

# THESE

présentée

à l' UNIVERSITE PARIS VII

par

Arnaldo Jorge de PAIVA CRUZ COSTA

Pour obtenir le Diplôme de Doctorat (\*)

Spécialité : ENERGETIQUE

CARACTERISATION ET MODELISATION  
DES CAPTEURS A FAIBLE CONCENTRATION

Proposition d' une Procédure d' Essai

Présentation publique : 28 Octobre 1987

Commission d' examen composée de:

M. Gilles de ROSNY	président
M. Georges PERI	rapporteurs
M. Michel CHANTANT	
M <sup>me</sup> Adelaïde BRANDÃO	examineurs
M. Denis ROYER	
M. Bernard DULIEU	

(\*) arrêté du 5/07/1984

# CARACTERISATION ET MODELISATION DES CAPTEURS A FAIBLE CONCENTRATION

## Proposition d' une Procédure d' Essai

**Jorge Cruz Costa**

Palavras Chave:      Ensaio de Colectores de Baixa Concentração

Temperatura Resultante Seca

Ambiente Standard

Mots-Clef:            Essay de Capteurs à Faible Concentration

Temperature Resultante Sèche

Environnement Standard

Key Words:            Low Concentration Collectors Test

Dry Resultant Temperature

Standard Environment

- A Clara, Susana et Alexandre qui ont accepté sans réserves cette période assez difficile.
- A Joaquim COSTA qui a éveillé en moi l'intérêt pour l'Energie Solaire.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Laboratoire des Techniques Solaires Avancées , sous la direction de Monsieur Denis ROYER, Chef du LTSA , que je tiens à remercier pour l'accueil et pour ses critiques et suggestions qui ont été décisives pour ce rapport .

Je veux aussi remercier Monsieur Michel CHANTANT de son aide toujours présente MM Pierre BONIFAY et Christian CHERON pour la partie expérimentale et Mademoiselle Corinne BLANCHARD qui a bien voulu réviser ce mémoire.

Il serait injuste de ne pas généraliser ce remerciement au personnel du Service d'Etudes Energétiques , pour l'ambiance qui a permis de mener à bon terme ce travail.

Je tiens aussi à remercier la Direction du " **Laboratorio Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial**" qui a autorisé cette mission en m'accordant une bourse.

# CARACTERISATION ET MODELISATION DES CAPTEURS A FAIBLE CONCENTRATION

- 0 - INTRODUCTION** ..... 8
  
- I - DIFFERENCES ENTRE LES CAPTEURS PLANS ET LES CAPTEURS  
A FAIBLE CONCENTRATION** ..... 12
  - 1 - DESCRIPTION DES DIFFERENTS TYPES DE CAPTEURS** ..... 12
    - 1.1 - CAPTEUR PLAN ..... 12
    - 1.2 - CAPTEUR A CONCENTRATION ..... 13
  
  - 2 - PROCEDURES D'ESSAI** ..... 14
  
- II - PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS SOLAIRES** ..... 17
  - 0 - INTRODUCTION** ..... 17
  
  - 1 - ENERGIE SOLAIRE INCIDENTE** ..... 17
    - 1.1 - LES COMPOSANTES DU RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT ..... 17
    - 1.2 - FLUX SOLAIRE DIRECT ..... 17
    - 1.3 - FLUX SOLAIRE DIFFUS ..... 18
      - 1.3.1 - MODELE ISOTROPE ..... 17
      - 1.3.2 - MODELES ANISOTROPES DE KLUCHER ET DE HAY ..... 18
  
  - 2 - FLUX INFRA-ROUGE et TEMPERATURE RESULTANTE d'ENVIRONNEMENT** ..... 25
    - 2.1 - POSITION DU PROBLEME ..... 25
    - 2.2 - BILAN THERMIQUE D'UN CAPTEUR ..... 26
    - 2.3 - TEMPERATURE RESULTANTE D'ENVIRONNEMENT ..... 28
    - 2.4 - CAPTEUR DE TEMPERATURE RESULTANTE D'ENVIRONNEMENT **TRE** ..... 30
      - 2.4.1 - PREAMBULE ..... 30
      - 2.4.2 - MODELE IDEAL ..... 30
      - 2.4.3 - MODELE REEL ..... 33
        - 2.4.3.1 - BILAN ENERGETIQUE ..... 33
        - 2.4.3.2 - REALISATION DU CAPTEUR TRE ..... 38
        - 2.4.3.3 - COMPARAISON AU PYRGEOMETRE ..... 41

	2
2.4.3.4 - CARACTERISATION OPTIQUE DU MIROIR.....	41
2.4.3.5 - ETALONNAGE DU PYRGEOMETRE ET DU CAPTEUR TRE .....	43
<b>2.5 - APPLICATION DE LA NOTION DE TRE AUX ESSAIS DE CAPTEURS.....</b>	<b>49</b>
2.5.1 - <u>POSITION DU PROBLEME</u> .....	
2.5.2 - <u>SYNTHESE DES ESSAIS EN ENSOLEILLEMENT NATUREL ET ARTIFICIEL</u> .....	50
2.5.3 - <u>REPRESENTATION GENERALISEE DES ESSAIS DE CAPTEURS</u> .....	54
<b>2.6 - CONCLUSIONS.....</b>	<b>58</b>
<b>3 - <u>RENDEMENT OPTIQUE</u>.....</b>	<b>59</b>
<b>3.1 - INTRODUCTION.....</b>	<b>59</b>
<b>3.2 - ANGLES D'INCIDENCE PROJETES <math>I_{pt}</math>, <math>I_{pl}</math>.....</b>	<b>59</b>
<b>3.3 - FLUX UTILE.....</b>	<b>60</b>
3.3.1 - <u>TRANSMISSION PAR RAPPORT AUX RAYONNEMENTS DIRECT ET DIFFUS</u> .....	60
3.3.2 - <u>APPAREILS DE MESURE DE L' INTRANT</u> .....	66
<b>3.4 - APPLICATIONS.....</b>	<b>66</b>
3.4.1 - <u>CAPTEUR PLAN STATIONNAIRE</u> .....	67
3.4.2 - <u>CAPTEUR A TUBES SOUS VIDE</u> .....	68
3.4.3 - <u>TRANSMISSION DE L'ENVELOPPE TRANSPARENTE</u> .....	69
<b>4 - <u>PARAMETRES THERMIQUES</u>.....</b>	<b>71</b>
<b>4.1 - INTRODUCTION.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2 - DIMINUTION DES PERTES.....</b>	<b>71</b>
4.2.1 - <u>SELECTIVITE EN SURFACE</u> .....	71
4.2.2 - <u>SELECTIVITE EN VOLUME</u> .....	73
<b>4.3 - AUGMENTATION DU FLUX INCIDENT.....</b>	<b>74</b>
<b>4.4 - COEFFICIENT DE PERTES.....</b>	<b>75</b>
<b>4.5 - NORMES D'ESSAI ET DISPERSION DES RESULTATS.....</b>	<b>75</b>
4.5.1 - <u>NORMES D'ESSAI</u> .....	75
4.5.1.1 - METHODE NBS.....	76
4.5.1.2 - METHODE BSE.....	76
4.5.1.3 - METHODE AFNOR.....	76
4.5.1.4 - METHODE TRANSITOIRE.....	77
4.5.2 - <u>RECOMMANDATIONS POUR LE "ROUND ROBIN"</u> .....	77
4.5.3 - <u>RESULTATS OBTENUS</u> .....	78
4.5.4 - <u>DISCUSSION</u> .....	79
<b>4.6 - INFLUENCE DU VENT.....</b>	<b>79</b>
4.6.1 - <u>POSITION DU PROBLEME</u> .....	79
4.6.2 - <u>APPLICATION</u> .....	80
4.6.3 - <u>CONCLUSION</u> .....	81

	3
<b>III – APPLICATION AU CONCENTRATEUR PARABOLIQUE COMPOSE</b> .....	85
<b>1 – <u>PRESENTATION DES CAPTEURS</u></b> .....	85
<b>1.1 – INTRODUCTION</b> .....	85
<b>1.2 – DESCRIPTION DES CAPTEURS</b> .....	85
<b>1.3 – SURFACE REFLECHISSANTE</b> .....	88
<b>2 – <u>MODELE OPTOTHERMIQUE</u></b> .....	90
<b>2.1 – INTRODUCTION</b> .....	90
<b>2.2 – MODELE OPTIQUE</b> .....	91
2.2.1 – <u>SYSTEME A 2 DIMENSIONS</u> .....	91
2.2.2 – <u>GENERALISATION A TROIS DIMENSIONS DU CODE CHAOPT</u> .....	94
2.2.3 – <u>APPLICATIONS</u> .....	96
<b>2.3 – SURFACE DE RENDEMENT OPTIQUE ( détermination analytique)</b> .....	108
<b>2.4 – MODELE THERMIQUE</b> .....	111
<b>2.5 – MODELE GENERAL DU CAPTEUR</b> .....	115
2.5.1 – <u>INTRODUCTION</u> .....	115
2.5.2 – <u>DESCRIPTION DU CODE DE CALCUL DES PERFORMANCES</u> .....	115
2.5.2.1 – PERFORMANCES JOURNALIERES .....	115
2.5.2.2 – PERFORMANCES ANNUELLES .....	116
<b>3 – <u>BOUCLE D'ESSAI ET INSTRUMENTATION</u></b> .....	120
<b>3.1 – BOUCLE D' ESSAI</b> .....	120
<b>3.2 – INSTRUMENTATION</b> .....	120
3.2.1 – <u>DÉTECTEURS ET LEUR ETALONNAGE</u> .....	120
3.2.2 – <u>SYSTEME D'ACQUISITION ET CHAINE DE MESURE</u> .....	121
<b>3.3 – ACQUISITION</b> .....	121
<b>4 – <u>RESULTATS EXPERIMENTAUX</u></b> .....	123
<b>4.1 – RENDEMENTS JOURNALIERS</b> .....	123
<b>4.2 – MODELE THERMIQUE POINTE</b> .....	127
<b>4.3 – RENDEMENT OPTIQUE</b> .....	129
<b>5 – <u>PREVISION DES PERFORMANCES</u></b> .....	131
<b>5.1 – RENDEMENTS INSTANTANES</b> .....	131
<b>5.2 – PRODUCTIBILITE ANNUELLE DU CAPTEUR</b> .....	133

	4
<b>IV - SUGGESTION DE PROCEDURE D'ESSAI</b> .....	135
<b>0 - <u>INTRODUCTION</u></b> .....	135
<b>1 - <u>ANALYSE CRITIQUE DE LA NORME NF P50-501</u></b> .....	135
1.1 - ENSOLEILLEMENT NATUREL.....	135
1.2 - ENSOLEILLEMENT ARTIFICIEL.....	136
1.3 - MESURE DES RAYONNEMENTS.....	136
1.4 - CRITERES DE STABILITE.....	136
1.5 - FLUX INFRA-ROUGE.....	137
1.6 - VITESSE DU VENT.....	137
<b>2 - <u>EXPRESSION DES RESULTATS</u></b> .....	137
2.1 - ENVIRONNEMENT STANDARD.....	137
2.2 - MODELE OPTIQUE.....	139
2.3 - MODELE THERMIQUE.....	139
2.4 - TABLEAU DE PRESENTATION DES RESULTATS.....	139
<b>V - CONCLUSIONS</b> .....	142
<b>VI - BIBLIOGRAPHIE</b> .....	144
<b>VII- ANNEXES</b> .....	148
<b>1 - <u>CODE DE CALCUL TRE</u></b> .....	148
<b>2 - <u>CODE DE CALCUL CPC</u></b> .....	155

## LISTE DES FIGURES

- FIG 1 - EXEMPLES DE CONCENTRATEURS
- FIG 2 - RENDEMENT OPTIQUE
- FIG 3 - DIFFUS ANISOTROPE
- FIG 4 - SCHEMA D'UN CAPTEUR
- FIG 5 - CAPTEUR TRE
- FIG 6 - TRE - MODELE IDEAL
- FIG 7 - REFLEXIONS MULTIPLES
- FIG 8 - TRE Modèle réel
- FIG 9 - TRE Modèle réel
- FIG 10 - SCHEMA DU CAPTEUR TRE
- FIG 11 - PHOTOGRAPHIE DU CAPTEUR TRE
- FIG 12 - MONTAGE POUR L'ETALONNAGE DU CAPTEUR TRE
- FIG 13 - CAVITE
- FIG 14 - EMISSIVITE D'UNE CAVITE EN FONCTION DE L'EMISSIVITE DE LA PAROIE INTERNE
- FIG 15 - ETALONNAGE DU CAPTEUR TRE
- FIG 16 - FLUX INFRA-ROUGE
- FIG 17 - COURBES CARACTERISTIQUES D'UN CAPTEUR
- FIG 18 - COURBES CARACTERISTIQUES D'UN CAPTEUR
- FIG 19 - COURBES CARACTERISTIQUES D'UN CAPTEUR
- FIG 20 - COURBES CARACTERISTIQUES D'UN CAPTEUR
- FIG 21 - COORDONNEES POUR LE CALCUL DU DIFFUS TRANSMIS
- FIG 22 - FACTEUR DE FORME
- FIG 23 - CALCUL DE  $d^2s$
- FIG 24 - FACTEUR DE FORME
- FIG 25 - FACTEUR DE FORME
- FIG 26 - FACTEUR DE FORME
- FIG 27 - SYSTEMES D'AXES LIES AUX CAPTEURS
- FIG 28 - SURFACE DE RENDEMENT OPTIQUE
- FIG 29 - TUBES SOUS-VIDE
- FIG 30 - TRANSMISSION DE L'ENVELOPPE
- FIG 31 - BILAN ENERGETIQUE
- FIG 32 - CORPS NOIR
- FIG 33 - SURFACE SELECTIVE
- FIG 34 - DISPERSION DES ESSAIS DE CAPTEURS
- FIG 35 - INFLUENCE DU VENT - FLUX  $1000 \text{ W/m}^2$
- FIG 36 - INFLUENCE DU VENT - FLUX  $800 \text{ W/m}^2$
- FIG 37 - INFLUENCE DU VENT - FLUX  $500 \text{ W/m}^2$
- FIG 38 - INFLUENCE DU FLUX - Vitesse du Vent =  $0 \text{ m/s}$

- FIG 39 - INFLUENCE DU FLUX - Vitesse du Vent = 2 m/s
- FIG 40 - INFLUENCE DU FLUX - Vitesse du Vent = 5 m/s
- FIG 41 - RACCORDEMENT DES TUBES SOUS VIDE
- FIG 42 - CAPTEUR 1 (bas) et CAPTEUR 2 (haut)
- FIG 43 - SHEMA DU TUBE SOUS VIDE
- FIG 44 - CONCENTRATEUR PARABOLIQUE COMPOSE
- FIG 45 - SURFACE REFLECHISSANTE
- FIG 46 - SYSTEME D' AXES
- FIG 47 - TRANSMISSION OPTIQUE EN FONCTION DE L'ANGLE d'INCIDENCE
- FIG 48 - PROFIL DU CPC THEORIQUE
- FIG 49 - VISUALISATION DES RAYONS REFLECHIS
- FIG 50 - CPC Type II -  $\text{lpt}=0^\circ$
- FIG 51 - REPARTITION DU FLUX SUR L'ABSORBEUR
- FIG 52 - CPC Type II -  $\text{lpt}=10^\circ$
- FIG 53 - REPARTITION DU FLUX SUR L'ABSORBEUR
- FIG 54 - CPC Type II -  $\text{lpt}=20^\circ$
- FIG 55 - REPARTITION DU FLUX SUR L'ABSORBEUR
- FIG 56 - CPC Type II -  $\text{lpt}=28^\circ$
- FIG 57 - REPARTITION DU FLUX SUR L'ABSORBEUR
- FIG 58 - CPC Type II Profils théorique et sans pertes
- FIG 59 - FLUX SUR L'ABSORBEUR -  $\text{lpt}=0^\circ$
- FIG 60 - FLUX SUR L'ABSORBEUR -  $\text{lpt}=5^\circ$
- FIG 61 - FLUX SUR L'ABSORBEUR -  $\text{lpt}=20^\circ$
- FIG 62 - FLUX SUR L'ABSORBEUR -  $\text{lpt}=28^\circ$
- FIG 63 - FLUX SUR L'ABSORBEUR -  $\text{lpt}=30^\circ$
- FIG 64 - TRANSMISSION OPTIQUE ( $R_o=0.75$  et  $R_o=0.85$ )
- FIG 65 - TRANSMISSION OPTIQUE (  $R_o=0.85$ )
- FIG 66 - MAILLAGE DE L'ABSORBEUR
- FIG 67 - REPARTITION DE TEMPERATURES SUR L'ABSORBEUR ( $T_{mf}=40^\circ\text{C}$ )
- FIG 68 - REPARTITION DE TEMPERATURES SUR L'ABSORBEUR ( $T_{mf}=100^\circ\text{C}$ )
- FIG 69 - ENERGIE INCIDENTE MENSUELLE
- FIG 70 - ENERGIE UTILISABLE (Mois par Mois )
- FIG 71 - BOUCLE D'ESSAI ET INSTRUMENTATION
- FIG 72 - MODELES DES CAPTEURS 1 ET 2 (de 11 h a 13 h)
- FIG 73 - FLUX DIRECT, GLOBAL ET GLOBAL DANS L'ACCEPTANCE
- FIG 74 - VARIATION JOURNALIERE DES TEMPERATURES AMBIANTE ET DANS LE CAPOT
- FIG 75 - VARIATION JOURNALIERE DES TEMPERATURES DU TUBE ET DE SORTIE
- FIG 76 - VARIATION JOURNALIERE DES TEMPERATURES D'ENTREE ET DE SORTIE
- FIG 77 - MODELE DU SECOND ORDRE DU CPC Type II
- FIG 78 - SURFACE EXPERIMENTALE DE RENDEMENT OPTIQUE
- FIG 79 - COMPARAISON MODELE-EXPERIENCE CAPTEUR 1

FIG 80 - COMPARAISON MODELE-EXPERIENCE CAPTEUR 2

FIG 81 - BILAN ANNUEL D'UNE INSTALLATION

FIG 82 - COURBES CARACTERISTIQUES D'UN CAPTEUR SELECTIF

## 0 – INTRODUCTION

L' Energie Solaire présente des spécificités très marquées par rapport aux sources énergétiques habituellement exploitées et notamment le fait qu' il s' agit d' un flux intermittent, de faible densité, et soumis à des variations aléatoires, journalières et saisonnières.

Ces spécificités rendent souvent délicate la prise en compte, pourtant indispensable, de l'utilisation rationnelle de l' énergie.

D' autre part elles conduisent souvent à un investissement relativement élevé qui leur est préjudiciable dans une comparaison avec les autres sources.

Dans ce cas, et en première approche, il faut – au moins – que l' investissement consenti soit récupéré dans un temps bien inférieur à la durée de vie prévisible pour le système.

Pour ce qui concerne le présent travail, notre contribution s' appuie sur le fait que pour savoir si une installation peut être économiquement valable, il faut connaître ses performances et pour les connaître il faut pouvoir en caractériser l'ensemble des éléments.

Parmi ceux-ci, les capteurs sont un maillon essentiel et leur caractérisation, en vue de la connaissance des performances des systèmes, sera le sujet central de ce mémoire.

Il existe différents types d'essai de capteurs solaires et on peut les classer selon le régime de fonctionnement qui peut être quasi-stationnaire, transitoire ou dynamique, selon le type d'ensoleillement naturel ou artificiel ou les procédures mixtes .

Les procédures à adopter sont présentées sous la forme de Normes [ 1 ] à [5].

Si on essaye de caractériser des capteurs solaires en Ensoleillement Naturel, en utilisant les normes existantes, on constate qu'il y a une grande dispersion entre les résultats obtenus dans différents Laboratoires et qu'il n'y a pas de reproductibilité des résultats obtenus dans la même installation à des époques différentes.

