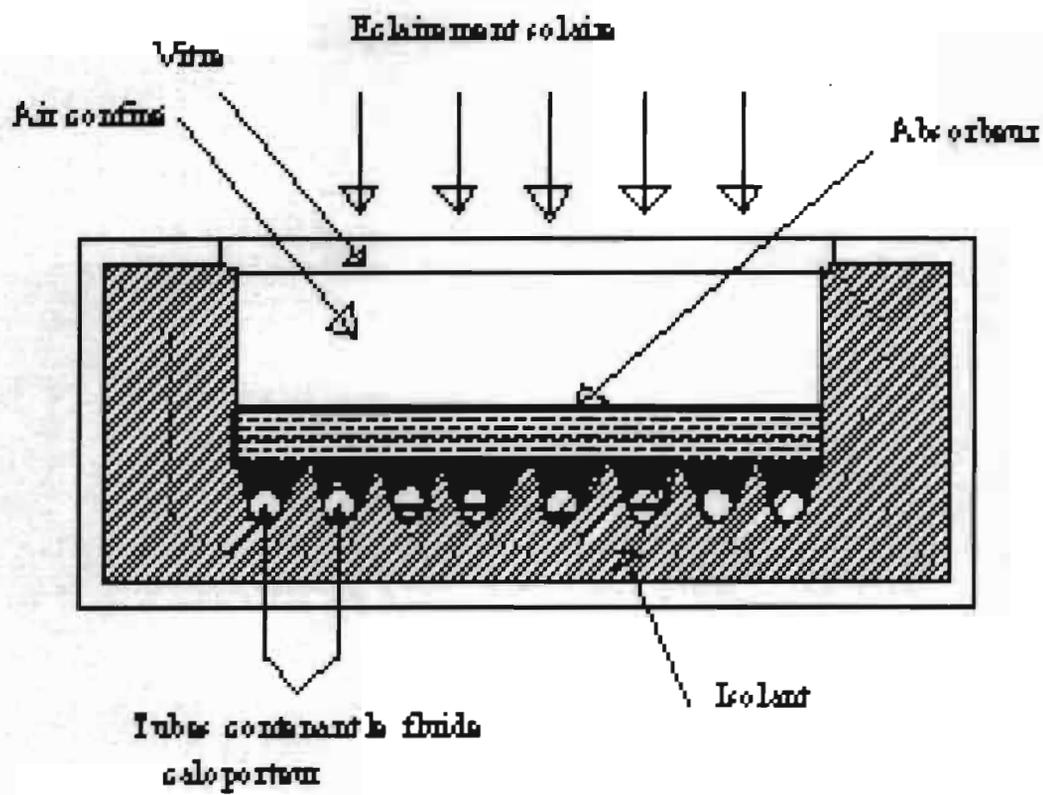


Figure VIII : Vue en coupe d'un capteur solaire plan

Annexe II

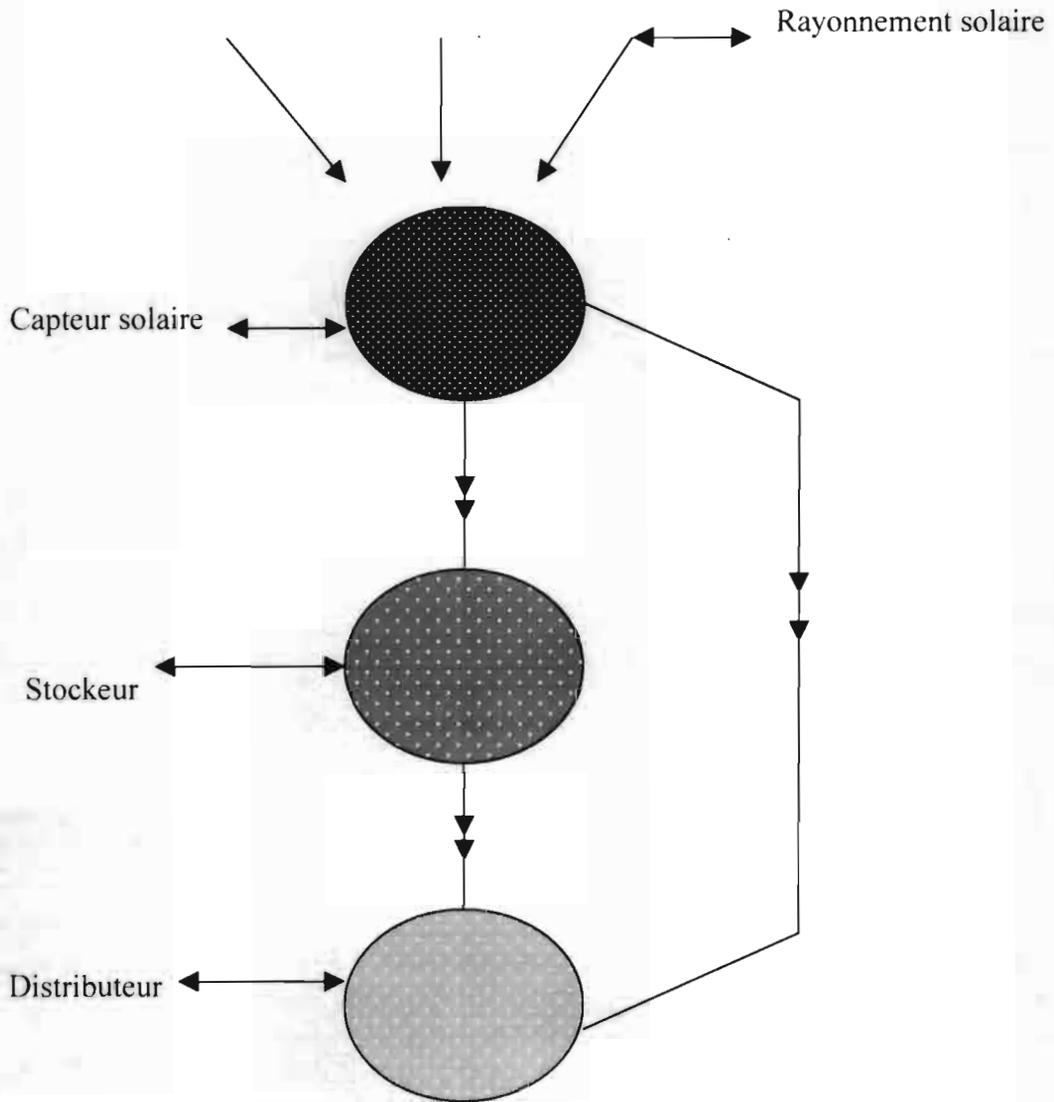


Figure IX : Schéma d'un système solaire