Une partie de cette dispersion est d'ûe aux imprécisions des mesures de température, de débit et d'autres grandeurs, ceci n' étant d' ailleurs pas spécifique aux capteurs solaires.

Une autre partie, plus spécifique, est liée au choix des grandeurs représentant l'environnement, comme par exemple :

- la Température ambiante qui intervient dans les échanges conductifs et convectifs.

- les niveaux de Flux Infra-Rouge descendant dépendent, à l'extérieur, de la Température Equivalente de Voûte qui, à son tour, dépend du trouble atmosphérique, de la Température Ambiante et de la fraction de couverture nuageuse.
- le vent dont la contribution n'est pas négligeable.
- le Flux Solaire doit être caractérisé en fonction du type de capteur, car normalement les capteurs n'acceptent qu'une partie de ce Flux.

Beaucoup de travaux ont été publiés sur ce type de problèmes notamment par la Commission des Communautés Européennes [ 7 ] , [ 8 ] et [ 9 ].

Il y a une préoccupation croissante de normalisation des résultats d'essais pour des conditions standard en utilisant des codes de calcul assez lourds comme c'est le cas du modèle de calcul de Ashley GREEN [ 10 ].

Ces méthodes décrivent de façon détaillée les pertes conductives, convectives et radiatives.

Notre proposition ira dans le sens de caractériser le capteur en utilisant une température fictive qui permettra l'extrapolation des résultats obtenus à d'autres environnements.

En outre nous nous sommes intéressés à des capteurs moins conventionnels qui permettent des températures de fonctionnement plus élevées, comme c'est le cas des capteurs à faible concentration, du type Concentrateur Parabolique Composé ( **CPC** ), développés par l'équipe de R. WINSTON à l'Université de Chicago [ 11 ] à [ 14 ].

Ces capteurs ont l'avantage de pouvoir travailler à des températures entre 80 et 150<sup>0</sup> C avec des rendements acceptables, sans avoir besoin de moteurs de suivi, c'est à dire restant stationnaires comme les capteurs plans.

Nous avons constaté qu'il y avait encore beaucoup de questions à étudier.

Nous avons constaté, par exemple, que pour ces capteurs, la plupart des travaux publiés ne prend pas en considération la répartition de flux sur l'absorbeur [ 17 ] à [ 18 ] .

ORTOBASI [ 19 ], a utilisé le Laser pour avoir une idée de la répartition de flux. HSIEH [ 20 ] a modélisé le tube absorbeur sous-vide par analogie électrique et finalement CHOW [ 21 ] a publié un travail sur l'influence de l'angle d'incidence sur le Rendement Optique.

Nous avons associé au capteur ses plans longitudinal et transversal et nous avons considéré les deux projections de l'angle d'incidence sur ces deux plans (  $\theta_{pt}$  et  $\theta_{pl}$  ).

Ceci nous a permis de déterminer analytiquement et expérimentalement ce que nous avons appelé la SURFACE de RENDEMENT OPTIQUE.

La forme de la courbe expérimentale obtenue aide à comprendre le comportement caractéristique de ce type de capteurs.

L' influence de l' angle d' incidence peut être décrite de façon synthétique par le Modificateur de l' angle d' incidence mais la détermination de la Surface de Rendement Optique permet une description plus complète permettant son utilisation dans un code de prévision des performances qui considère le mouvement apparent du Soleil.

Le Modificateur d' Angle d' Incidence, nécessaire pour le modèle de Collares-Pereira [ 15 ] et [ 16 ], peut être calculé à partir de la Surface de Rendement Optique.

Ce travail de Thèse commence avec un aperçu des différences principales entre les capteurs plans et les capteurs à faible concentration.

Ensuite nous avons fait une analyse du Flux Solaire ( Direct et Diffus ) et du Flux Infra-Rouge en utilisant des concepts tels que l' INTRANT et la TEMPERATURE RESULTANTE d' ENVIRONNEMENT.

Ceci nous a permis de voir ce qui conditionne le Rendement Optique. Nous avons pu ensuite étudier les paramètres thermiques et l'Influence du Vent.

Pour la réalisation de partie expérimentale, nous avons utilisé un Concentrateur Parabolique Composé projeté et construit au Service d'Etudes Energétiques ( Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache ).

Nous avons fait d'abord une approche analytique basée principalement sur deux codes de calcul, le premier permettant de déterminer la répartition de flux sur l'absorbeur et le second partant de cette distribution, permet de calculer les échanges thermiques entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

Puis nous avons déterminé expérimentalement un modèle du second ordre représentant les performances du capteur pointé et la surface de Rendement Optique.

Cette application au CPC se termine par la prévision des performances d' un champ de capteurs, en déterminant des "courbes d' utilisabilité" avec un code de calcul qui considère le mouvement apparent du Soleil.

Ayant ainsi une vision d'ensemble des problèmes soulevés par la caractérisation des capteurs solaires, nous présentons, en synthèse, une proposition de procédure d'essai.

Partant de l'analyse des problèmes de la non reproductibilité et de la dispersion des résultats d'essais de capteurs solaires, nous avons conclu que la résolution de ces problèmes passe par l'utilisation de modèles mathématiques permettant l'extrapolation des résultats expérimentaux obtenus aux conditions de fonctionnement envisagées.

Partant de la méthodologie classique de caractérisation des capteurs solaires plans, notre proposition permet l'extrapolation de ces méthodes d'essai à d'autres types de capteurs dont la caractérisation est plus complexe comme c'est le cas des capteurs sans couverture transparente et des capteurs concentrateurs, stationnaires ou avec suivi .

## I – DIFFERENCES ENTRE LES CAPTEURS PLANS ET LES CAPTEURS A CONCENTRATION

### 1 – DESCRIPTION DES DIFFERENTS TYPES DE CAPTEURS

Il existe différentes sortes de capteurs solaires thermiques et nous pouvons les grouper selon différents critères comme par exemple :

- Température de fonctionnement
- Existence ou non de dispositifs pour la réduction des pertes
- Mobilité
- etc.

Pour l'analyse que nous voulons faire dans ce chapitre le critère qui nous intéresse le plus est celui de la mobilité :

**Stationnaire** ( capteur à position fixe )

**Saisonnier** ( capteur sans moteur de suivi, dont la position est ajustée quelques fois par an)

**Demi-suivi** ( capteur avec un degré de liberté )

**Suivi Intégral** ( capteur avec deux degrés de liberté )

Une des caractéristiques importantes des capteurs solaires est l'angle maximal d'incidence que le capteur peut accepter .

Cet angle est appelé le Demi - Angle d' Acceptance ou tout simplement l' **Angle d' Acceptance** (  $\theta_A$  ).

#### 1.1 – CAPTEUR PLAN

Le capteur plan est un capteur stationnaire constitué d'un absorbeur irrigué par un fluide caloporteur, protégé de l'environnement par une boîte isolée ( arrière et cotés), ayant une couverture transparente en face de l'absorbeur.

Les capteurs plans ont un angle d' acceptance théorique de  $90^\circ$ .

L' existence d' une couverture , dont le coefficient de Transmission est inférieur à l' unité, fait que la densité du flux qui atteint l'absorbeur est inférieure à la densité de flux incidente.

## 1.2 – CAPTEUR A CONCENTRATION

Le capteur à concentration est un capteur où la densité de flux au niveau de l'absorbeur est supérieure à la densité de flux au niveau de la section d'entrée, ce renforcement de flux étant obtenu par l'intermédiaire de miroirs ou de lentilles.

La **concentration géométrique** (  $C_g$  ) est le rapport entre l'aire de la section d'entrée et celle de réception.

La **concentration énergétique** est le rapport entre les densités de flux au niveau de l'absorbeur et au niveau de la surface d'entrée.

Le Flux est normalement inhomogène sur l'absorbeur et la concentration énergétique moyenne est donc la valeur moyenne intégrée sur toute la surface de l'absorbeur.

Il y a donc une correspondance entre la concentration géométrique et la concentration énergétique moyenne.

R. WINSTON [24] a démontré, par la théorie de la Conservation de l'Espace de Phase, que la concentration maximale sur un concentrateur idéal est donnée par :

$$C_{\max} = n / \sin \theta_a \quad (\text{capteurs cylindriques aussi appelés 2D})$$

$$C_{\max} = n^2 / \sin^2 \theta_a \quad (\text{capteurs de révolution aussi appelés 3D})$$

$n$  – étant l'Indice de Réfraction du milieu qui entoure l'absorbeur (  $n_{\text{air}} = 1$  )

$\theta_a$  – étant le demi-angle d'acceptance du concentrateur

Ari RABL [25] a aussi démontré ces relations mais à partir du Second Principe de la Thermodynamique.

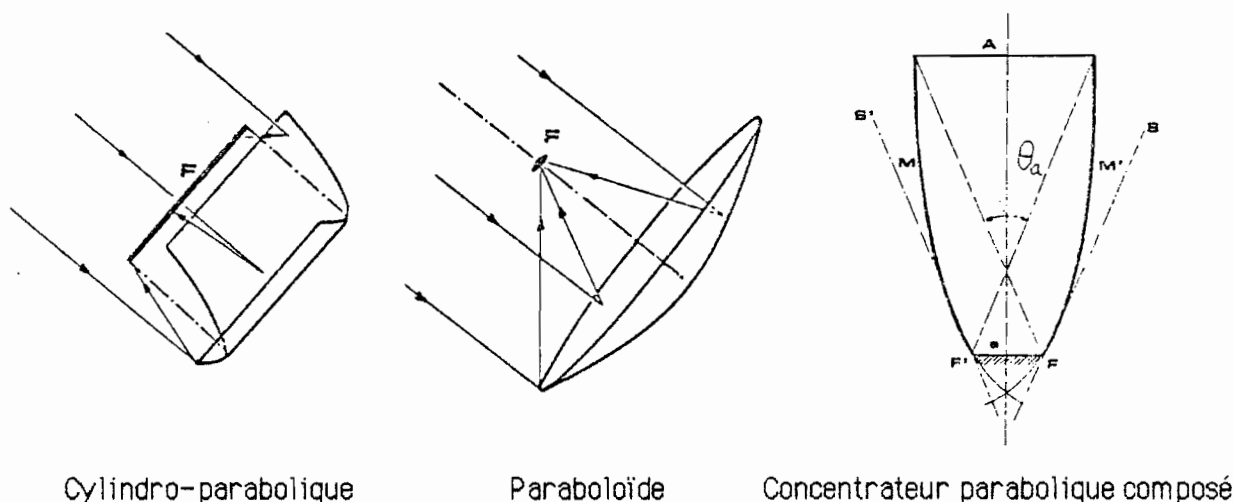
L'angle d'acceptance  $\theta_a$  conditionne d'une part la rigueur du suivi du mouvement apparent du Soleil et d'autre part la fraction du rayonnement diffus vue par le capteur.

Nous présentons maintenant une classification des différents types de concentrateurs, selon leur mobilité, en donnant des exemples de capteurs avec l'indication de leur Concentration géométrique et de leur angle d'acceptance :

<b>Stationnaire</b>	C. parab. composé	$1 < C_g < 1.7$	$90^\circ > \theta_a > 35^\circ$
<b>Saisonnier</b>	C. parab. composé	$1.7 < C_g < 3$	$35^\circ > \theta_a > 20^\circ$
<b>Demi-Suivi</b>	Cyl. Parabolique	$3 < C_g < 100$	$20^\circ > \theta_a > 0.01 \text{ rad } (*)$
<b>Suivi Intégral</b>	Paraboloïde	$100 < C_g < 10000$	$0.1 > \theta_a > 0.01 \text{ rad } (**)$

( \* ) - Mouvement de suivi un axe . La concentration est limitée par le non parallélisme du rayonnement direct.

( \*\* ) - Montage équatorial ou mouvement de suivi deux axes . La concentration est aussi limitée par le non parallélisme du rayonnement direct.



**Figure 1** Exemples de concentrateurs ( Extrait de [40] )

## 2 - PROCEDURES D'ESSAI

Si on analyse les Normes d'essai existantes, [1] à [5], on constate qu'elles essaient de caractériser les capteurs d'une façon globale.

Cependant cette caractérisation implique d'une part la connaissance de l'Energie Incidente ( bien définie par les normes existantes ) et d'autre part, de l'Energie réellement acceptée par le capteur, l'**énergie utile**.

Ceci implique une connaissance de l'anisotropie du Flux Diffus ( voir Chap II 1.2 ).

En réalité, du fait que les capteurs ont deux types de pertes, optiques et thermiques, il sera intéressant de les découpler en utilisant des modèles du type analytique.

Cependant il existe des capteurs où le modèle optique est bien connu, comme c'est le cas des capteurs plans où l'effet des réflexions sur la couverture transparente a été modélisé, par exemple par DUFFIE et BECKMAN [26].

D'autres capteurs, par contre, ont un comportement optique plus complexe et les modèles obtenus par des méthodes globales d'essai ne sont pas utilisables dans des codes de calcul de prévision des performances.

Ceci est le cas des capteurs à concentration stationnaires qui nous intéressent et qui doivent être caractérisés de façon détaillée. Leur essai se décomposera en deux, pour décrire séparément les caractéristiques optiques et thermiques:

- le premier, capteur pointé vers le Soleil, décrira son comportement thermique.
- le second caractérisera la dépendance angulaire de l'efficacité optique du capteur.

L'efficacité optique sera caractérisée expérimentalement en faisant des essais à des températures telles que les pertes thermiques soient proches de zéro.

La position du soleil par rapport au capteur sera définie par ses projections sur les plans longitudinal et transversal (  $l_p$  et  $l_t$  ).

Les capteurs du type cylindrique, sans suivi ( cas du Concentrateur Parabolique Composé ), seront caractérisés par un tableau à deux entrées (  $l_p, l_t$  ), ou par une surface qu'on appellera la **Surface de Rendement Optique**.

**$l_p$**  – Angle d'incidence projeté

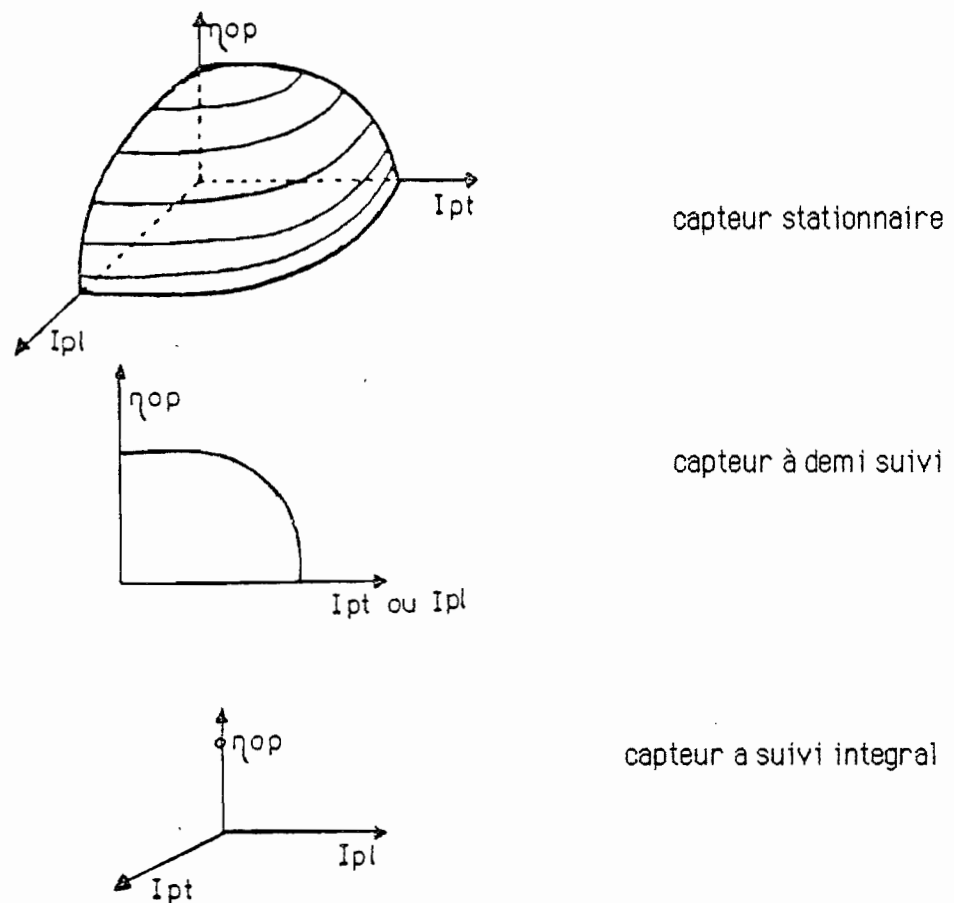
**Indice l** – projection sur le plan longitudinal

**Indice t** – projection sur le plan transversal

Cette surface se résume à une courbe si le capteur a un demi-suivi ( c.a.d. le Soleil "évolue" toujours, soit sur le plan longitudinal soit sur le plan transversal) et à un point si le suivi est intégral ( l'angle d' incidence est toujours nul):

**Demi- suivi:** Un des deux angles projetés est toujours nul

**Suivi Intégral :** Les deux angles projetés sont toujours nuls



**Figure 2** *Rendement optique*

La caractérisation thermique étant réalisée avec le capteur pointé nous permet donc de séparer les caractéristiques thermiques des caractéristiques optiques.

Nous avons montré que pour pouvoir découpler les caractéristiques thermiques des caractéristiques optiques, il faut établir des classes de capteurs selon un critère de mobilité.

Ce critère est important car il conditionne le comportement optique du capteur.

Dans le Chapitre II nous analyserons ce qui conditionne les performances d'un capteur.

Nous caractériserons l'INTRANT, le Flux Infra-Rouge, l'effet du vent et nous verrons que les Normes, actuellement existantes, ne prennent en compte le Flux Infra-Rouge et l'effet du Vent que par des seuils imposés dans les conditions d'essai.

Nous étudierons d'une façon détaillée les propriétés optiques et thermiques des capteurs.

## II – PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS SOLAIRES

### 0 – INTRODUCTION

Après un examen succinct des différents types de capteurs, dans ce chapitre nous étudierons la façon dont les flux solaire et infra-rouge doivent être pris en considération en vue de l'interprétation des essais des capteurs et leur comportement optique et thermique.

### 1 – ENERGIE SOLAIRE INCIDENTE

#### 1.1 – LES COMPOSANTES DU RAYONNEMENT INCIDENT

L' énergie incidente dans l'angle d'acceptance d'un capteur, se décompose en une partie Rayonnement Direct et une partie Rayonnement Diffus :

- **Flux Direct** ( mesuré par un Pyréliometre ayant un angle d'acceptance de  $2.8^{\circ}$  )
- **Flux Diffus** ( difference entre le Flux Global hémisphérique et le Flux Direct )

Nous verrons que le Flux Diffus est anisotrope et une fois cette anisotropie caractérisée, nous appellerons cet ensemble l' **INTRANT SOLAIRE** .

#### 1.2 – FLUX SOLAIRE DIRECT

Le fait que l' appareil de mesure du Flux Solaire direct ait un angle d'acceptance de  $2.8^{\circ}$  constitue un problème dès qu'on a à tester des capteurs ayant des angles d'acceptance plus faibles.

Pour les capteurs cylindriques ( 2D ) ayant des concentrations géométriques supérieures à **20 x** ou pour les capteurs de révolution ( 3D ) ayant des concentrations géométriques supérieures à **400 x** , la valeur de Flux Direct mesurée par le Pyréliometre est supérieure au Flux accepté par le capteur.

D'une façon générale, on ne doit mesurer que le Flux que le capteur peut accepter et nous proposerons plus loin ( § 2.1.2 ) un appareil de mesure mieux adapté.

Dans le cas du capteur que nous avons testé, le Concentrateur Parabolique Composé ( **CPC** ), avec un angle d'acceptance de  $30^{\circ}$  ( Concentration Géométrique de  $2 x$  ) le Flux Direct mesuré par le Pyréliometre est correct.

### 1.3 – FLUX SOLAIRE DIFFUS

#### 1.3.1 – MODELE ISOTROPE

Nous avons déjà abordé ce concept d'énergie vue par le capteur ( Energie Utile ). Dans le cas des capteurs à grand angle d'acceptance ( capteurs plans ou les CPCs ) nous pouvons donc accepter le Flux Direct comme étant celui mesuré par le Pyrhéliomètre.

Néanmoins, tout le Flux Diffus n'est pas accepté ( Voir Chap II 2.1.1 ).

La décomposition du rayonnement accepté par le capteur, en Direct et Diffus isotrope, est très commode et correspond à une émittance constante de toute la voûte céleste :

$$\Phi_{\text{dif}} = M_2 S_2 F_{2-1} = M_2 S_1 F_{1-2}$$

$\Phi_{\text{dif}}$  - Flux Diffus

$M_2$  - Emission de la Voûte

$S_2$  - Surface de la Voûte

$F_{2-1}$  - Facteur de Forme de la Voûte vers le capteur

#### 1.3.2 – MODELES ANISOTROPES DE KLUCHER ET DE HAY ET COMPARAISON AVEC LE MODELE ISOTROPE

Si on veut faire une analyse plus fine de l'INTRANT en Ensoleillement Naturel il faudra, considérer le Flux Diffus comme étant anisotrope.

En Ensoleillement Artificiel, la seule possibilité en ce moment est de mesurer le Flux Global Hémisphérique ou le Global Incliné mais, à cause des fluctuations dans le temps et de la non uniformité dans l'espace, la valeur de Flux à considérer ne peut être obtenue que par une cartographie où on considère la moyenne des moyennes des Flux sur la surface d'entrée du capteur.

Les capteurs ayant un grand angle d'acceptance et où l'angle d'incidence a comme effet principal la diminution du Flux intercepté, sont peu directionnels et ne posent pas de problèmes.

Par contre les Concentrateurs Paraboliques Composés ne peuvent être testés que si on caractérise complètement l'INTRANT ce qui est difficile car le capteur voit le Simulateur Solaire selon un angle très important et ici la répartition du Flux en Flux Direct et Flux Diffus n'est pas possible.

Pour ces raisons il sera très difficile de tester ce type de capteurs en Ensoleillement Artificiel.

Nous allons décrire maintenant deux modèles de Flux Diffus Anisotrope en les comparant avec le modèle Isotrope:

Nous nous baserons sur une étude effectuée par C.Y. MA et M. IQBAL [27]

Le Modèle Isotrope, le Modèle de Klucher et le Modèle de Hay sont comparés en utilisant des valeurs Horaires des Rayonnements Global et Diffus, mesurés ou calculés, incidant sur des surfaces horizontales à WOODBRIDGE - ONTARIO.

Les surfaces sont orientées vers le Sud et on peut considérer les trois composantes du Flux:

**1 - Direct**

**2 - Diffus**

**3 - Réfléchi**

MODELES

Ces trois modèles ont des hypothèses communes pour le flux direct et pour le flux réfléchi.

Rayonnement reçu par une surface :

*Rayonnement Direct*

$$\text{Horaire} \quad I_b = (I - I_d) (\cos \theta / \cos \theta_z)$$

$$\text{Journalier} \quad H_b = (H - H_d) \cdot R_b$$

$\theta$  - Angle d'incidence

$\theta_z$  - Angle zenithal

$h$  - Hauteur du soleil ( $h = \pi/2 - \theta_z$ )

$I$  - Flux Solaire Global Horizontal

$I_d$  - Flux Solaire Diffus

$I_b$  - Flux Solaire Direct, reçu par la surface

$I_s$  - Flux Solaire Diffus, reçu par la surface

$H$  - Flux cumulé sur la journée

*Calcul de  $R_b$*

$$R_b = \frac{\omega_s \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \sin^3 \omega_s}{\omega_s \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \sin \omega_s}$$

$R_b$  - Etant le rapport entre l'énergie reçue par une surface inclinée et l'énergie reçue sur une surface horizontale, hors atmosphère.

$\omega_s$  - Angle horaire du coucher du Soleil pour la surface horizontale [ rad ]

$\omega'_s$  - Angle horaire du coucher du Soleil pour la surface inclinée [ rad ]

$\delta$  - Déclinaison

$\varphi$  - Latitude

$\beta$  - Inclinaison de la surface

### *Rayonnement Réfléchi*

$$\Phi_{\text{Réfléchi}} = \rho_a (1 - \cos \beta) / 2 \quad \rho_a - \text{Etant l'Albédo}$$

La différence fondamentale entre les trois modèles apparaît au niveau du traitement du Rayonnement Diffus :

#### ( i ) Modèle Isotrope

$$I_s = I_d (1 + \cos \beta) / 2$$

$$H_s = H_d (1 + \cos \beta) / 2$$

#### ( ii ) Modèle Anisotrope de KLUCHER

Ce modèle considère le Diffus majoré par deux facteurs multiplicateurs, fonction de l'inclinaison, de l'angle zénithal, de l'angle d'incidence et du rapport entre le Flux Diffus Horizontal et le Flux Global Horizontal:

$$I_s = [ I_d (1 + \cos \beta) / 2 ] K_1 K_2$$

$$K_1 = 1 + F \sin^3(\beta / 2)$$

$$K_2 = 1 + F \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z$$

$$F = 1 - (I_d / I)^2$$

Du fait que  $\theta$  et  $\theta_z$  varient le long de la journée, la valeur journalière correspondante à cette valeur horaire ne peut être obtenue que par intégration discrète sur toute la journée.

$$H_s = \sum I_d K_1 K_2$$

Pour ciel couvert on aura  $F = 0$  et  $K_1 = K_2 = 1$  et on retrouve le modèle Isotrope.

( iii ) Modèle Anisotrope de HAY

Ce modèle considère le Flux Diffus décomposé en deux parties:

- Composante circum-solaire, à considérer comme s'il s'agissait du Flux Direct, ( proportionnelle au Coefficient d'Anisotropie [  $C_{an}$  ] )
- Composante Isotrope, en provenance du reste de la Voûte ( proportionnelle à [  $1 - C_{an}$  ] ).

$$C_{an} = \frac{(I - I_d)}{I_0} \quad \text{Coefficient d'Anisotropie}$$

Pour une surface inclinée:

$$I_s = C_{an} \frac{I_d}{\cos \theta_z} \cos \theta + (1 - C_{an}) I_d \frac{(1 + \cos \beta)}{2}$$

*Diffus " direct "                  Diffus Isotrope*

$I_s$  - Flux Diffus sur le plan incliné

$I$  - Flux Global Horizontal

$I_d$  - Flux Diffus Horizontal

$I_0$  - Extra-terrestre Horizontal

Si le ciel est couvert  $I = I_d$  ,  $C_{an} = 0$  et on retrouve le modèle isotrope.

**Exemple:**

Latitude	43 °
Inclinaison du capteur	45 °
Heure Solaire Vraie	12 h
Equinoxe de Mars	
Déclinaison	0 °
Angle Zénithal	43 °
Flux Global Horizontal	750 W/m <sup>2</sup>
Flux Diffus Horizontal	120 W/m <sup>2</sup>
Flux Extra-Terrestre sur le plan horizontal	989 W/m <sup>2</sup>
Albédo	0.2

$$C_{an} = (I - I_d) / I_0 = 0.637$$

Dans ces conditions les 120 W/m<sup>2</sup> de flux diffus sur l'horizontale, se répartissent en :

- 76.4 W/m<sup>2</sup> de Flux Diffus " Direct " ( Associé à la position du Soleil )
- 43.6 W/m<sup>2</sup> de Flux Diffus Isotrope

Les flux correspondants dans le plan du capteur sont:

- Flux associé à la position du Soleil

Flux Direct	860.9 W/m <sup>2</sup>
Flux Diffus Anisotrope	103.3 W/m <sup>2</sup>

- Flux Diffus Isotrope	964.2	36.8 W/m <sup>2</sup>
		<b>1001.0 W/m<sup>2</sup></b>
<b>Global Incliné</b>		
- Flux Réfléchi ( a = 0.2 )	22.0	W/m <sup>2</sup>
		<b>1023.0 W/m<sup>2</sup></b>
<b>Flux reçu par la surface</b>		

IQBAL [27] a comparé ces trois modèles et testé leur validité en calculant:

$$i ) RMSE = \{ \sum ( C_i - M_i )^2 / n \}^{1/2}$$

RMSE - " Root Mean SQUARE Error " , valeur toujours positive qui doit être la plus petite possible.

$C_i$  - Valeur calculée       $M_i$  - Valeur mesurée       $n$  - nombre de mesures

$$ii ) MBE = \{ \sum ( C_i - M_i ) \} / n$$

MBE - " Mean Bias Error " , donne une idée de la " sur " ou " sous " -estimation du modèle.

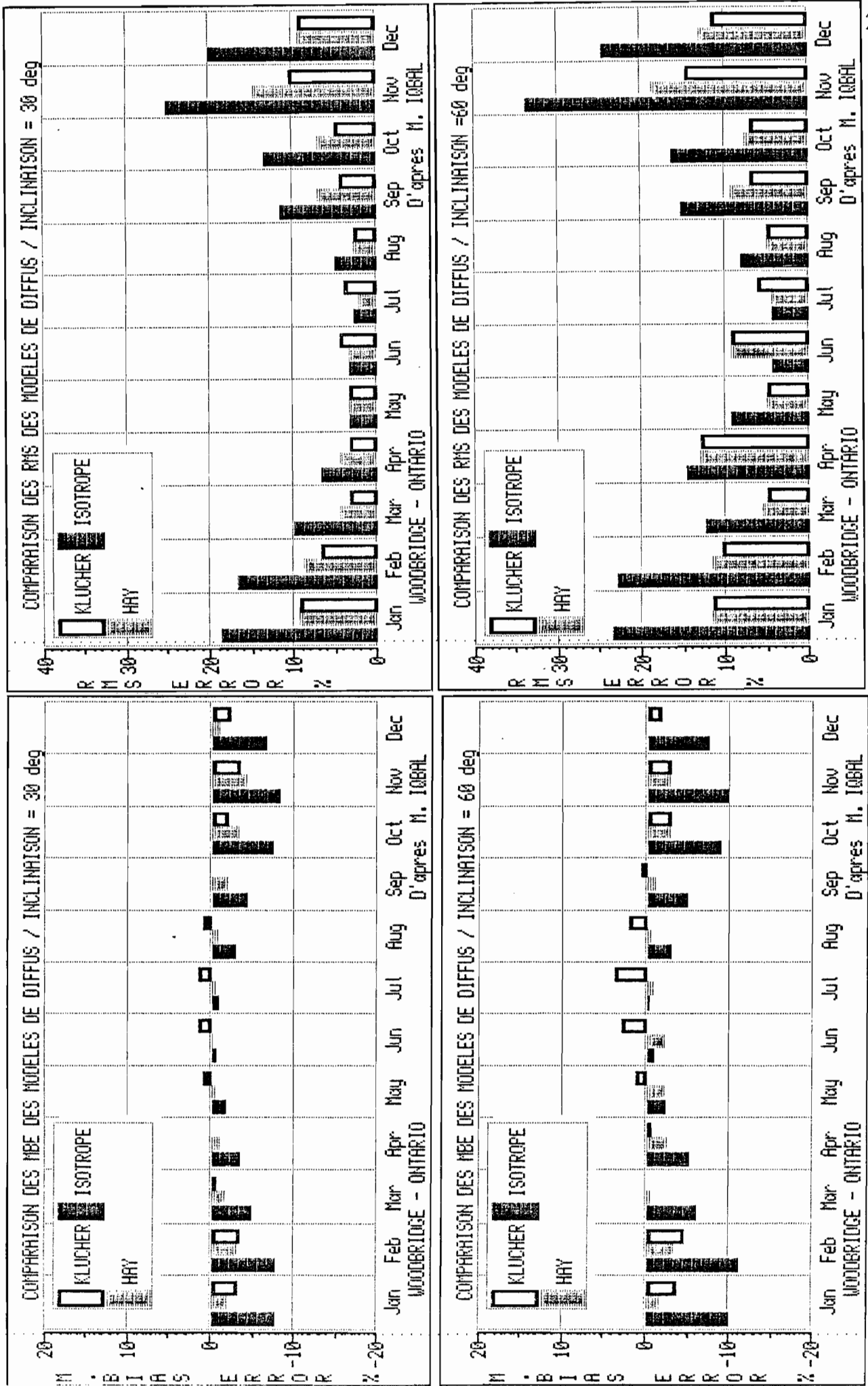


Figure 3 Diffus Anisotrope

## CONCLUSIONS

Avec les valeurs horaires intégrées, les RMSEs et les MBEs de ces trois modèles ont été calculées en pourcentage de la moyenne mesurée pour la période considérée.

Des résultats préliminaires indiquaient que les erreurs étaient plus importantes dans les périodes une heure après le lever et une heure avant le coucher du Soleil, que dans le reste de la journée.

L'étude a été reprise en négligeant ces deux périodes.

**RMSE** – Augmente avec l'augmentation de l'inclinaison.

- Indépendamment de l'inclinaison, les trois modèles donnent des valeurs assez proches en Eté.
- La divergence apparaît pendant les mois d'Hiver où les effets de la différence de paramétrisation deviennent plus importants.
- Les RMSEs du Modèle Isotrope atteignent presque 30% en Novembre.
  
- Les Modèles de Klucher et de Hay ont un comportement acceptable, ayant des écarts maxi de moins de 15%, pour des inclinaisons jusqu'à  $60^{\circ}$ , constituant de bonnes estimations pour des surfaces inclinées.

**MBE** – Le modèle Isotrope sous-estime presque toujours le Flux Diffus. Il le représente bien pendant l'Eté, mais relativement mal pendant le reste de l'année.

- Le modèle de KLUCHER sur-estime pendant l'Eté et sous-estime pendant l'Hiver .  
Il n'est pas utilisable pour des inclinaisons supérieures à  $60^{\circ}$ .

**On peut utiliser ces deux Modèles Anisotropes jusqu'à  $60^{\circ}$ , mais au delà il est préférable d'utiliser le modèle de HAY, que nous adopterons par la suite.**

## 2 - FLUX INFRA-ROUGE et TEMPERATURE RESULTANTE D'ENVIRONNEMENT

### RESUME

La notion de Température Résultante d'Environnement ( **TRE** ) permet de:

- Représenter l'environnement, tenant compte du Flux Infra-Rouge descendant, de la Vitesse du Vent et du Flux Solaire (  $0.3$  à  $2.5 \mu$  ).
- Remonter par un code de calcul simple, au Flux Infra-Rouge descendant.
- Transposer un essai d'un capteur en Ensoleillement Artificiel, aux conditions réelles extérieures.

Par ailleurs, le même code de calcul permet de calculer **TRE**, connaissant les flux solaire et infra-rouge descendant , la température ambiante convective et la vitesse du vent.

### 2.1 - POSITION DU PROBLEME

Si on essaie de caractériser des capteurs en ensoleillement naturel ou artificiel, on constate qu'il y a une grande dispersion des résultats et que, pour une même installation la reproductibilité n'est pas assurée.

Une des causes est le niveau de flux infra-rouge qui varie le long de l'année et d'une installation d'essai à une autre. Les normes existantes ferment les yeux sur ce problème en essayant tout de même de le minimiser, en imposant des seuils de flux infra-rouge à ne pas dépasser, quelques fois impossibles à atteindre, et en imposant aussi l'existence d'un simulateur de vent.

En climatisation, où les échanges thermiques sont du même type, pour représenter par une seule température les trois types d'échanges, radiatifs, convectifs et conductifs, MISSENARD [30] a développé le concept de **température résultante sèche**, comme étant la température d'équilibre d'une sonde placée dans une sphère à faible inertie ayant un diamètre de 95 mm.

Pour la climatisation, le but étant de définir des plages de confort pour le corps humain, Missenard a démontré expérimentalement que le comportement de cette sphère représente bien celui du corps humain.

Nous allons utiliser le même principe physique pour définir une température que nous appellerons la **température résultante d'environnement** ( **TRE** ), caractérisant l'environnement radiatif et convectif du capteur.

Nous ferons d'abord le bilan thermique d'un capteur, ceci nous permettant de comprendre le sens physique de cette température.

Ensuite nous verrons qu'il existe un dispositif très simple qui permettrait la mesure directe, de la TRE, s'il était idéal.

Ce dispositif est constitué d'un miroir, isolé face arrière, dont on mesure la température de l'argenteure.

Nous montrerons que le fait qu'il ne soit pas idéal nous permet tout de même d'effectuer un bilan thermique et de déterminer le flux infra-rouge descendant.

### 2.2 - BILAN THERMIQUE D' UN CAPTEUR

Considérons un capteur échantillon avec une seule vitre et un absorbeur noir mat, bien irrigué. Etant bien connues les propriétés optiques de l'absorbeur et de la couverture, faisons un bilan énergétique au niveau de la vitre et de l'absorbeur, tenant compte des réflexions multiples.

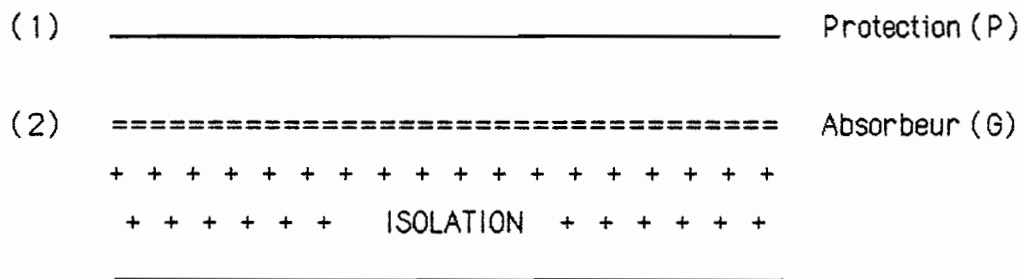


Figure 4 Schéma d'un capteur plan

En tenant compte des réflexions multiples nous pouvons déduire :

$$A_{TP} = (1 - \rho_p) \frac{1 - e^{-kL}}{1 - \rho_p e^{-kL}}$$

$$T_{TP} = e^{-kL} \frac{(1 - \rho_p)^2}{1 - e^{-2kL} \rho_p^2}$$

$$R_{TP} = R_p \frac{1 + (1 - \rho_p)^2 e^{-kL}}{1 - e^{-2kL} \rho_p^2}$$

$L$  - Epaisseur traversée [cm]  
 $k$  - Coefficient d'extinction [ $cm^{-1}$ ]  
 $\rho_p$  - Coefficient de Réflexion Simple  
 $R_{TP}$  - Coefficient de Réflexion Totale  
 $T_{TP}$  - Coefficient de Transmission Totale  
 $A_{TP}$  - Coefficient d'Absorption Totale

Les deux équations du bilan peuvent s'écrire:

- Pour la vitre:

$$(1) \quad A_{TP} \phi_U + \alpha_P \phi_{IR} - \epsilon_P \sigma T_P^4 - h_{AV} (T_P - T_{AV}) + \epsilon_{PG} \sigma (T_G^4 - T_P^4) + h_{PG} (T_G - T_P) = 0$$

- Pour l'absorbeur:

$$(2) \quad T_{TP} \alpha_G \phi_U - \epsilon_{PG} \sigma (T_G^4 - T_P^4) - h_{PG} (T_G - T_P) - K_{AR} (T_G - T_{AR}) = Q_{ext}$$

Les indices utilisés: (P) Vitre de protection (G) Absorbeur

- $\epsilon_{PG}$  - Emissivité de la protection vers l'absorbeur
- $\alpha_P$  - Absorbance hémisphérique de la vitre entre 3 et 50  $\mu$
- $\alpha_G$  - Absorbance hémisphérique de l'argenture entre 0.25 et 2.5  $\mu$
- $\phi_U$  - Flux Solaire
- $\phi_{IR}$  - Flux Infra-Rouge descendant
- $h_{PG}$  - Coefficient de pertes de l'absorbeur vers la protection
- $K_{AR}$  - Coefficient d'échange par l'arrière du capteur
- $T_{AV}$  - Température avant
- $T_{AR}$  - Température arrière

En faisant la somme des équations (1) et (2), nous pouvons expliciter  $Q_{EXT}$

$$Q_{EXT} = (A_{TP} + T_{TP} \alpha_G) \phi_U + \alpha_P \phi_{IR} - \epsilon_P \sigma (T_P^4 - T_R^4) - h_{AV} (T_P - T_{AV}) - K_{AR} (T_G - T_{AR})$$

Dans ce modèle on néglige l'absorption par la vitre des rayons réfléchis par l'absorbeur.