Annexe III

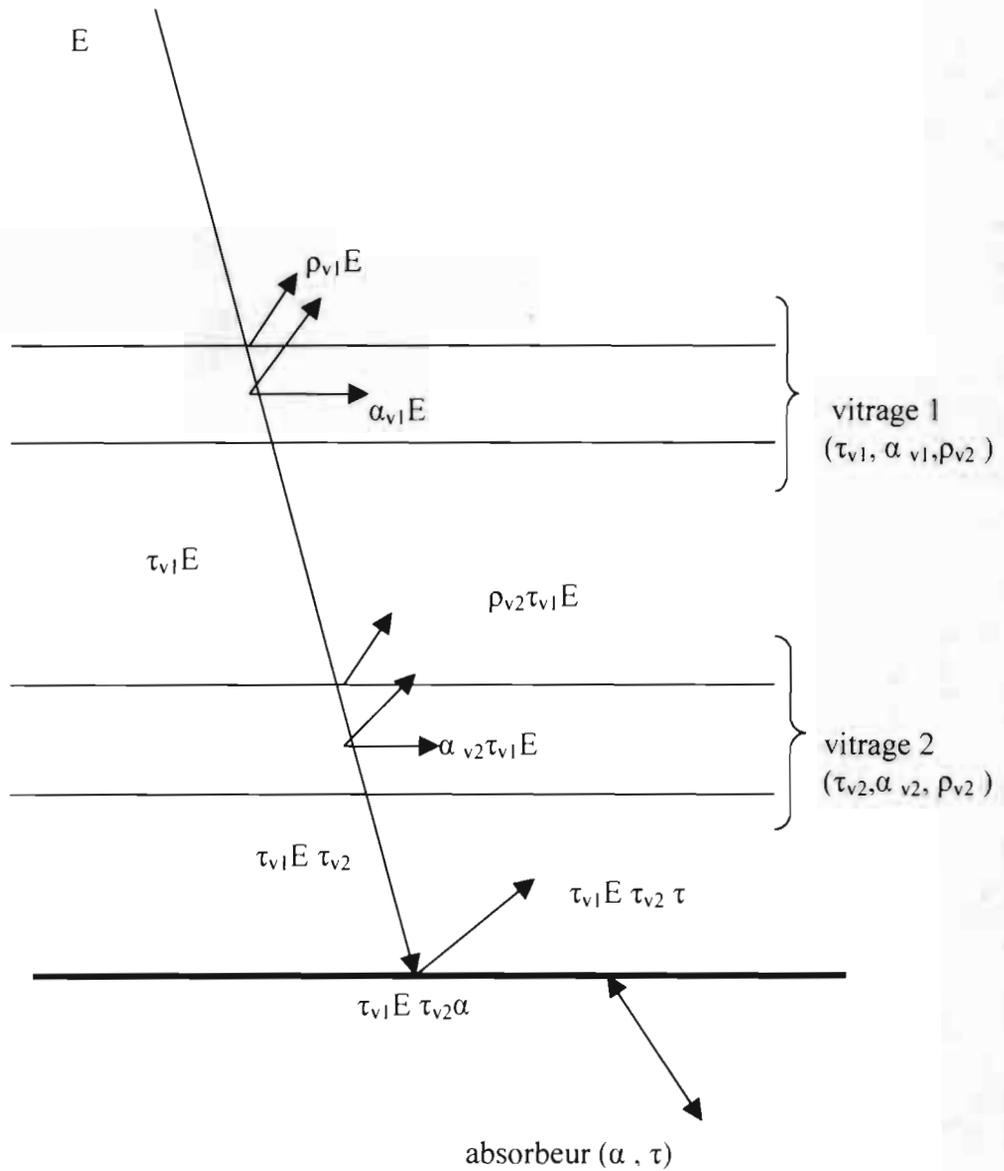
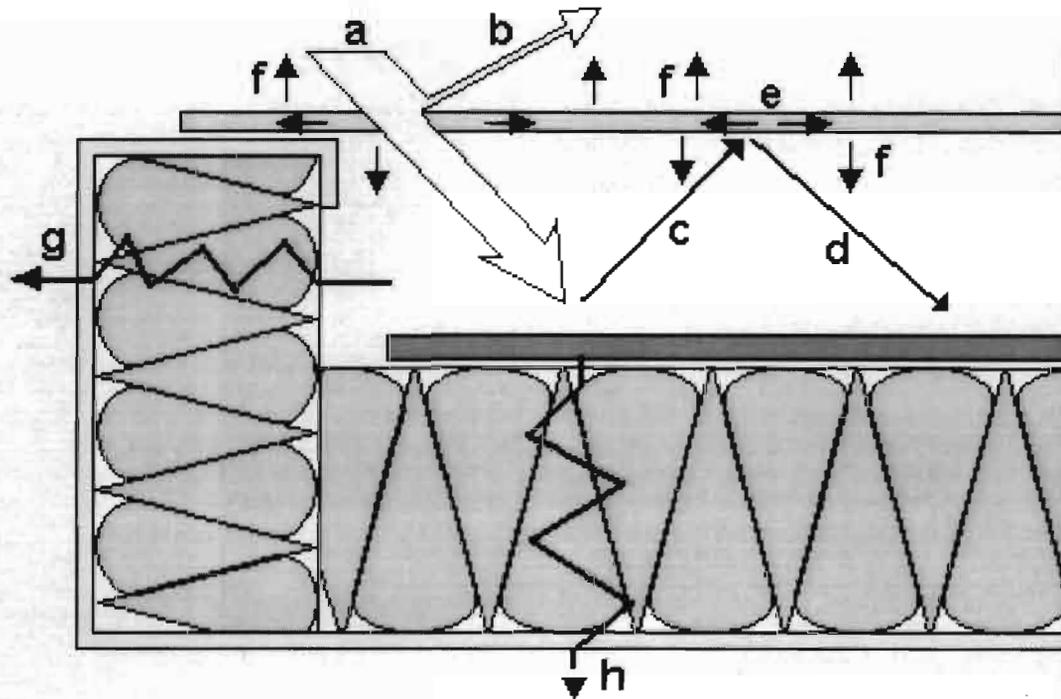