Considérant qu'il y a une température responsable des pertes radiatives, nous pouvons écrire:

$$Q_{EXT} = (A_{TP} + T_{TP} \alpha_G) \phi_U - \epsilon_{PG} \sigma (T_P^4 - T_R^4) - h_{AV} (T_P - T_{AV}) - K_{AR} (T_G - T_{AR})$$

### 2.3 – TEMPERATURE RESULTANTE D' ENVIRONNEMENT

Considérons maintenant une température fictive, qu'on appellera Température Résultante d'Environnement ( TRE ). Cette température sera la température d'une chambre climatisée (Air et parois à la même température) de telle sorte qu'un capteur ait les mêmes pertes pour la même température moyenne du fluide et pour le même flux solaire.

Dans ce cas on aura:

$$K_{AR} (T_G - T_{AR}) + \epsilon_{PC} \sigma (T_P^4 - T_R^4) + h_{AV} (T_P - T_{AV}) = K_e (T_G - TRE)$$

$K_e$  - Coefficient de transmission ( par degré de différence entre la température moyenne de l'absorbeur et la Température Résultante d'Environnement )

$T_G$  - Température de l'absorbeur

Pour un capteur réel, l'irrigation n'étant pas parfaite, nous aurons donc:

$$Q_{EXT} = F' [(A_{TP} + \alpha_G T_P) \phi_U - K_e (T_{MF} - TRE)]$$

$T_{MF}$  - Moyenne entre les températures d'entrée et de sortie

Si on considère que  $K_e$  a une dépendance linéaire avec (  $T_{MF} - TRE$  ) :

$$K_e = k_{e0} + K_{e1} (T_{MF} - TRE) \quad \text{sachant que} \quad \eta = Q_{EXT} / \phi_U$$

$$\eta = F' (A_{TP} + \alpha_G T_P) - F' k_{e0} \frac{(T_{MF} - TRE)}{\phi_U} - F' K_{e1} \phi_U \frac{(T_{MF} - TRE)^2}{\phi_U^2}$$

Pour les gammes de température d'utilisation, beaucoup de capteurs ont un comportement pratiquement linéaire:

$$\eta = F' (A_{TP} + \alpha_G T_P) - F' k_{e0} \frac{(T_{MF} - TRE)}{\phi_U}$$

D'autre part nous savons que  $Q_{EXT} = \dot{m} C_p \Delta T_{COL}$

Nous pouvons donc évaluer le rendement instantané du capteur en mesurant :

$$T_E ; T_S ; \dot{m}_{COL} \quad \text{ou} \quad \dot{m}_{COL} \cdot C_p$$

Considérons à nouveau la chambre climatique et faisons un essai de pertes ( sans Rayonnement Solaire ) en imposant différentes températures moyennes du fluide.

Nous pouvons donc définir un tableau de pertes à deux entrées:

$$T_{RE} = T_{PAROIS} = T_{AR} \quad \text{et} \quad T_{MF} = \text{Température Moyenne du fluide}$$

Si on installe le capteur échantillon à coté du capteur qu'on veut tester , nous pouvons faire en même temps le test du capteur et le bilan thermique du capteur-échantillon.

Les pertes du capteur échantillon seront :

$$P = P_U - Q_{EXT} \quad (\text{ par unité de surface } )$$

$P_U$  - Puissance acceptée

$Q_{EXT}$  - Puissance extraite

Nous reprenons le tableau de pertes défini au préalable dans la chambre climatique, et nous pouvons ainsi déterminer quelle serait la température de chambre qui provoquerait les mêmes pertes.

Nous venons de définir le sens physique de la Température Résultante d'Environnement ( **TRE** ) et nous nous proposons d'examiner de la substituer à la température ambiante pour la détermination de courbe de Rendement Instantané du capteur.

Il y a une certaine analogie entre cette température et la température Résultante Sèche utilisée en Air Conditionné.

### **Conclusion:**

Bien qu'intéressante pour la compréhension du sens physique de la Température Résultante d'Environnement, cette méthode nous obligerait à avoir un mini capteur bien irrigué, un mini-circuit hydraulique, et ceci serait difficile à réaliser et à utiliser car la mesure de très petits débits est difficile pour avoir une précision acceptable.

DEVIN [31] a proposé un appareil permettant de mesurer cette Température Résultante d'Environnement d' une façon plus simple.

## 2.4 - CAPTEUR DE TEMPERATURE RESULTANTE D'ENVIRONNEMENT TRE

### 2.4.1 PREAMBULE

D'après les idées présentées par DEVIN [31], nous avons construit et testé dans diverses conditions, un capteur **TRE**.

Ce capteur, dont on présente un schéma ci-contre, est constitué d'un miroir très fin, isolé face arrière ayant une sonde qui permet la mesure de la température de l'argenteure.

Avant de décrire en détail la réalisation de ce capteur, nous allons développer les modèles d'un capteur idéal et d'un capteur réel.

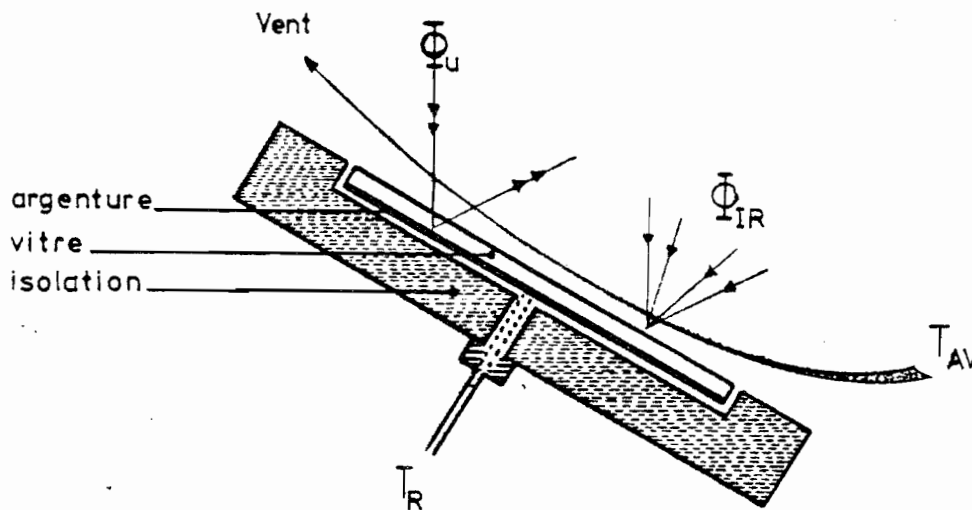


Figure 5 Capteur TRE ( Extrait de [31] )

### 2.4.2 MODELE IDEAL

L'équation du bilan d'un miroir isolé face arrière peut s'écrire:

$$(2) \quad h_{AV} (T_{AR} - T_P) + \alpha_P \Phi_{IR} - \epsilon_P \sigma T_P^4 + A_{TP} \Phi_S + W = 0$$

$W$  - flux thermique en provenance de l'arrière

$T_{AR}$  - Température convective de l'air

$A_{TP}$  - Coefficient d'absorption de la vitre ( de 0.25 à 2.5  $\mu$  )

Hypothèses

DEVIN a considéré un miroir idéal c.a.d. un miroir non influencé par le flux solaire et dans lequel il n'y aurait pas de flux thermique entre l'arrière et l'avant :

$$- A_p \phi_S \approx 0$$

$$- W = 0 \quad \text{ce qui implique} \quad T_p = T_{RE} \quad T_{RE} \text{ étant la température de la face arrière}$$

$$h_{AV} (T_{AR} - T_{RE}) + \alpha_p \phi_{IR} - \epsilon_p \sigma T_{RE}^4 = 0$$

Avec ces hypothèses on obtient l'équation qui permet le calcul de  $T_{RE}$

$$\alpha_p \phi_{IR} + h_{AV} T_{AV} = \epsilon_p \sigma T_{RE}^4 + h_{AV} T_{RE}$$

Voyons maintenant l'utilité de cette température ainsi définie:

Si à un capteur on impose une température moyenne du fluide telle que les pertes soient nulles, nous pourrions dire que l'absorbeur et la protection sont à la même température.

Si on considère un environnement fictif où l'air et l'environnement sont à la même température de telle sorte que les pertes soient nulles, nous aurons défini ainsi la Température Résultante d'Environnement, qui sera donc:

$$T_{RE} = T_{MF} = T_p$$

DEVIN a montré que la température moyenne pour laquelle les pertes sont nulles, est la température d'équilibre de l'argenteure d'un miroir idéal, isolé face arrière.

Ceci correspond à la Température Résultante d'Environnement de la Chambre Climatique, que nous avons déjà définie.

Comme miroir idéal il faut entendre, un miroir parfaitement transparent au rayonnement solaire et une argenteure parfaitement réfléchissante à ce même rayonnement.

Dans ces conditions nous pouvons corréler  $T_{AV}$  ;  $\phi_{IR}$  et  $T_{RE}$ .

DEVIN a démontré que dans ces conditions il était possible d'obtenir, dans un espace  $T_{AV}$  ;  $\phi_{IR}$ , une famille de droites parallèles, paramétrisées en  $T_{RE}$ , dont la pente est de  $-\epsilon_p/h_{AV}$  (Fig 6).

Si la vitesse du Vent augmente ( $h_{AV}$  est supposé avoir une dépendance linéaire avec la Vitesse du Vent), la pente tend vers zéro et il existe un lieu géométrique des points autour desquels pivote cette famille de droites ( $T_{RE} = T_{AV}$ ).

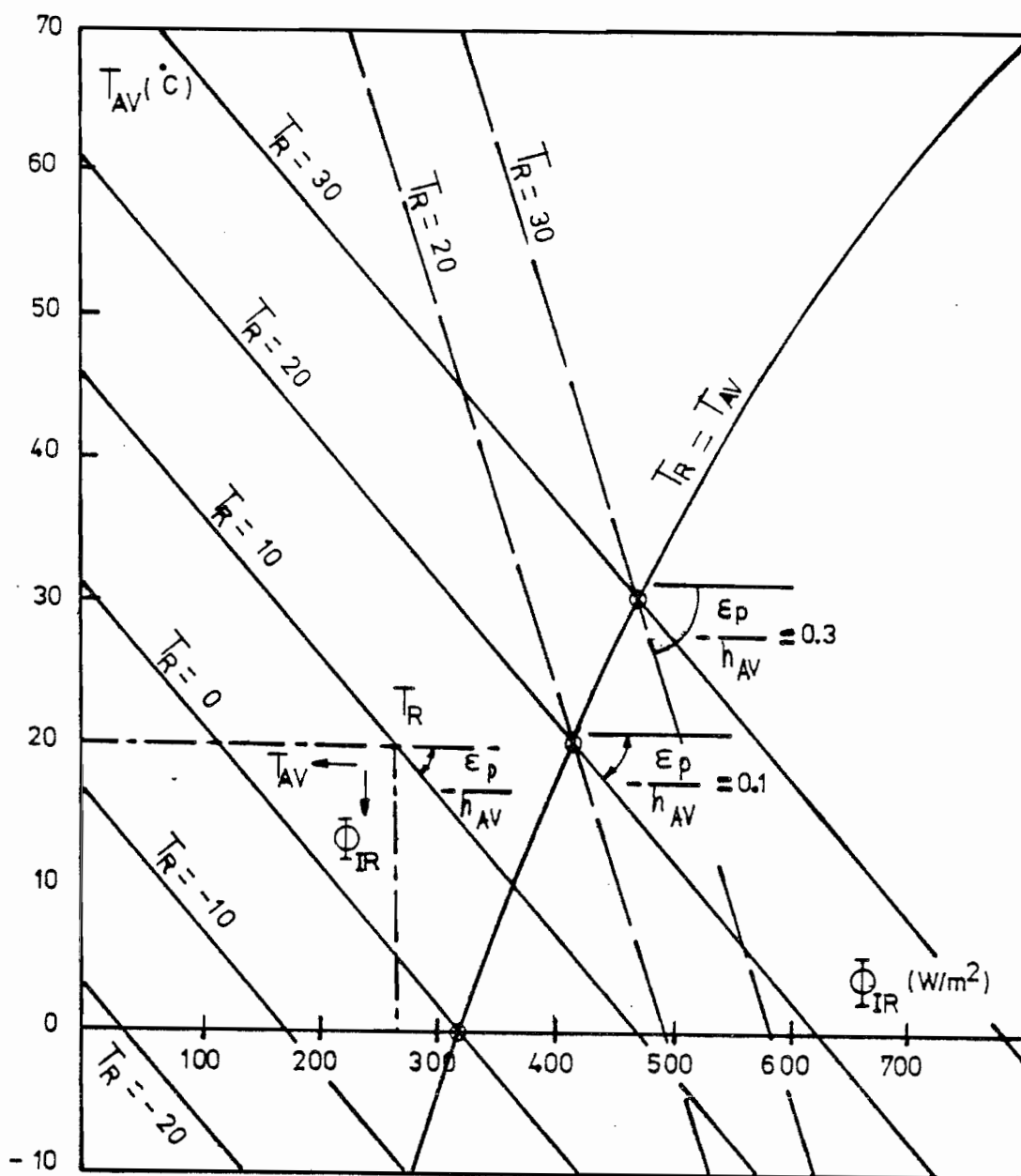


Figure 6 *Température résultante d'environnement*  
*Modèle idéal ( Extrait de [31] )*

2.4.3 - MODELE REEL

Nous avons envisagé un miroir réel où l'influence de l'absorption du flux solaire, ne pouvant pas être nulle, est minimisée.

Le terme  $A_p \Phi_S$  constituera un terme source et on considèrera comme étant nul le flux de l'argenture vers l'isolant mais on ne confondra pas la température de l'argenture (TRE) et la température de la face avant.

Pour que que le miroir se rapproche du miroir idéal il faudra avoir une faible épaisseur et nous avons choisi un verre de 0.45 mm.

Les épaisseurs plus faibles , en plus de leur fragilité, ont l'inconvénient de devenir transparents à une partie non négligeable du flux infra-rouge descendant.

Le miroir utilisé a comme caractéristiques:

$\rho_m$	= 0.95	Coefficient de Réflexion de l'argenture
$K$	= $0.1 \text{ cm}^{-1}$	Coefficient d'extinction
$n$	= 1.52	Indice de Réfraction
$\rho_p$	= 0.04	Coefficient de Réflexion du verre en incidence normale
$e_p$	= 0.045 cm	Epaisseur
$\lambda_c$	= $4 \mu$	Longueur d'onde de coupure

2.4.3.1 - BILAN ENERGETIQUE

Voyons d'abord l'effet des reflexions multiples, sur les énergies absorbée et réfléchie par le miroir.

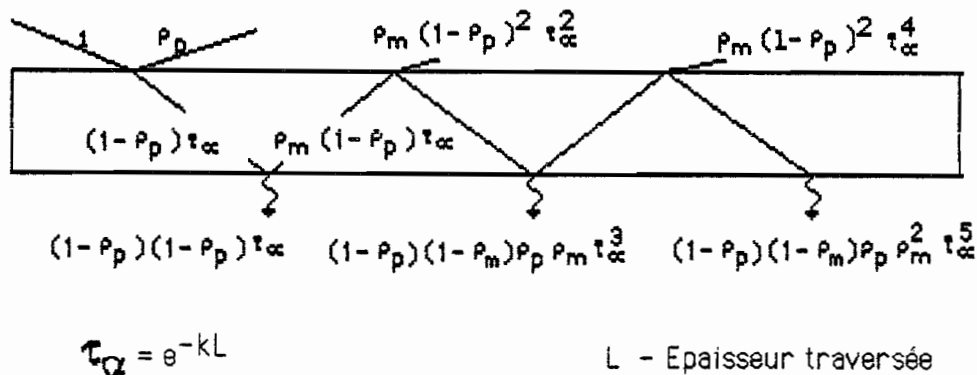


Figure 7 Réflexions multiples

$$R_{Pm} = \rho_p + \frac{\rho_m (1 - \rho_p)^2 \tau_\alpha^2}{1 - \tau_\alpha^2 \rho_m \rho_p} \quad \text{Coeff. Réflexion totale ( Verre + métal )}$$

$$A_m = \frac{\tau_\alpha (1 - \rho_p) (1 - \rho_m)}{1 - \tau_\alpha^2 \rho_m \rho_p} \quad \text{Coefficient d'absorption totale de argenture}$$

$$A_p = 1 - R_{Pm} - A_m \quad \text{Coeff. d'absorption totale dans la vitre}$$

Nous pouvons écrire maintenant les équations du bilan, à deux niveaux:

(1) - Argenture

(2) - Face Avant

$$(1) \quad \phi_S A_m - \frac{\lambda_p}{L} (T_{RE} - T_p) + f A_p \phi_S = 0$$

$$(2) \quad \frac{\lambda_p}{L} (T_{RE} - T_p) + h_{AV} (T_{AR} - T_p) + \alpha_p \phi_{IR} - \epsilon_p \sigma T_p^4 + (1-f) A_v \phi_S = 0$$

$\phi_S$  - Flux Solaire

$\phi_{IR}$  - Flux Infra-Rouge

$\lambda_p$  - Conductibilité thermique du verre

$\alpha_p$  - Coefficient d'absorption du verre (2.5 à 50  $\mu$ )

$\epsilon_p$  - Coefficient d'émission du Verre

$T_{RE}$  - Température Résultante d'Environnement

$T_p$  - Température de la face avant

$T_{AR}$  - Température de l'air

$f$  - fraction du Rayonnement absorbé qui part vers la face arrière.

Ce système d'équations permet le calcul du flux de Rayonnement Infra-Rouge qui équilibre le bilan, indépendamment de la valeur supposée pour  $f$ .

Connaissant le Flux Solaire , la Température Ambiante et la Vitesse du Vent, il est maintenant possible de calculer la température qui serait atteinte si le miroir était idéal.

Comme première approche nous admettons que  $f = 0.5$  .

Nous avons tracé différentes familles de droites de TRE, ayant fixé pour chaque graphique, le Flux Solaire et la Vitesse du Vent.

Nous avons constaté que ces familles de droites sont tout à fait semblables à celles que DEVIN a obtenues, mais pour le miroir réel la pente n'est plus égale à  $-E_p / h_{AR}$  .

D'autre part, nous avons considéré le coefficient de pertes  $h_{AR}$  , ayant une dépendance avec le  $\Delta T$  .

Selon SIEGEL & HOWELL , [28], il est possible de confirmer que le terme de Convection naturelle est proportionnel à  $\Delta T^{0.25}$ , étant donné que les dimensions caractéristiques du CAPTEUR TRE conduisent à des régimes laminaires .

MacAdams [35] avait proposé pour le coefficient d'échange  $h_{AY} = 5.7 + 3.8 Ve$

WATMUFF [39] a critiqué cette expression parce qu'elle contient aussi les échanges radiatifs et il a proposé une nouvelle expression  $h_{AY} = 2.8 + 3 Ve$

P. GALLET [29] a suggéré deux expressions pour les coefficients de pertes avec une dépendance de  $\Delta T$  :

$$h_{AY} = 2.25 \Delta T^{0.25} + 3 Ve \quad \text{si le Flux est ascendant}$$

$$h_{AY} = 1.25 \Delta T^{0.25} + 3 Ve \quad \text{si le Flux est descendant}$$

## TEMPERATURE RESULTANTE D' ENVIRONNEMENT

### VARIABLES CONNUES

$\phi_{IR}$      $T_{AMB}$      $\phi_S$      $V.Vent$

$\phi_{IR} = 535 \text{ W/m}^2$

$T_{AMB} = 290 \text{ K}$

$V.Vent = 0 \text{ m/s}$

$\phi_S = 800 \text{ W/m}^2$

**Paramètre de l'abaque**

**Paramètre de l'abaque**

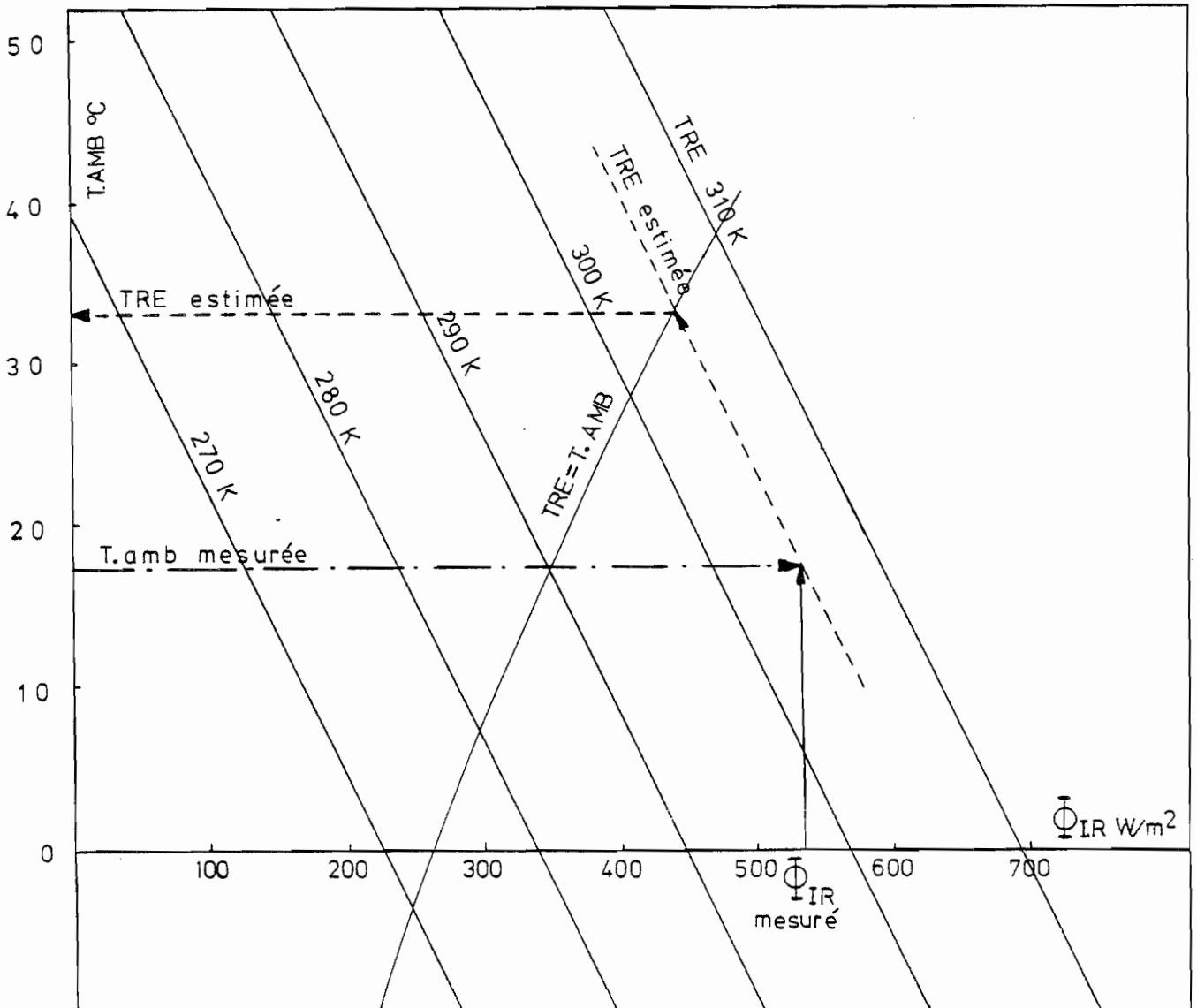


Figure 8 *Température résultante d'environnement - Modèle réel*

## TEMPERATURE RESULTANTE D' ENVIRONNEMENT

### VARIABLES CONNUES

$T_{RE}$      $T_{AMB}$      $\phi_S$      $V.Vent$

$T_{RE} = 305 \text{ K}$

$T_{AMB} = 290 \text{ K}$

$V.Vent = 0 \text{ m/s}$

$\phi_S = 800 \text{ W/m}^2$

Paramètre de l'abaque

Paramètre de l'abaque

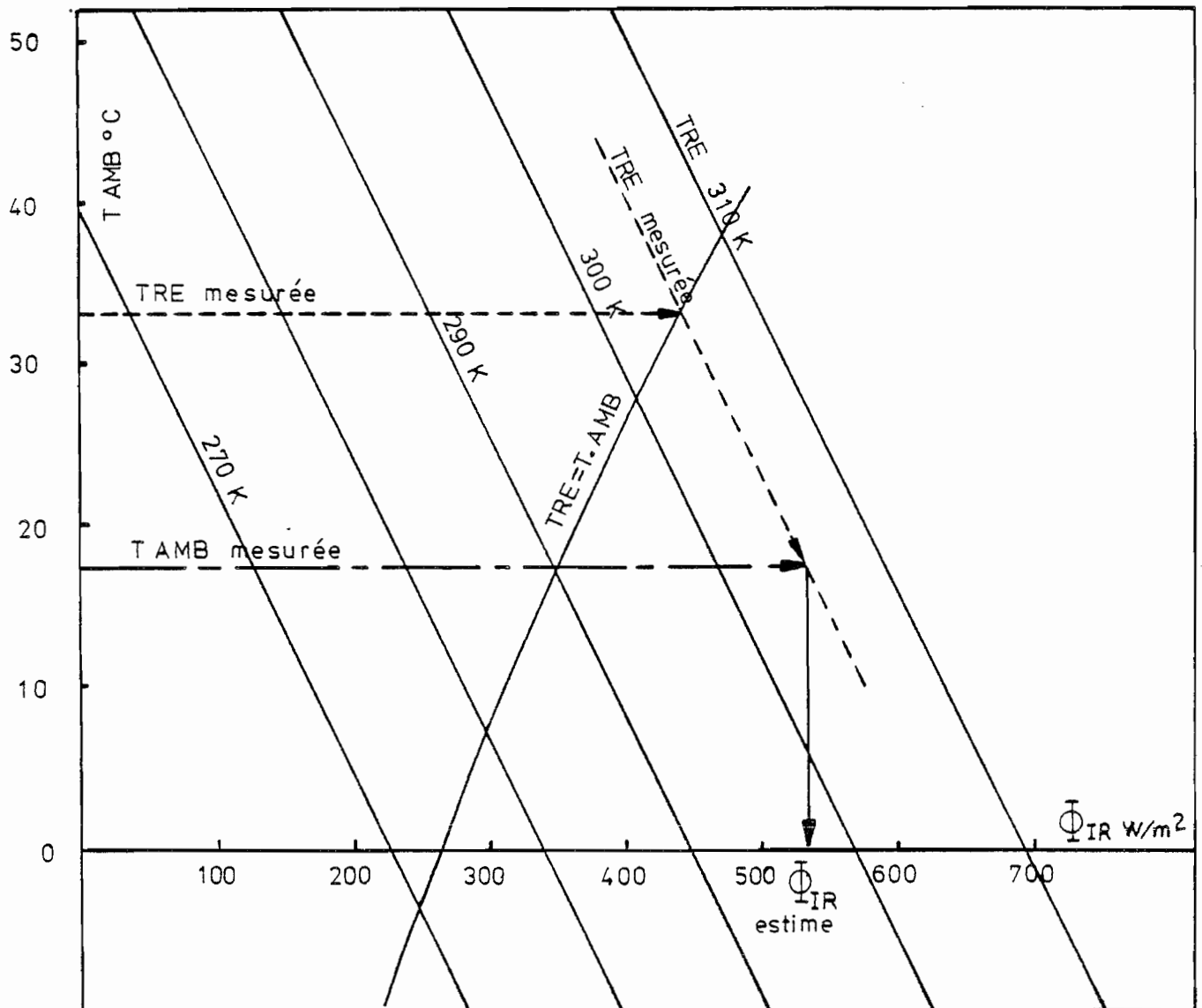


Figure 9 *Température résultante d'environnement - Modèle réel*

## CONCLUSIONS

1 - Cette représentation permet :

- la détermination de TRE connaissant  $T_{AR}$ ,  $\phi_S$ ,  $\phi_{IR}$  et  $Ve$
- la détermination de  $\phi_{IR}$  connaissant TRE,  $T_{AR}$ ,  $\phi_S$  et  $Ve$

2 - Quand la vitesse du vent augmente, les droites pivotent autour du point d'intersection avec la courbe qui est le lieu géométrique des points où  $TRE = T_{AR}$ , ceci impliquant que quand la vitesse du vent augmente, TRE tend vers  $T_{AR}$  (les échanges convectifs deviennent prépondérants).

3 - Pour chaque température ambiante il existe un flux Infra-Rouge pour lequel  $TRE = T_{AR}$ , indépendamment de la vitesse du vent, par exemple si  $\phi_S = 800 \text{ W/m}^2$

$T_{AR}$ [K]	273	283	293	303
$\phi_{IR}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	270	315	370	430

De ce fait on peut graduer la courbe où  $TRE = T_{AR}$  en  $T_{AR}$ .

Les pertes radiatives seront égales à l'énergie absorbée par le miroir.

### 2.4.3.2 - REALISATION DU CAPTEUR TRE

Après la réalisation d'un prototype, il y a eu la décision de faire une pré-série de capteurs TRE.

B. VERDIER [32] a préparé un cahier de charges pour l'appel d'offre.

#### Description

L'appareil se compose d'un miroir fin et d'une sonde de température, l'ensemble se trouvant dans un boîtier contenant un isolant thermique.

Une embase électrique de raccordement à une électronique extérieure est située sur le côté de l'appareil. Le boîtier doit avoir une faible inertie et une parfaite étanchéité à l'eau.

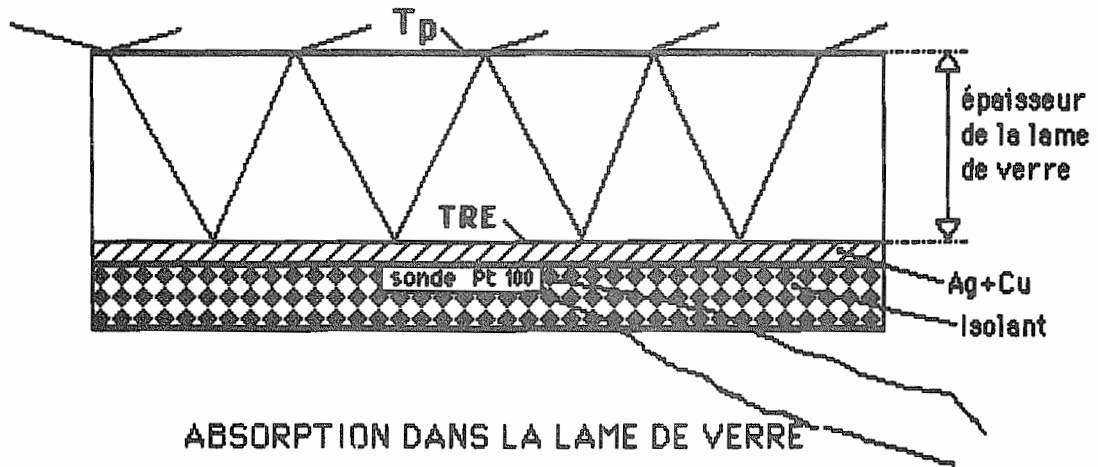


Figure 10 Schéma du capteur TRE

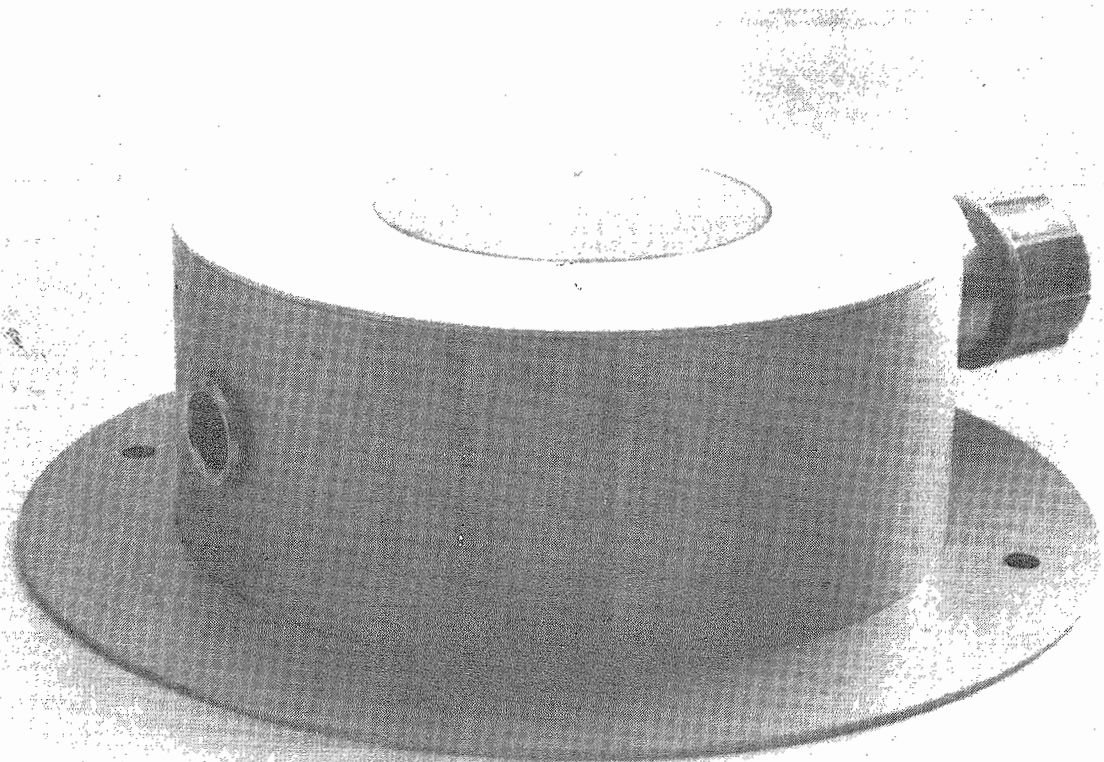


Figure 11 Photographie du capteur TRE

### Lame de Verre

La lame a une épaisseur de  $0.045 \pm 0.005$  cm ( type verre de microscope ) et doit avoir une teneur en  $Fe_2O_3$  suffisamment basse pour obtenir un coefficient d'extinction  $k \leq 0.24 \text{ cm}^{-1}$

La coupure du rayonnement doit intervenir pour une longueur d'onde comprise entre 2.5 et 4  $\mu$  et doit être totale pour des longueurs d'onde supérieures à 4 $\mu$  .

La miroir est un disque de 50 mm de diamètre.

### Argenture

Le dépôt d'argenture doit être uniforme et l'épaisseur du film d'argent doit être tel qu'on ait une transmission très voisine de zéro à travers le miroir ainsi obtenu.

Le coefficient de réflexion moyenne pondérée sur le spectre solaire , doit être supérieur ou égal à 0.95 .

Le vernis ne doit pas être mis lors du dépôt de cuivre sur l'argenture, mais seulement après le collage de la sonde.

### Sonde de Température

La sonde est une sonde à résistance plate , Cuproswem, ( 6 x 12 x 0.7 mm).

Cette sonde doit être collée sur le cuivre avec une colle conductrice thermique, l'épaisseur de colle étant inférieure à 0.3 mm .

Le vernissage, avec un vernis ordinaire de miroitier , est fait après ce collage.

Les trois fils de la sonde sont raccordés à l'embase électrique.

### Isolant

L' isolant est de la mousse de polyuréthane injectée et remplit tout le boîtier.

### Boîtier

Le boîtier , en aluminium , doit être parfaitement étanche autour de la lame de verre.

### 2.4.3.3 - COMPARAISON AU PYRGEOMETRE

Pour tester le modèle mathématique et aussi le dispositif, nous avons d'abord comparé le Flux Infra-Rouge calculé, avec l'Infra-Rouge mesuré par un Pyrgéomètre.

Le Pyrgéomètre a été conçu pour mesurer l'Infra-Rouge descendant, pendant la nuit. Pour pouvoir être utilisé pendant la journée il faudrait que sa coupole soit complètement réfléchissante pour le Rayonnement Solaire (  $0.25$  à  $2.5 \mu$  ), ce qui n'est pas le cas.

Pour minimiser ce problème, les Pyrgéomètres ont normalement deux circuits électroniques de compensation, alimentés par une batterie.

Nous avons constaté que cette compensation est loin d'être parfaite et que les valeurs mesurées par le Pyrgéomètre, pendant la période diurne, sont fausses.

Nous avons installé un **capteur TRE** et un Pyrgéomètre à la Station Météorologique de la Plateforme d'essais de Cadarache, reliés au Système d'acquisition.

Le **capteur TRE** a un coefficient d'émission très élevé (  $0.88$  ), et pendant la nuit atteint facilement le point de rosée, voire de givre, ce qui fausse les mesures.

Il a fallu compléter cet étalonnage par un montage de laboratoire semblable à celui utilisé pour l'étalonnage des Pyrgéomètres et que nous allons décrire.

### 2.4.3.4 - CARACTERISATION OPTIQUE D'UN MIROIR

Pour le modèle mathématique utilisé nous avons besoin de connaître les propriétés optiques du miroir:

- le Coefficient de Transmission du verre sans argenture de  $0.18$  à  $2.5 \mu$
- le Coefficient de Réflexion Totale du miroir de  $0.18$  à  $2.5 \mu$
- la Longueur d'Onde de Coupure qui doit se situer entre  $3$  et  $4 \mu$ , pour que l'hypothèse d'opacité au Rayonnement Infra-Rouge soit valable ( réalisé au Département d'Héliophysique de l'Université de Provence ).

Les deux coefficients ont été mesurés avec un spectro-photomètre Perkin-Elmer.

Nous avons établi au Chapitre II 1.3.1.2, les relations:

$$R_{pm} = \rho_p + \frac{\rho_m(1 - \rho_p)^2 \tau_\alpha^2}{1 - \tau_\alpha^2 \rho_m \rho_p} \quad \text{Coeff. Réflexion totale ( Verre + Métal )}$$

$$A_m = \frac{\tau_\alpha(1 - \rho_p)(1 - \rho_m)}{1 - \tau_\alpha^2 \rho_m \rho_p} \quad \text{Coeff. d'absorption totale dans l' argentine}$$

$$A_p = 1 - R_{pm} - A_m \quad \text{Coeff. d'absorption totale ( dans l' épaisseur de la vitre )}$$

$$T_p = \tau_\alpha \frac{(1 - \rho_p)^2}{1 - \tau_\alpha^2 \rho_p^2} \quad \text{Coeff. de transmission totale ( vitre sans argentine )}$$

Avec le Spectro-Photomètre nous avons déterminé la réflexion spectrale du miroir et le Coefficient de Reflexion Totale a été obtenu par pondération avec un spectre de corps noir à 5800 K.

Nous avons retiré l'argentine sur la partie centrale du miroir et nous avons calculé le Coefficient de transmission Total en pondérant par le même Spectre.