Figure X : Effet de serre à deux vitres

## Annexe IV

**Légende:**

- a. Rayonnement solaire incident
- b. Rayonnement réfléchi par le vitrage (couverture transparente)
- c. Rayonnement thermique émis par l'absorbeur
- d. Rayonnement thermique réfléchi par le vitrage
- e. Rayonnement thermique absorbé par le vitrage
- f. Rayonnement thermique émis par le vitrage
- g,h. Pertes thermiques latérales et inférieures par l'isolation et le cadre

**Figure XI** : Schéma d'un capteur plan vitré

Annexe V

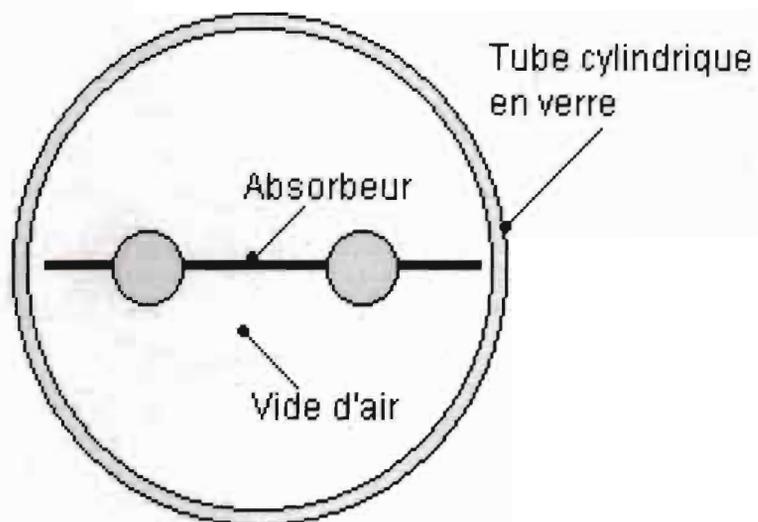


Figure XII.1 : Coupe d'un tube



Figure XII.2 : Le capteur non vitré, dit capteur moquette

Annexe VI

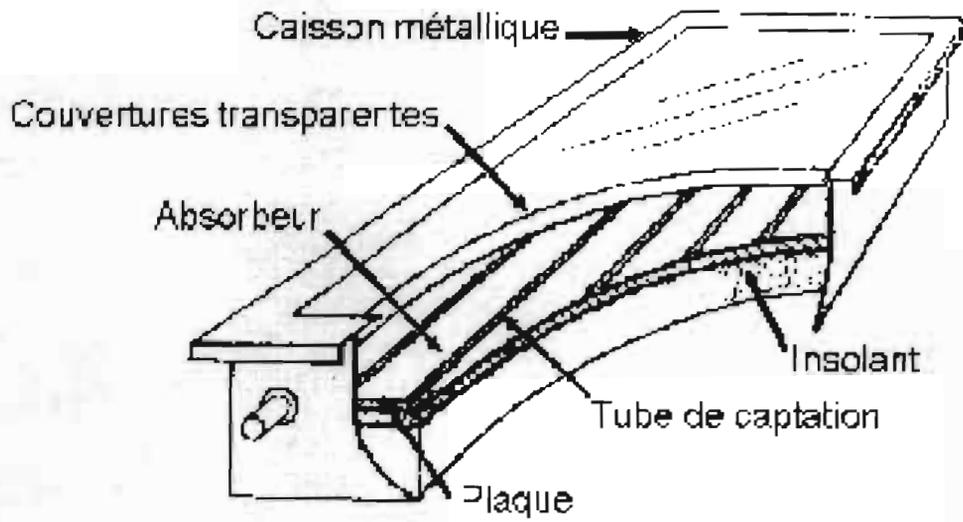


Figure XIII.1 : Vue en perspective d'un capteur solaire plan

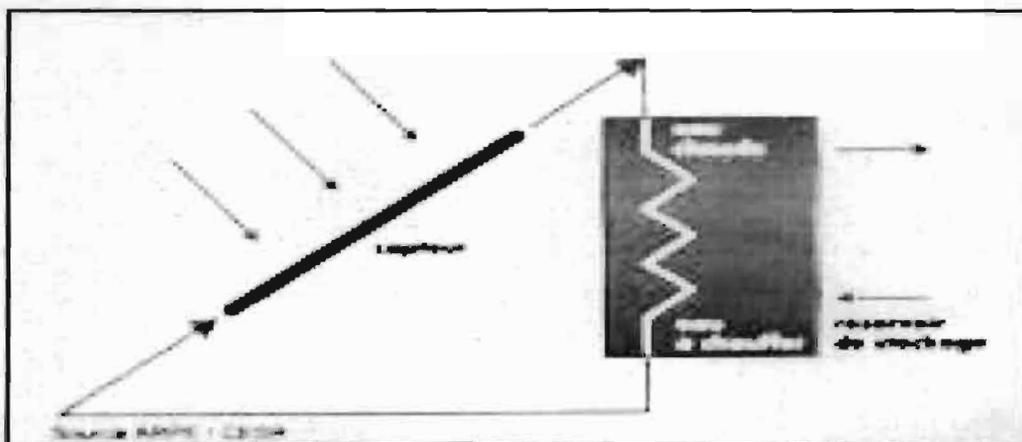


Figure XIII.2 : Le capteur plan dans le chauffage domestique

Annexe VII

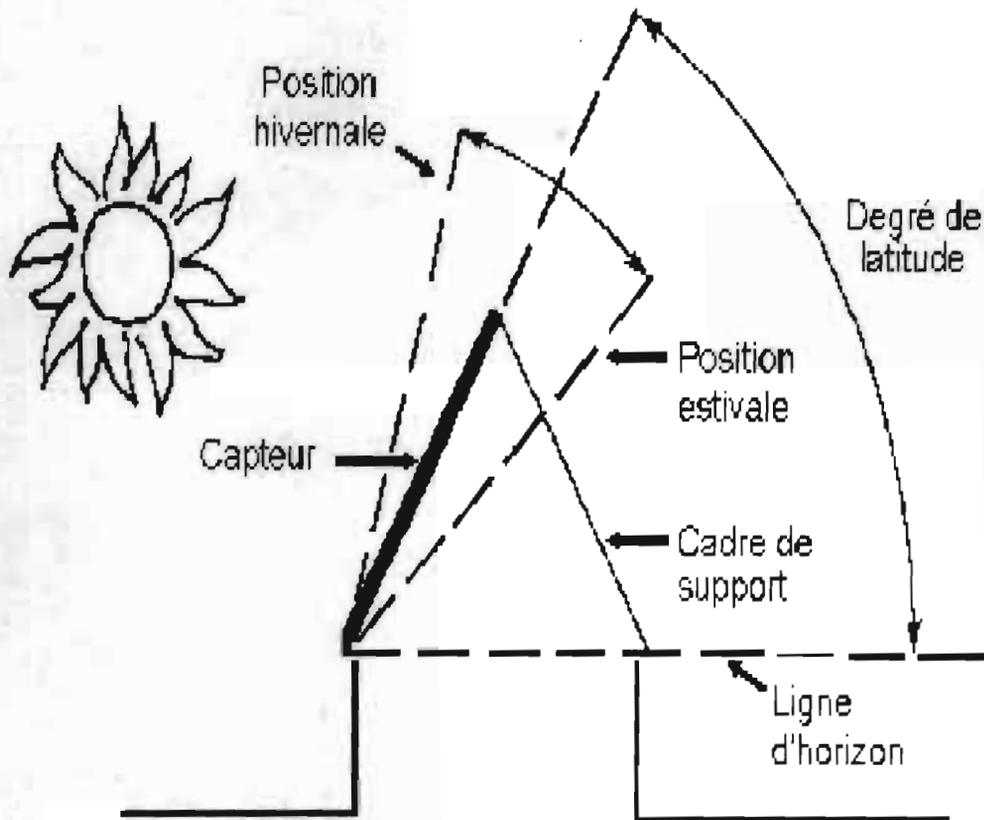


Figure XIV : Angle d'inclinaison d'un capteur

Annexe VIII

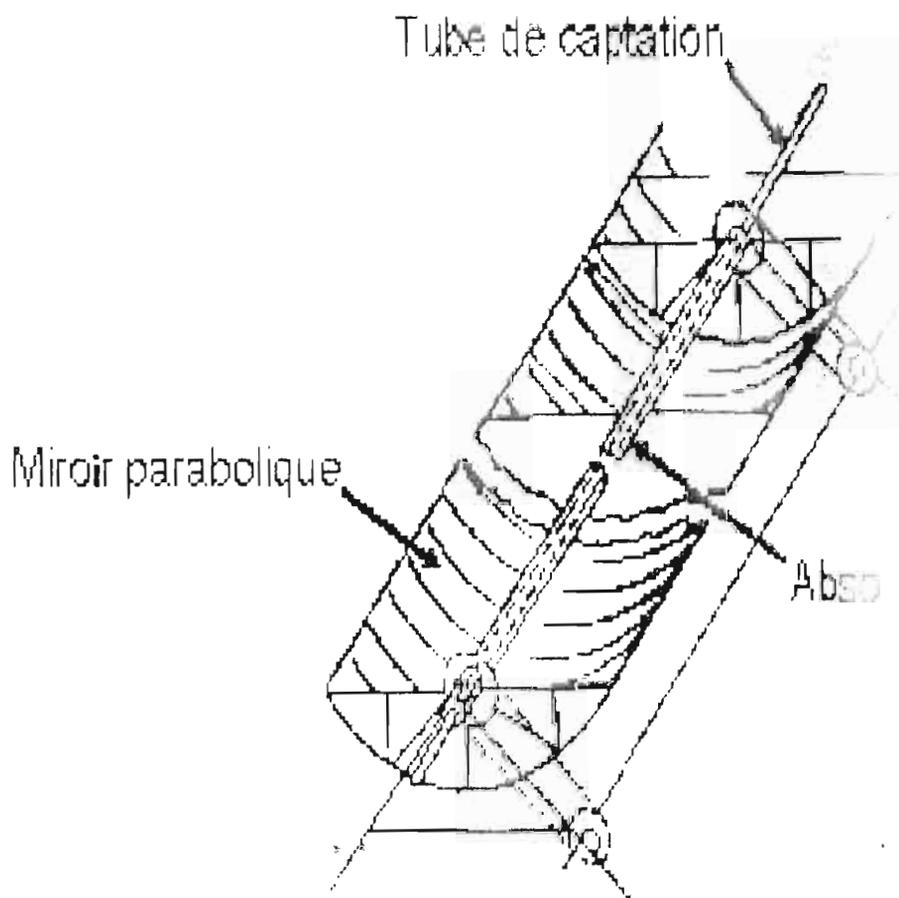


Figure XV : Capteur solaire à concentration