Nous avons obtenu ainsi un système de deux équations à deux inconnues:

$$(1) \quad T_p = \tau_\alpha \frac{(1 - \rho_p)^2}{1 - \tau_\alpha^2 \rho_p^2} = 0.86$$

$$(2) \quad R_{pm} = \rho_p + \frac{\rho_m(1 - \rho_p)^2 \tau_\alpha^2}{1 - \tau_\alpha^2 \rho_m \rho_p} = 0.838$$

Avec ces deux équations et sachant que pour les petites incidences on a:

$$\rho_p = (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2 = 0.04$$

nous obtenons

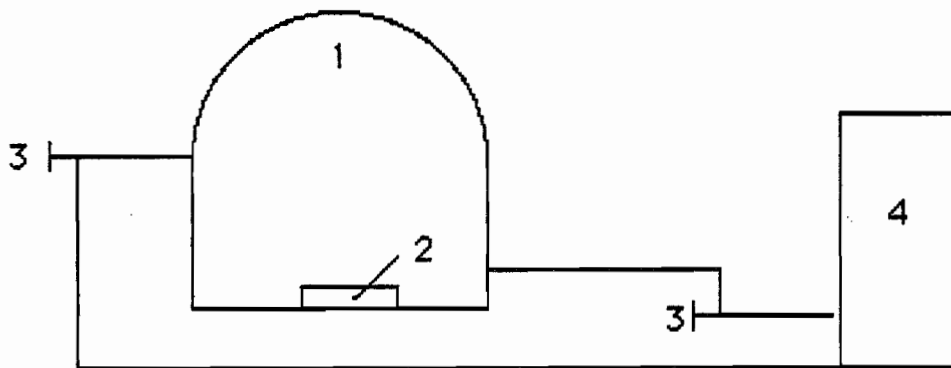
$$\begin{array}{l} \tau_\alpha = 0.932 \\ \text{et} \quad \rho_m = 0.963 \\ \text{et finalement} \quad k = 0.226 \text{ cm}^{-1} \end{array}$$

### 2.4.3.5 - ETALONNAGE DU PYRGEOMETRE ET DU CAPTEUR TRE

L'étalonnage par comparaison directe en environnement extérieur du capteur TRE , par rapport à un pyrgéomètre, s'avère délicat à cause de phénomènes parasites de condensation nocturne sur la surface froide du miroir.

Etant données ces difficultés nous avons préféré un étalonnage indirect avec une cloche thermostatée parcourue par un fluide ayant un fort débit.

La justification théorique de ce montage vient du fait qu'on peut l'assimiler à une cavité.



- 1 - Cloche thermostatée opaque
- 2 - Capteur TRE / Pyrgéomètre
- 3 - Sondes de Température
- 4 - Bain Thermostaté

**Figure 12** Montage pour l'étalonnage du TRE

La coupole du Pyrgéomètre EPPLEY est transparente au Rayonnement Infra-Rouge entre 4 et 50  $\mu$ . Ceci permet d'assimiler ce montage de laboratoire à une cavité avec une surface interne de 180  $\text{cm}^2$  ayant une ouverture de 1  $\text{cm}^2$  ( surface de l'élément sensible du Pyrgéomètre).

#### **Emissivité d'une cavité**

Pour pouvoir déduire le coefficient d'émission de la cavité par rapport à son ouverture , connaissant le coefficient d'émission de la paroi interne , nous allons supposer que par l'ouverture rentre un rayon unitaire ( Fig 13), dont nous allons quantifier les absorptions et réflexions successives.

En faisant la somme des énergies absorbées nous calculons la fraction de l'énergie incidente qui est absorbée par la cavité.

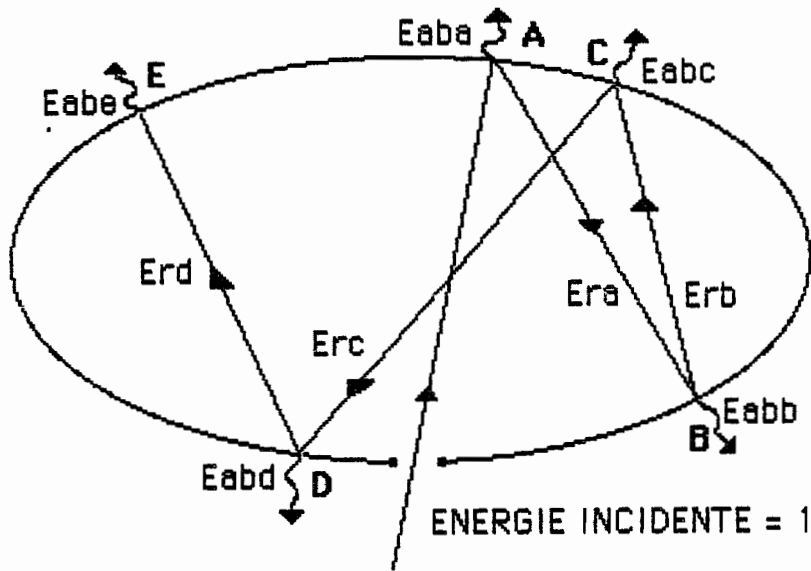


Figure 13 Cavité

Energies Réfléchies ( en A , B , C , ... )

$$\begin{aligned} E_{ra} &= ( 1 - \alpha_p ) F_{pp} \\ E_{rb} &= ( 1 - \alpha_p )^2 F_{pp}^2 \\ E_{rc} &= ( 1 - \alpha_p )^3 F_{pp}^3 \end{aligned}$$

Energies Absorb es ( en A , B , C , ... )

$$\begin{aligned} E_{aba} &= \alpha_p \\ E_{abb} &= \alpha_p ( 1 - \alpha_p ) F_{pp} \\ E_{abc} &= \alpha_p ( 1 - \alpha_p )^2 F_{pp}^2 \end{aligned}$$

$\alpha_p$  = Coefficient d'absorption de la paroi interne

$F_{pp}$  = Facteur de Forme de la paroi sur elle même

$$\Sigma \text{ En Absorb e} = \alpha_c = \alpha_p = ( 1 + ( 1 - \alpha_p ) F_{pp} + ( 1 - \alpha_p )^2 F_{pp}^2 + \dots )$$

donc

$$\alpha_c = \frac{\alpha_p}{1 - ( 1 - \alpha_p ) F_{pp}}$$

mais nous savons que :

$$F_{pp} + F_{pc} = 1 \qquad A_p F_{pc} = A_c F_{cp} \qquad \text{et que } F_{cp} = 1$$

alors  $F_{pC} = A_C / A_p$   $F_{pp} = (1 - A_C / A_p)$

Nous obtenons finalement

$$\epsilon_p = \frac{\alpha_p}{1 - (1 - \alpha_p)(1 - A_C/A_p)} = \frac{\alpha_p A_p}{A_C(1 - \alpha_p) + \alpha_p A_p}$$

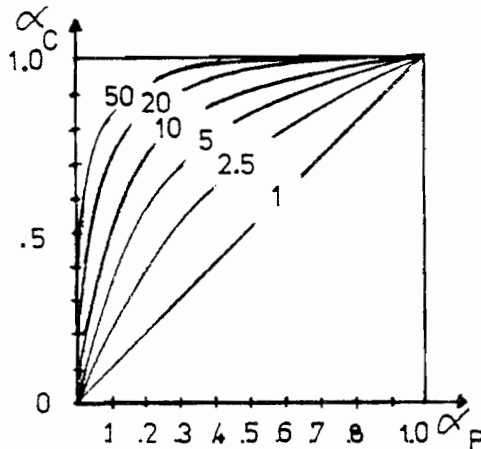


Figure 14 Variation de  $\alpha_c$  avec  $\alpha_p$   
( Paramètre  $A_p / A_c$  )

Dans notre cas  $A_p / A_c = 180$  et  $\alpha_p = 0.85$  et nous avons donc  $\alpha_c = 0.999 \approx 1$

Cette cavité se comporte comme un corps noir et ainsi  $\epsilon_c = \alpha_c = 1$ , indépendamment de l'émissivité de la paroi interne de la cavité, pourvu que  $A_p \gg A_c$

**Résultats des étalonnages**

**A - PYRGEOMETRE**

Le tableau ci-dessous montre les valeurs mesurées du coefficient d'étalonnage du pyrgéomètre :

**ETALONNAGE DU PYRGEOMETRE ( EPPLEY KRS5)**

TEMP. de CLOCHE [ °C ]	$\phi_{IR} = \sigma T^4$ [ W/ m <sup>2</sup> ]	$\Delta V$ [ μV ]	$C^{TE} = \Delta V / \phi_{IR}$ [ μV m <sup>2</sup> / W ]
4.80	337.69	1540	4.56
14.29	386.25	1760	4.56
23.96	440.94	2010	4.56
35.89	516.18	2360	4.57

Pour ce pyrogéomètre la constante était de  $4.29 \mu\text{V m}^2/\text{W}$  et il y a eu une évolution des caractéristiques de l'appareil qui peut être due soit au vieillissement du revêtement de la coupole ou du détecteur, soit de modifications des deux circuits électroniques de compensation (la batterie a été vérifiée), la différence étant de l'ordre de 6 %.

### B - CAPTEUR TRE

Nous avons alors mis le capteur TRE dans la cloche thermostatée et nous avons refait une série de mesures pour obtenir une corrélation entre la température de la cloche et la résistance mesurée de la sonde collée à l'argenture du capteur TRE.

Nous pouvons constater qu'une approche linéaire est suffisante ( Figure 15 ).

Le tableau suivant présente les valeurs de flux infra-rouge estimé à partir de TRE en les comparant avec les mesures effectuées par le pyrogéomètre.

Sur la Figure 16 on a la représentation graphique des ces points, et nous pouvons constater que l'accord est très bon.

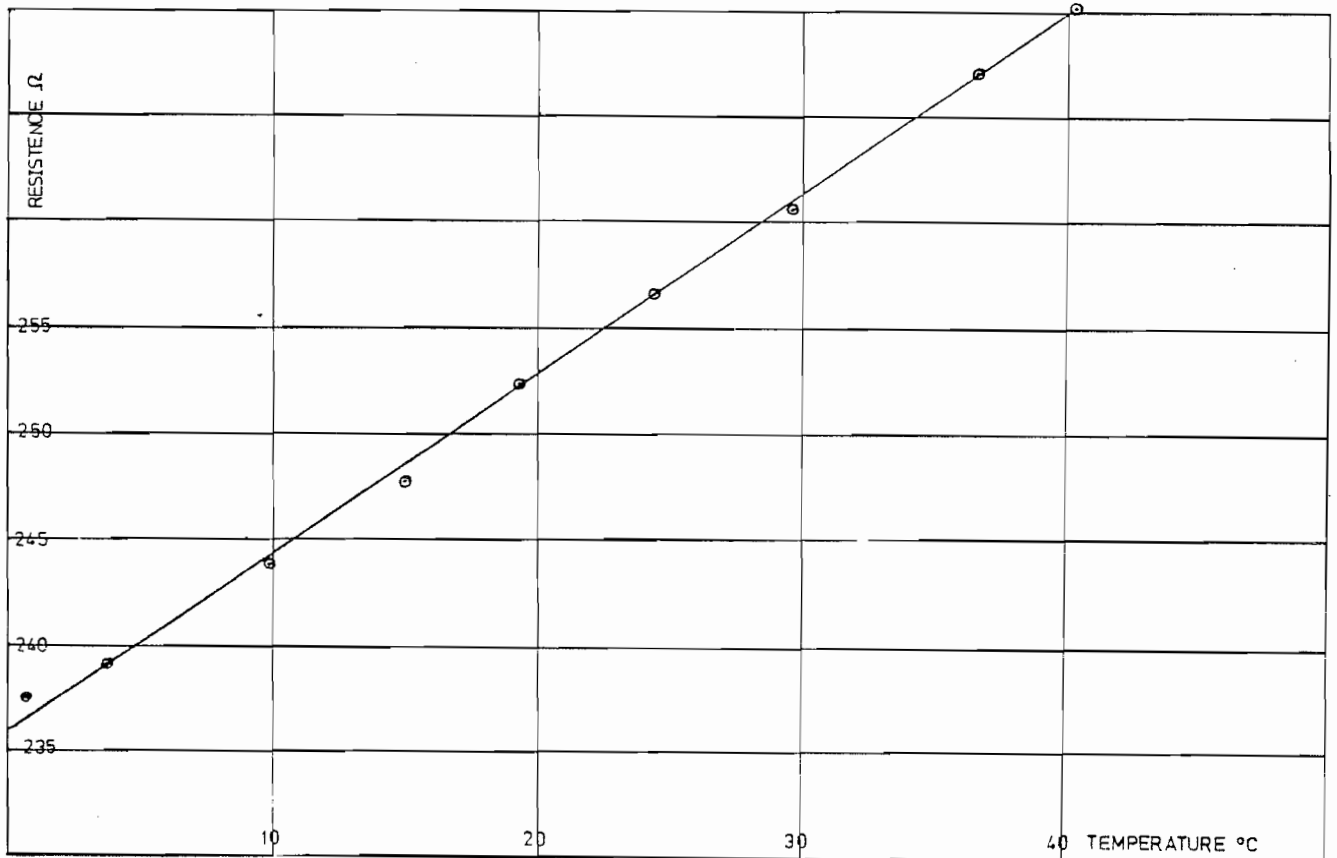


Figure 15 Etalonnage du capteur TRE

**INFRA - ROUGE MESURE ( Pyrgéomètre Cte = 4.56 )**  
**INFRA - ROUGE CALCULE ( par le TRE )**

TEMP. CLOCHE [ °C ]	$\Phi_{IR}$ mesuré [ W/m <sup>2</sup> ]	$\Phi_{IR}$ calcul [ W/m <sup>2</sup> ]
0.73	318.3	323.8
9.77	362.5	359.6
14.92	389.6	383.6
19.09	412.7	413.9
24.24	442.6	442.4
29.39	474.1	471.6
36.43	519.8	520.9
40.10	544.9	545.6
44.06	573.0	574.7

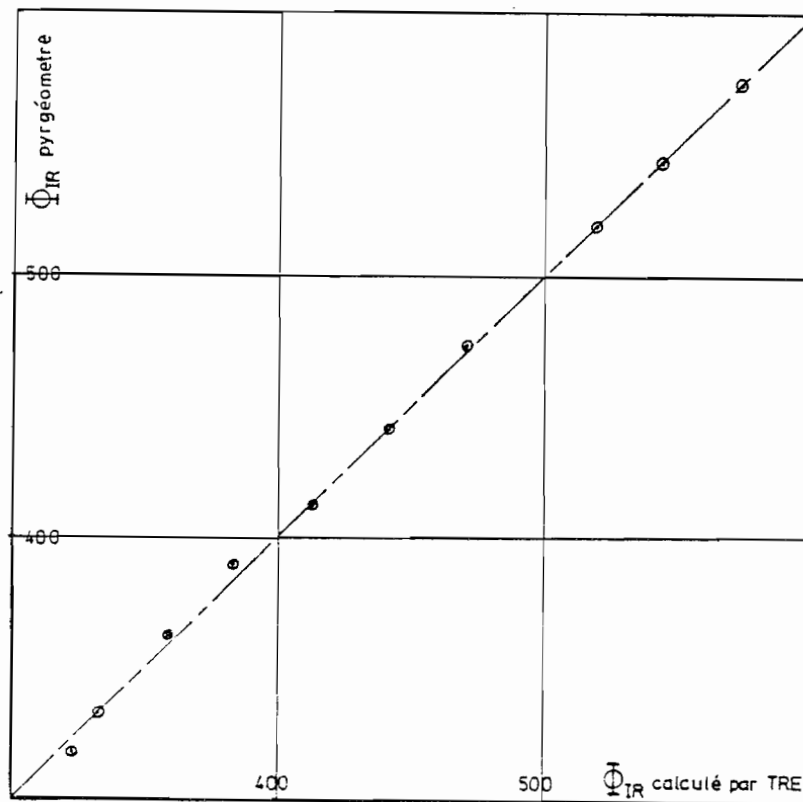


Figure 16 Flux infra-rouge

### **Conclusion de l'étalonnage**

Nous avons fait un étalonnage partiel comparatif , dans une enceinte où la température des parois est égale à la température convective de l'air et où il n'y a pas de vent.

Dans le code de calcul TRE , déjà défini, nous avons fait des hypothèses qu'il faut vérifier.

Si l'étalonnage et les hypothèses du modèle TRE sont correctes, la courbe caractéristique d'un capteur solaire exprimée en fonction de la Température Résultante d'Environnement, constituera une représentation généralisée, indépendante de l'environnement, c'est à dire :

**la courbe caractéristique d'un capteur en TRE sera toujours la même quel que soit l'environnement avec lequel on a obtenu les points expérimentaux.**

Ce sera donc dans ce sens que nous développerons notre étude.

## 2.5 – APPLICATION DE LA NOTION DE TRE AUX ESSAIS DE CAPTEURS

### 2.5.1 – POSITION DU PROBLEME

Nous avons vu précédemment que la notion de température résultante d'environnement permet de tenir compte du flux infra-rouge.

Nous verrons maintenant l'utilisation pratique de TRE en tant que représentation généralisée des performances thermiques d'un capteur.

Supposons qu'un capteur soit testé en Ensoleillement Artificiel.

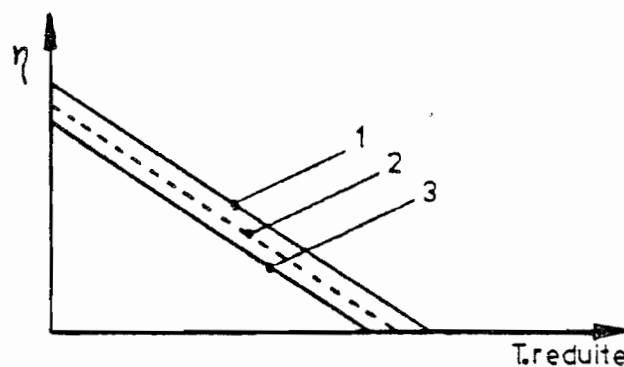
Dans ce cas les Températures de "Ciel" seront toujours supérieures à la Température Ambiante et TRE sera aussi supérieure à  $T_{AR}$ .

Le comportement thermique du capteur sera représenté par la courbe 1 de la figure 17.

Si on représente le comportement du capteur en remplaçant la Température Ambiante par la Température Résultante d' Environnement Corrigée, nous obtiendrons la Courbe 2.

A l' extérieur la Température de "Ciel" est toujours inférieure à la Température Ambiante ainsi que TRE. Le capteur sera représenté par la Courbe 3.

Si on représente le comportement du capteur, à l'extérieur, en termes de TRE on obtient à nouveau la Courbe 2.



**Figure 17** Courbes caractéristiques d'un capteur

Nous avons constaté que TRE permet une description du comportement du capteur, en intégrant des effets importants, le Flux Infra-Rouge Descendant, la Vitesse du Vent, rendant le modèle indépendant de l'environnement pendant l'essai.

### 2.5.2 - SYNTHESE DES ESSAIS EN ENSOLEILLEMENT NATUREL ET ARTIFICIEL

L'essai de capteurs solaires en ensoleillement naturel présente trois inconvénients :

- le caractère aléatoire des conditions météorologiques allonge la période d'essai
- les variations, pendant les essais, de la température de "Ciel" et du régime de vent, peuvent provoquer une certaine dispersion des résultats.
- les variations saisonnières et les différences d'un site à un autre, de la température de "Ciel" et du régime du vent sont à l'origine d'un manque de reproductibilité des résultats.

Ces problèmes ont aidé à la décision, qui se généralise, d'utiliser des bancs en ensoleillement artificiel.

Certes que ces problèmes ont été résolus mais, malheureusement, d'autres sont apparus, car si d'un côté nous maîtrisons la Source, nous avons créé un Environnement très différent de l'environnement naturel.

La Commission des Communautés Européennes, a proposé, dans le Rapport 1982 EUR 8006 [33] l'Environnement Standard suivant :

<b>Flux Solaire</b>	<b>800 W/m<sup>2</sup></b>
<b>% de Rayonnement Diffus</b>	<b>0 %</b>
<b>Temp. Ambiante</b>	<b>15 °C</b>
<b>Temp. Equivalente de Ciel</b>	<b>5 °C</b>
<b>Vitesse du Vent</b>	<b>3 m/s</b>

Nous adopterons cet environnement standard à l'exception près de la vitesse du Vent que nous allons considérer égale à 1 m/s, parce que le simulateur de vent dont on dispose ne permet pas de telles vitesses.