Annexe IX

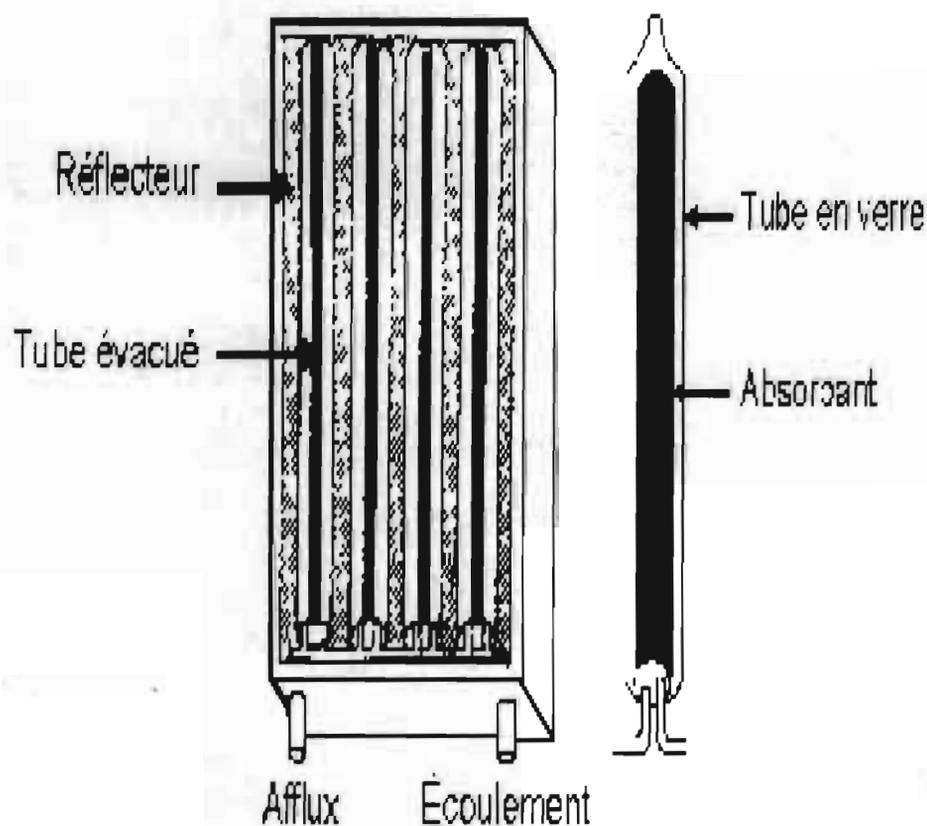


Figure XVI : Capteur solaire à tube sous vide

Annexe X

Rapport de la simulation avec le logiciel

\*\*\*\* 06/18/102 01:03:47 \*\*\*\*\* NT Evaluation PSpice (July 1997) \*\*\*\*

\* C:\ADTTF\Schematic3.sch

\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION

\*\*\*\*\*

\*\*\*

\* Schematics Version 8.0 - July 1997

\* Tue Jun 18 01:03:46 2002

\*\* Analysis setup \*\*

.OP

\* From [SCHEMATICS NETLIST] section of msim.ini:

.lib "nom.lib"

.INC "Schematic3.net"

\*\*\*\* INCLUDING Schematic3.net \*\*\*\*

\* Schematics Netlist \*

V\_Var \$N\_0001 0 30V

V\_Va \$N\_0002 0 26V



NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
(\$N 0001)	30.0000	(\$N 0002)	26.0000				
(\$N 0003)	33.2380	(\$N 0004)	50.0000				

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME      CURRENT

V\_Var      6.803E+00  
V\_Va      1.448E+02  
V\_Vcmoy    3.843E+01  
V\_Vmoy    -1.900E+02

TOTAL POWER DISSIPATION 4.25E+03 WATTS

\*\*\*\* 06/18/02 01:03:47 \*\*\*\*\* NI Evaluation PSpice (July 1997) \*\*\*\*\*