Nous avons testé un capteur avec le banc artificiel de Cadarache et son comportement a été pratiquement linéaire pour la gamme de températures imposées.

Sur la Figure 18 nous présentons :

**Courbe 1 (+)** Représentation en Température Ambiante

**Courbe 2 (\*)** Représentation en TRE corrigée

**Courbe 3 (x)** Représentation en Environnement Standard

On voit qu'à partir de la représentation en TRE corrigé il est possible de déterminer les performances du capteur dans d'autres conditions, ce qui est important, car nous avons déjà vu que l'essai en Ensoleillement Artificiel est optimiste.

Les essais en extérieur nous conduisent à des courbes caractéristiques qui sont encadrés par les courbes en TRE corrigé et en Température Ambiante Standard. Sur la Figure 19, nous présentons une comparaison entre les essais en Ensoleillement Artificiel et leur représentation en TRE.

Ayant pour base les essais effectués et en utilisant le modèle TRE, nous avons fait une étude de répercussion des erreurs des mesures du Flux Solaire et de la Vitesse du Vent, sur les grandeurs calculées, l' Infra-Rouge, la Température de "Ciel" et la Température Résultante d' Environnement corrigée.

- Une erreur de  $\pm 5 \%$  sur la mesure du Flux Solaire implique:

- /+ 0.6 % sur le Flux Infra-Rouge
- /+ 1.4 % sur la Température de "Ciel"
- /+ 0.8 % sur TRE corrigée

- Une erreur sur la mesure de la vitesse du Vent ( $1 \pm 0.5$  m/s au lieu de 1 m/s) implique:

- /+ 2.4 % sur le Flux Infra-Rouge
- /+ 6.0 % sur la Température de "Ciel"
- /+ 2.2 % sur TRE corrigée

Il est essentiel de connaître la vitesse du Vent avec une précision meilleure que 0.5 m/s.

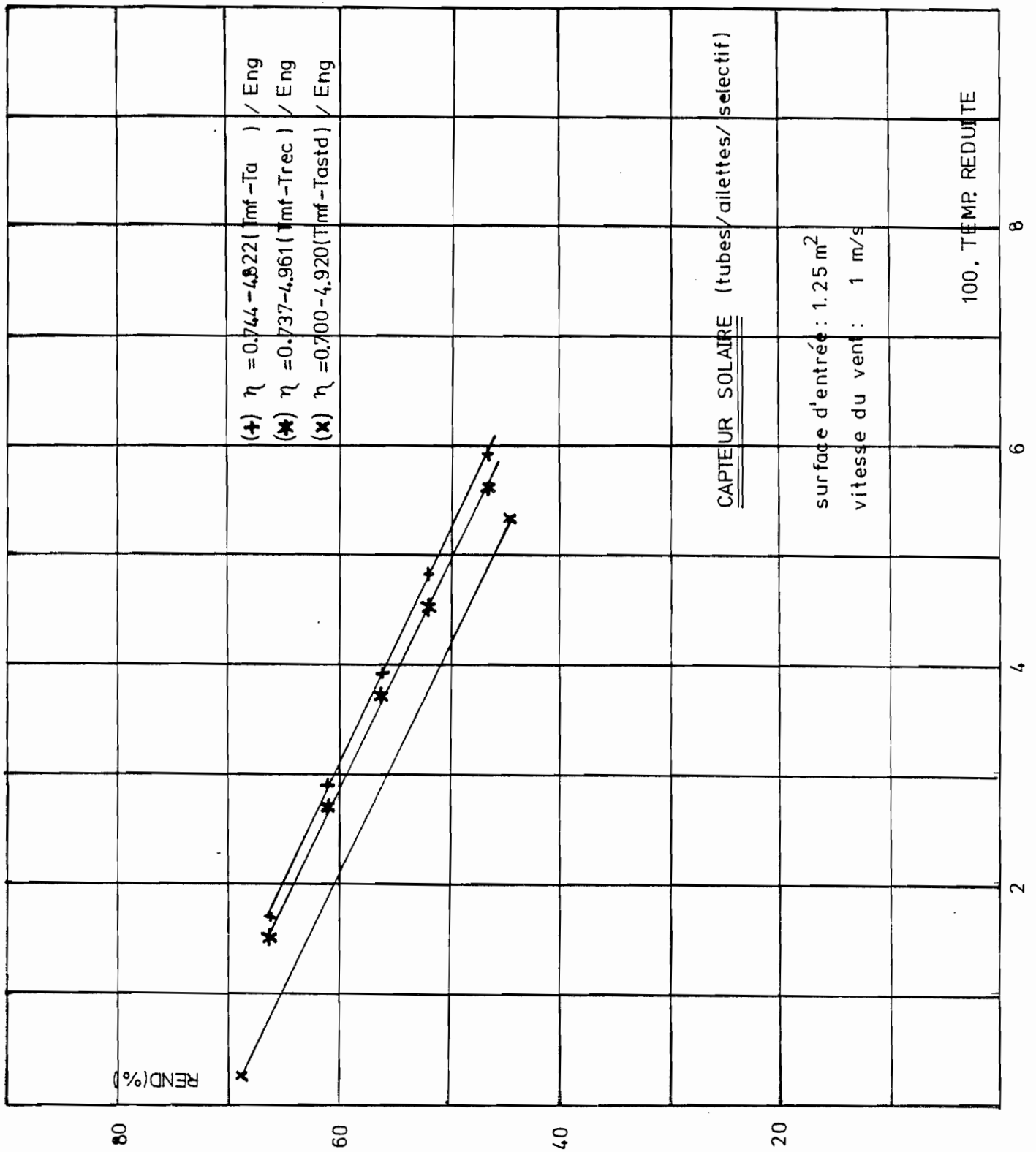


Figure 18 Courbes caractéristiques d'un capteur

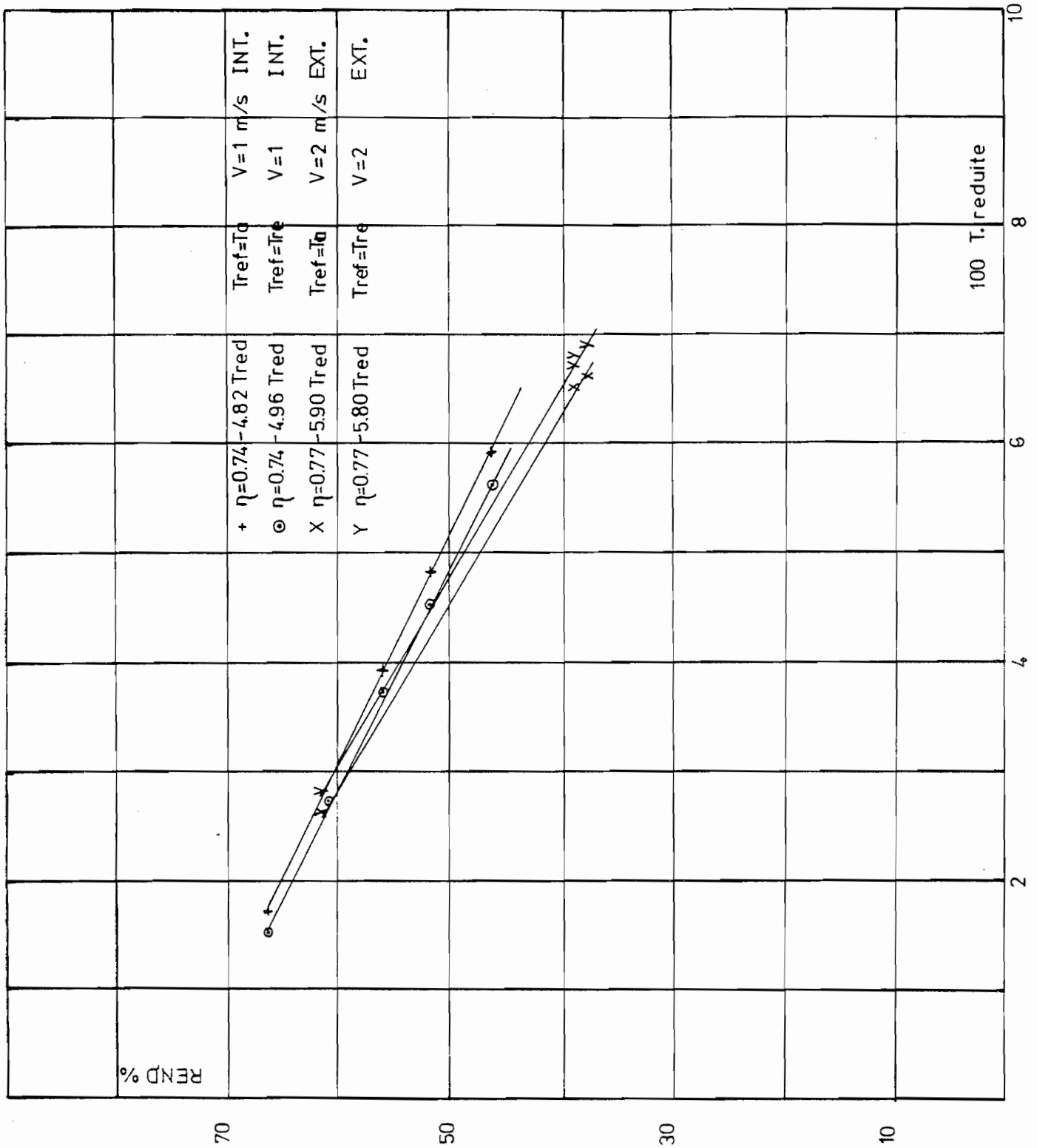


Figure 19 Courbes caractéristiques d'un capteur

### 2.5.3 – REPRESENTATION GENERALISEE DES ESSAIS DE CAPTEURS

Nous allons maintenant considérer les tests d' un capteur , en ensoleillement naturel et artificiel pour faire quelques applications.

Pour simplifier la présentation nous allons appeler :

$Tred1 = (Tmf - Tamb \text{ intérieur}) / \Phi_s$  Température réduite par rapport à la température ambiante

$Tred2 = (Tmf - TRE) / \Phi_s$  Température réduite par rapport à la température résultante d'environnement

$Tred3 = (Tmf - Tamb \text{ standard}) / \Phi_s$  Température réduite par rapport à la température ambiante standard

$Tred4 = (Tmf - Tamb \text{ extérieur}) / \Phi_s$  Température réduite par rapport à la température ambiante extérieure

#### A – Détermination de la courbe en TRE à partir d'un essai en ensoleillement artificiel

Pendant l'essai du capteur en ensoleillement artificiel , pour chaque point de stabilité nous pouvons calculer :

- le rendement instantané  $\eta_{1i}$
- la température réduite en Ta  $Tred1_i$
- la température réduite en TRE  $Tred2_i$

Dans la plage de températures de test de ce capteur le modèle linéaire est suffisant et nous pouvons déterminer par la méthode des moindres carrés les coefficients de:

$$\eta_1 = \eta_1 ( Tred1 )$$

$$\eta_2 = \eta_2 ( Tred2 )$$

La courbe caractéristique de ce capteur en ensoleillement artificiel est :

$$\eta_1 = 0.730 - 4.96 Tred1 \quad (\text{ en Température ambiante})$$

ou 
$$\eta_2 = 0.676 - 4.93 Tred2 \quad (\text{ en TRE } )$$

### B - Détermination de la courbe caractéristique pour l'environnement standard à partir de la courbe en TRE

Nous disposons maintenant de la courbe caractéristique du capteur en TRE

$$\eta_2 = 0.676 - 4.93 \text{ Tred}_2$$

Nous voulons connaître les performances dans un autre environnement, par exemple celui proposé par la Commission des Communautés Européennes :

Flux solaire (global incliné)	800 W/m <sup>2</sup>
Flux diffus	0 W/m <sup>2</sup>
Température ambiante	15 °C
Température de ciel	5 °C
Vitesse du vent	1 m/s

En utilisant le code de calcul TRE nous pouvons déterminer :

Flux infra-rouge descendant	300 W/m <sup>2</sup>
Température résultante d'environnement corrigée	10.2 °C
Emissivité apparente du ciel	0.87

Pour obtenir la nouvelle courbe caractéristique nous allons simuler analytiquement un essai du capteur, en considérant :

Flux solaire	800 W/m <sup>2</sup>
Temp. ambiante	15 °C
TRE	10.2 °C

#### *Point 1*

Température moyenne du fluide	20 °C
-------------------------------	-------

$$\text{Tred}_{2_1} = (20 - 10.2) / 800 = \mathbf{0.0123} \text{ m}^2 \text{ K/W} \quad \text{et}$$

$$\eta_2 = 0.676 - 4.93 \text{ Tred}_2 = 0.676 - 4.93 \times 0.0123 = \mathbf{0.616}$$

La température réduite en termes de Température ambiante standard sera :

$$\text{Tred}_{3_1} = (20 - 15) / 800 = \mathbf{0.0063} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

**Point 2**

Température moyenne du fluide            80 °C

$$\text{Tred}_2 = (80 - 10.2) / 800 = \mathbf{0.0873} \text{ m}^2 \text{ K/W} \quad \text{et}$$

$$\boldsymbol{\eta}_2 = 0.676 - 4.93 \text{ Tred}_2 = 0.676 - 4.93 \times 0.0873 = \mathbf{0.246}$$

La température réduite en termes de Température ambiante standard sera :

$$\text{Tred}_3 = (80 - 15) / 800 = \mathbf{0.0813} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

La droite qui passe par ces deux points (  $\eta$  , Tred ) sera :

$$\boldsymbol{\eta}_3 = \mathbf{0.647 - 4.93 \text{ Tred}_3} \quad (\text{ en Température ambiante standard } )$$

**C – Détermination de la courbe en TRE à partir d'un essai en ensoleillement naturel**

Ce même capteur fut aussi testé en ensoleillement naturel avec des vitesses du vent entre 1 et 1.5 m/s et nous avons obtenu la courbe caractéristique suivante :

$$\boldsymbol{\eta}_4 = \mathbf{0.680 - 5.20 \text{ Tred}_4} \quad (\text{ en Température ambiante extérieure } )$$

Pendant l'essai à l'extérieur on avait un environnement défini par :

Flux solaire	≈ 1000 W/m <sup>2</sup>
Flux infra-rouge	≈ 370 W/m <sup>2</sup>
Température ambiante	≈ 20 °C
Température de ciel	≈ 11.2 °C
Emissivité apparente du ciel	≈ 0.89
TRE	≈ 16 °C

En utilisant la méthodologie du **SA** , nous avons obtenu :

$$\boldsymbol{\eta}_2' = \mathbf{0.700 - 5.20 \text{ Tred}_2} \quad (\text{ en Température résultante d'environnement } )$$

Il y a une petite différence entre les deux modèles en TRE  $\eta_2$  et  $\eta_2'$  , mais compte tenu de la précision avec laquelle les mesures peuvent être faites , nous pouvons considérer que les deux courbes se confondent.

Tred (en TRE)	$\eta_2$ ( Intérieur)	$\eta_2'$ ( Extérieur)	Erreur
0	0.68	0.70	2.9 %
0.01	0.631	0.648	2.7 %
0.03	0.532	0.544	2.3 %
0.05	0.434	0.440	1.4 %
0.07	0.335	0.336	$3 \cdot 10^{-3}$ %
0.09	0.236	0.232	-0.017 %

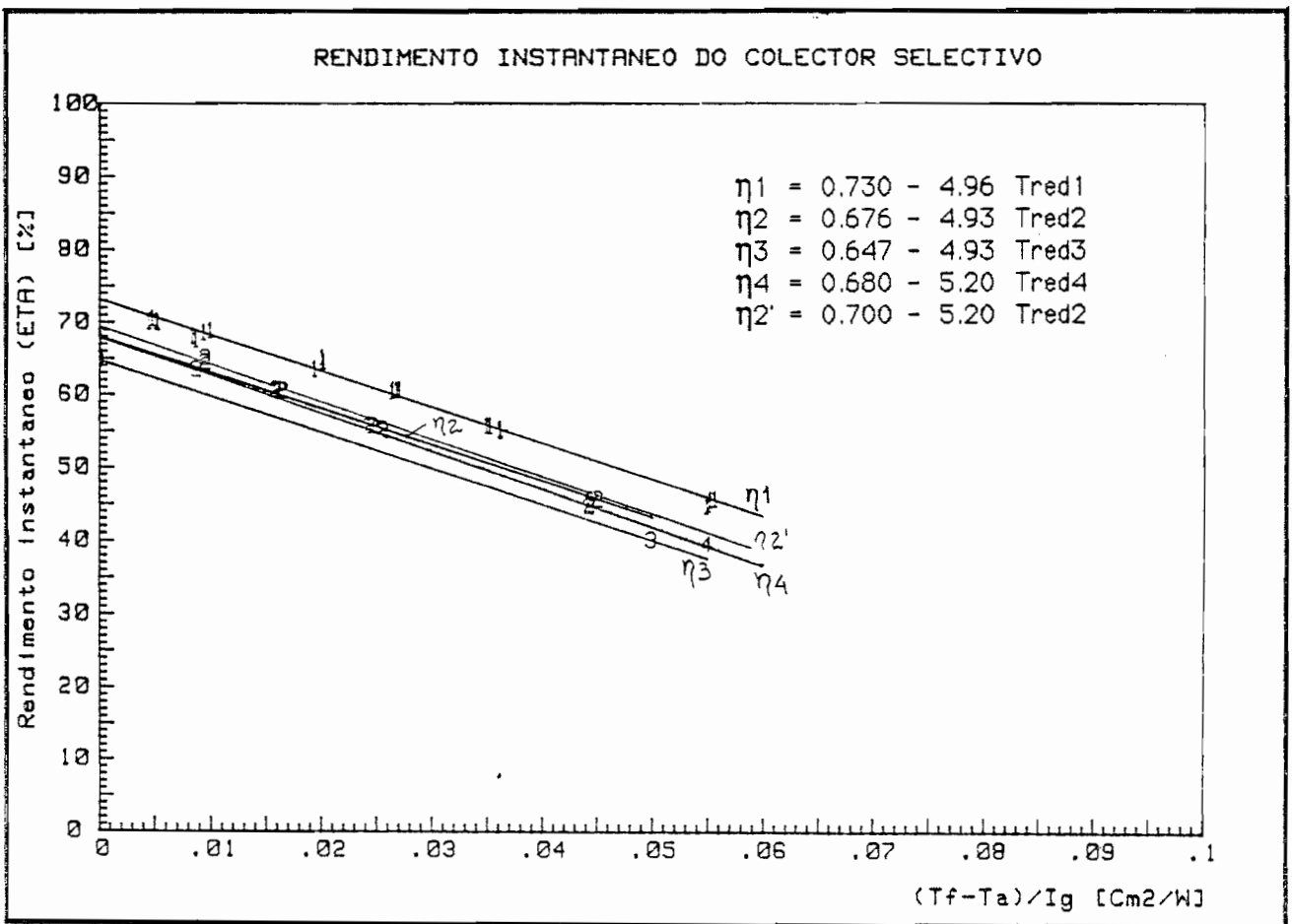


Figure 20 Courbes caractéristiques d'un capteur ( Extrait de [37] )

## 2.6 - CONCLUSIONS

Cette notion de Température Résultante d' Environnement et le dispositif que nous avons construit permettent:

- L'évaluation du flux infra-rouge descendant
- L'évaluation de la température de ciel
- Une meilleure description de l' environnement

Nous avons montré la validité de l'utilisation du concept de TRE car les courbes caractéristiques du capteur en ensoleillement artificiel et en ensoleillement naturel, peuvent se confondre si on les représente en température résultante d'environnement.