\* C:\DTTF\Schematic3.sch

\*\*\*\* OPERATING POINT INFORMATION    TEMPERATURE = 27.0000 DEG C

\*\*\*\*\*  
\*\*\*

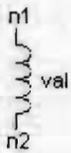
JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME      .15

## Annexe XI

## Complément du langage PSPICE

**Inductance parfaite :**  $Ln$   $n1$   $n2$   $val$  ( $i0$ )

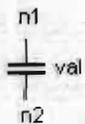


$n1$  et  $n2$  sont les pattes de la self.

$val$  est la valeur de la self (en Henry).

$i0$  est le courant initial dans la self en A, facultatif.

**Condensateur parfait :**  $Cn$   $n1$   $n2$   $val$  ( $v0$ )



$n1$  et  $n2$  sont les pattes du condensateur (pas de polarisation).

$val$  est la valeur de la capacité (en Farad).

$v0$  est la tension initiale aux bornes en V, facultatif

**Diodes :** Dn n1 n2 (modele) (OFF)

*n1* est l'anode A,

*n2* est la cathode K,



*modele* donne le nom du modèle à utiliser pour la simulation, si on a redéfini une diode avec .MODEL. Il existe un modèle prédéfini par défaut.

*OFF* est une condition initiale facultative : permet de bloquer au départ la diode.

**Transistors bipolaires :** Qn n1 n2 n3 modele (OFF)

*n1* est le collecteur C,

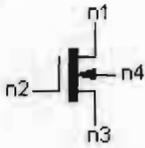
*n2* est la base B,

*n3* est l'émetteur E,



*modele* donne le nom du modèle de transistor à utiliser pour la simulation, défini avec .MODEL.

*OFF* est une condition initiale facultative : permet de bloquer au départ le transistor.

**Transistors MOS-FET :** Mn n1 n2 n3 n4 modele (OFF)

*n1* est le drain D,

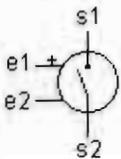
*n2* est la grille G,

*n3* est la source S,

*n4* est le substrat (Bulk),

*modele* donne le nom du modèle à utiliser pour la simulation, défini avec MODEL.

*OFF* est une condition initiale facultative : permet de bloquer au départ le transistor.

**Interrupteur commandé en tension :** Sn s1 s2 e1 e2 modele

*s1* est la borne 1 de la sortie.

*s2* est la borne 2 de la sortie.

*e1* est le + de la tension de commande.

*e2* est le - de la tension de commande.

*modele* est le nom du modèle à utiliser pour la simulation, définit par un .MODEL.