**La température résultante d'environnement permet la description d'un capteur avec beaucoup moins de dispersion, par l'adoption d'une représentation généralisée.**

### 3 - RENDEMENT OPTIQUE

#### 3.1 - INTRODUCTION

Nous avons étudié la façon de prendre en considération les flux solaire et infra-rouge.

Pour la caractérisation optique des capteurs nous avons déjà mentionné les angles d'incidence projetés (  $lpl$ ,  $lpt$  ) que allons définir maintenant.

Ensuite nous étudierons les transformations subies par le rayonnement , à fin de pouvoir décrire le comportement optique du capteur par ce que nous appellerons la surface de rendement optique.

#### 3.2 - ANGLES D'INCIDENCE PROJETES

Nous allons définir maintenant les angles d'incidence projetés  $lpt$  et  $lpl$ .

Considérons un repère lié au site , **M SEV** ( Sud / Est / Verticale du lieu ).

Les cosinus directeurs de la direction du soleil (  $OR$  ) dans ce repère sont :

$$\begin{vmatrix} \overline{MS} \cdot \overline{OR} \\ \overline{ME} \cdot \overline{OR} \\ \overline{MY} \cdot \overline{OR} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sin \varphi \cos \delta \cos \omega - \cos \varphi \sin \delta \\ \cos \delta \sin \omega \\ \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a \\ b \\ c \end{vmatrix}$$

$\varphi$  - Latitude du lieu

$\delta$  - déclinaison

$\omega$  - angle horaire

Considérons maintenant un repère lié au capteur **M TLN** ( direction transversale / direction longitudinale / normale au capteur ).

Cosinus directeurs de la transversale  $\overline{MT}$ , dans le repère **M SEV** :

$$\begin{vmatrix} T_S \\ T_E \\ T_Y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\cos \beta \cos a_c \\ -\cos \beta \sin a_c \\ \sin \beta \end{vmatrix}$$

$\beta$  - inclinaison

$a_c$  - azimuth du capteur

Cosinus directeurs de la longitudinale  $\overline{ML}$ , dans le repère **M SEY** :

$$\begin{vmatrix} L_S \\ L_E \\ L_Y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sin a_c \\ -\cos a_c \\ 0 \end{vmatrix}$$

Cosinus directeurs de la normale  $\overline{MN}$ , dans le repère **M SEY** :

$$\begin{vmatrix} N_S \\ N_E \\ N_Y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sin \beta \cos a_c \\ \sin \beta \sin a_c \\ \cos \beta \end{vmatrix}$$

Cosinus directeurs de la direction du rayonnement  $\overline{OR}$  dans le repère **M TLN** :

$$\begin{vmatrix} R_T \\ R_L \\ R_N \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \overline{OR} \cdot \overline{MT} \\ \overline{OR} \cdot \overline{ML} \\ \overline{OR} \cdot \overline{MN} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -a \cos \beta \cos a_c - b \cos \beta \sin a_c + c \sin \beta \\ a \sin a_c - b \cos a_c \\ a \sin \beta \cos a_c + b \sin \beta \sin a_c + c \cos \beta \end{vmatrix}$$

$R_T$  est le cosinus directeur de  $\overline{OR}$  sur l'axe  $\overline{MT}$  et il est donc égal au cosinus de l'angle d'incidence entre la direction du rayonnement et la transversale du capteur.

$R_L$  est le cosinus directeur de  $\overline{OR}$  sur l'axe  $\overline{ML}$  et il est donc égal au cosinus de l'angle d'incidence entre la direction du rayonnement et la longitudinale du capteur.

$R_N$  est le cosinus directeur de  $\overline{OR}$  sur l'axe  $\overline{MN}$  et il est donc égal au cosinus de l'angle d'incidence entre la direction du rayonnement et la normale au capteur.

Nous pouvons maintenant définir les deux angles projetés :

$$|p_t| = \text{atan} ( R_T / R_N )$$

$$|p_l| = \text{atan} ( R_L / R_N )$$

### 3.3 – FLUX UTILE

#### 3.3.1 – MODELE DE CALCUL DE LA TRANSMISSION PAR RAPPORT AUX RAYONNEMENTS DIRECT ET DIFFUS

La décomposition du Rayonnement Direct et Diffus est courante mais nous avons proposé la décomposition en utilisant le modèle anisotrope de HAY:

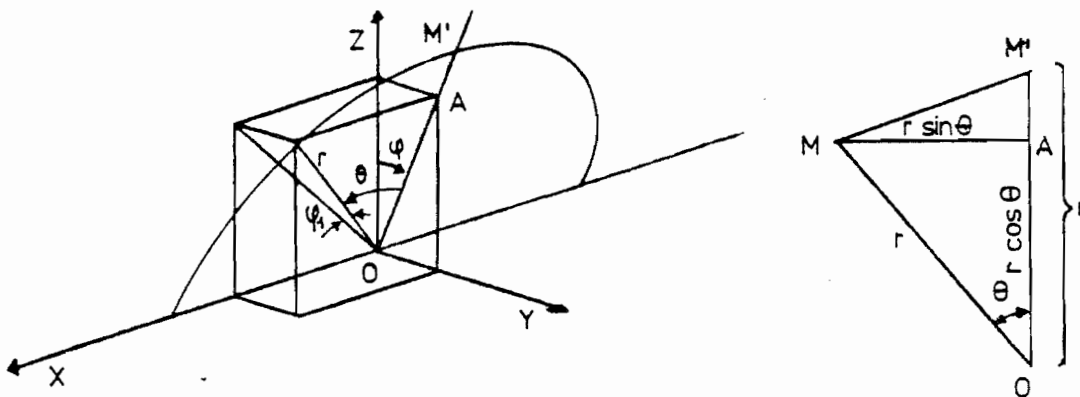
- Rayonnement Direct + partie anisotrope du Rayonnement Diffus
- Partie isotrope du Rayonnement Diffus

Le premier type de rayonnement est associé à la position du Soleil et la transmission est surtout affectée par le cosinus de l' angle entre la direction du rayonnement et la normale au capteur, l' angle d'incidence.

Par rapport au second type de rayonnement, nous allons démontrer que la fraction du Rayonnement Diffus isotrope acceptée par le capteur est proportionnelle au Facteur de Forme du capteur vers le Ciel.

Nous avons étudié quelques cas de capteurs , comme le capteur plan avec une couverture transparente et le concentrateur Parabolique composé.

Pour calculer les facteurs de Forme par la méthode de la sphère unitaire de Wilhem NUSSELT, nous avons utilisé un système d'axes et des coordonnées sphériques modifiées pour une meilleure adaptation à la géometrie du capteur étudié (  $r, \varphi, \theta$  ).



**Figure 21** . *Coordonnées pour le calcul du diffus transmis*

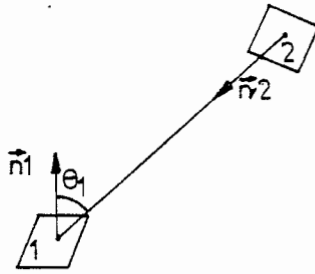
Ces coordonnées permettent la division du ciel en quartiers ce qui facilite l'intégration pour les systèmes 2D .

Les cosinus directeurs de  $\overline{OM}$  et  $\overline{OM'}$  sont

$$\overline{OM} \begin{vmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \cos \varphi \end{vmatrix}$$

$$\overline{OM'} \begin{vmatrix} 0 \\ \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{vmatrix}$$

Etant donné que  $\theta_2 = 0$  et  $\cos \theta_2 = 1$



$$\cos \theta_1 = \overline{OZ} \cdot \overline{OM} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \cos \varphi \end{vmatrix}$$

**Figure 22** Facteurs de forme

et on a donc  $\cos \theta_1 = \cos \theta \cos \varphi$

L' énergie émise par la voûte céleste dans toutes les directions est  $Q_2 = M_2 S_2$

$M_2$  – étant l' émittance de la voûte

$S_2$  – étant l'aire de la voûte

La partie isotrope du Rayonnement diffus acceptée par le capteur sera

$$\Phi_{DIF} = M_2 S_2 F_{2-1} \quad \text{ou par la règle de la reprocité}$$

$$\Phi_{DIF} = M_2 S_1 F_{1-2} \quad F_{1-2} - \text{Facteur de Forme de 1 vers 2}$$

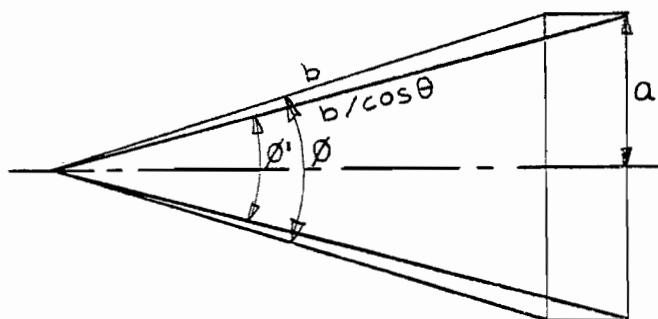
Si le capteur voit toute la voûte , alors  $F_{1-2} = 1$  et la fraction du rayonnement Diffus acceptée par le capteur sera:

$$\frac{\Phi_{DIF \text{ accepté}}}{\Phi_{DIF}} = \frac{M_2 S_1 F_{1-2}}{M_2 S_1} = F_{1-2} \quad \text{q.e.d.}$$

Nous avons ainsi démontré qu' il nous suffit de calculer le Facteur de Forme du capteur vers la voûte qui est donné par:

$$d^2F_{1-2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} d^2S$$

Calcul de  $d^2S$  :



$$\sin \theta'/2 = a \cos \theta / b$$

$$\sin \theta = a/b$$

nous avons donc

$$\sin \theta'/2 = \sin \theta/2 \cos \theta$$

$$\text{et } \Delta \theta' = \Delta \theta \cos \theta$$

$$\text{d'où } d\theta' \approx d\theta \cos \theta$$

finalement

$$d^2S = r d\theta r d\theta'$$

Figure 23 Calcul de  $d^2S$

$$d^2S = r^2 \cos \theta d\theta d\theta'$$

nous avons donc 
$$d^2F_{1-2} = \frac{\cos \theta}{\pi} \frac{1 + \cos 2\theta}{2} d\theta d\theta'$$

Avec un changement de variables:  $u = 2\theta$   $du = 2 d\theta$   $d\theta = du / 2$

nous obtenons:

$$d^2F_{1-2} = \frac{\cos \theta}{\pi} \frac{1 + \cos u}{4} d\theta du$$

1 - APPLICATION Capteur plan horizontal

Considérons l'intégration à tout l'espace:

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi} \left[ \sin \theta \right]_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[ \frac{u + \sin u}{4} \right]_{-\pi}^{\pi}$$

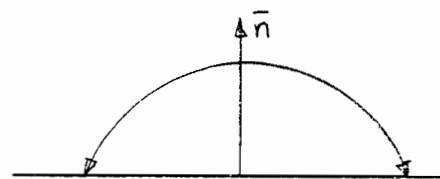


Figure 24 Facteur de forme

$F_{1-2} = 2/\pi \cdot \pi/2 = 1$  **c.a.d.** le capteur plan en position horizontale "voit" tout le Rayonnement Diffus

2- APPLICATION Capteur plan incliné

Rayonnement diffus accepté

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi} \left[ \sin \theta \right]_{-\pi/2+\beta}^{\pi/2} \left[ \frac{u + \sin u}{4} \right]_{-\pi}^{\pi}$$

$$F_{1-2} = \frac{1 + \cos \beta}{2}$$

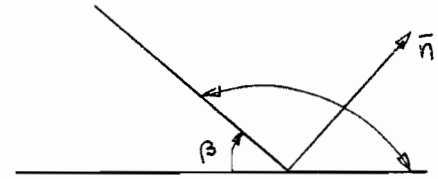


Figure 25 Facteur de forme

3- APPLICATION Capteur plan incliné

Rayonnement réfléchi par le sol  
qui est accepté par le capteur

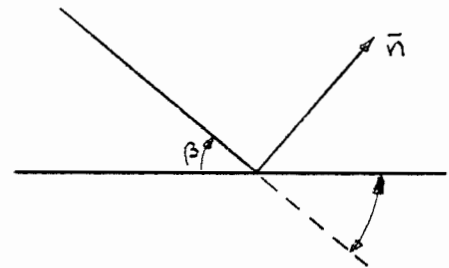


Figure 26 Facteur de forme

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi} \left[ \sin \theta \right]_{-\pi/2}^{-\pi/2+\beta} \left[ \frac{u + \sin u}{4} \right]_{-\pi}^{+\pi} = \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

La transmission de la partie isotrope du rayonnement diffus, pour le capteur, est donnée par le rapport entre le Flux Diffus accepté et le Flux provenant de toute la voûte et cette transmission sera fonction de l'inclinaison du capteur quand le capteur a un angle d'acceptance lui permettant de "voir" aussi le sol.

Sur le tableau suivant nous présentons des valeurs de la fraction de Rayonnement Diffus transmis sans vitre et avec vitre ( $T_D$ ).

Dans le cas des capteurs avec vitre nous avons normalisé les résultats, en divisant la transmission par le coefficient de transmission totale, à incidence normale,  $T_0$ .

Pour obtenir la vraie transmission il suffit de multiplier les valeurs de la colonne de droite par la transmission ( $T_0$ ) de la vitre.

INCLINAISON	RAYON <sup>t</sup> DIFFUS TRANSMIS sans vitre ( $T_D = F_{1-2}$ )	RAYON <sup>t</sup> DIFFUS TRANSMIS avec vitre ( $T_D / T_0$ )
0	1.000	0.893
10	0.993	0.892
20	0.970	0.881
30	0.933	0.855
40	0.883	0.814
50	0.854	0.787
60	0.750	0.690
70	0.671	0.613
80	0.587	0.478
90	0.500	0.447

La fraction du Rayonnement Diffus transmis , pour un capteur plan incliné à  $40^\circ$  , avec une vitre (  $T_0 = 0.87$  ), sera:

$$\text{FRACTION DIFFUS TRANSMIS} = ( T_D / T_0 ) \times T_0 = 0.814 \times 0.87 = 0.708$$

#### 4- APPLICATION Concentrateur parabolique composé

Angle d' acceptance transversal  $|\rho_t| = 30^\circ$

Angle d' acceptance longitudinal  $|\rho_l| = 90^\circ$

Inclinaison  $\beta = 45^\circ$

En faisant l' intégration à tout l'espace vu par le capteur , nous obtenons:

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi} \left[ \sin \theta \right]_{-\theta_a}^{+\theta_a} \left[ \frac{u + \sin u}{4} \right]_{-\pi}^{\pi} = \sin \theta_a = 1 / C_{\max}$$

Le capteur ne voit donc que : (  $\sin \theta_a \times \Phi$  dif. isotrope )

**sans vitre** DIFFUS TRANSMIS

$$T_D = 0.500$$

Pour le cas du capteur avec vitre, en faisant une intégration discrète, nous obtenons :

**avec vitre** DIFFUS TRANSMIS  $T_D = ( T_D / T_0 ) T_0 = 0.486 \times 0.87 = 0.423$

### 3.3.2 – APPAREILS DE MESURE DE L'INTRANT SOLAIRE

Notre proposition, pour tenir compte de l'anisotropie du Rayonnement Diffus, est de réaliser un appareil de mesure du Flux à angle d'acceptance variable entre  $1^\circ$  et  $90^\circ$ .

Le senseur est placé à l'intérieur d'un tube où une crémaillère lui permet le déplacement par rapport à orifice d'entrée.

En position haute l'angle d'acceptance sera de  $90^\circ$  et position basse l'angle sera de  $1^\circ$ .

Ce Pyranomètre sera appelé : **PYRANOMETRE A ACCEPTANCE VARIABLE ( PAY )**

Pour un capteur à géométrie cylindrique il est préférable de concevoir un masque permettant au pyranomètre les mêmes angles d'acceptance du capteur.

Dans le cas du CPC les angles d'acceptance sont:

$$I_{pt} = 30^\circ \quad \text{et} \quad I_{pl} = 90^\circ$$

Ce pyranomètre sera appelé : **PYRANOMETRE A ACCEPTANCE TRONQUEE ( PAT )**

Pour savoir à quoi correspondent les mesures obtenues par les différents types de pyranomètre nous indiquerons en indice les angles d'acceptance ( par défaut on considère  $90^\circ$  ) :

$I_{L60.T30}$  - Flux mesuré avec un pyranomètre avec  $I_{pl} = 60^\circ$  et  $I_{pt} = 30^\circ$

$I_{L30}$  - Flux mesuré avec un pyranomètre avec  $I_{pl} = 30^\circ$  et  $I_{pt} = 90^\circ$

$I$  - Flux mesuré avec un pyranomètre normal  $I_{pl} = 90^\circ$  et  $I_{pt} = 90^\circ$

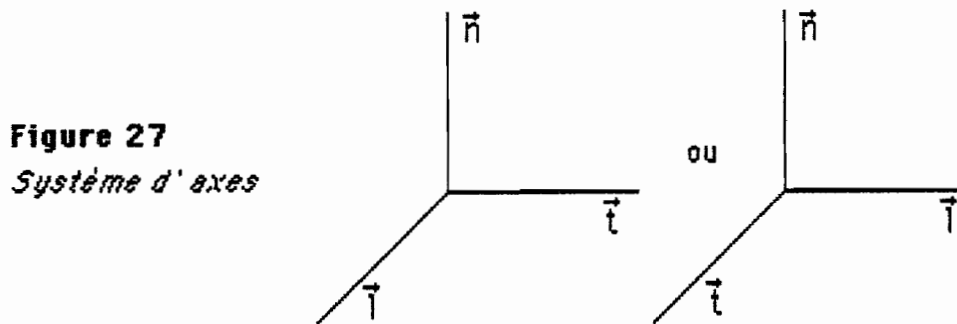
### 3.4 – APPLICATIONS

Nous avons déjà vu qu'il était important de ne considérer que la partie acceptable du Rayonnement incident , l' INTRANT, cependant, entre la surface d'entrée et l'absorbeur, il y a des transformations , entre autres l'effet cosinus sur le Flux intercepté.

D'une façon générale, quand le capteur travaille à des températures réduites proches de zéro et si le débit ne varie pas on peut considérer le facteur d'irrigation constant.

Le terme  $F' \eta_0$ , normalement appelé le Rendement Optique, tient compte des transformations auxquelles l' INTRANT est soumis jusqu'à son absorption par l'absorbeur et le transfert au fluide. ( le modèle linéaire est représenté par l'expression  $\eta = F' \eta_0 - F' U_L T_{RED}$  ).

Nous pouvons associer, à chaque capteur, un système d'axes qui sera selon les cas :



Considérons un tableau à deux entrées:

- **lpl** Angle d' incidence projeté sur le plan longitudinal
- **lpt** Angle d' incidence projeté sur le plan transversal

Ce tableau sera rempli analytiquement ou expérimentalement.

### 3.4.1 CAS DU CAPTEUR PLAN STATIONNAIRE AVEC UNE COUVERTURE PLANE

Nous avons déjà vu que si on considère les réflexions multiples :

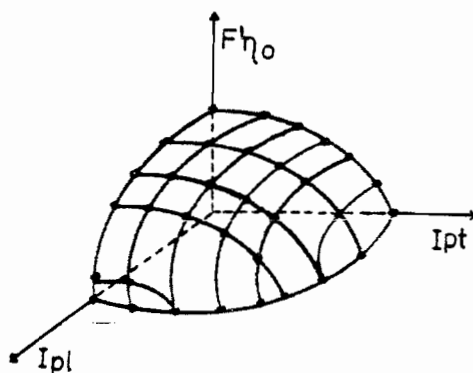
$$T_p = e^{-kL} \frac{(1 - \rho_p)^2}{1 - e^{-2kL} \rho_p^2}$$

$\rho_p$  - Coefficient de Réflexion Simple  
 $T_p$  - Coefficient de transmission totale

$$\rho_p = \frac{\rho_{p//} + \rho_{p\perp}}{2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \right]$$

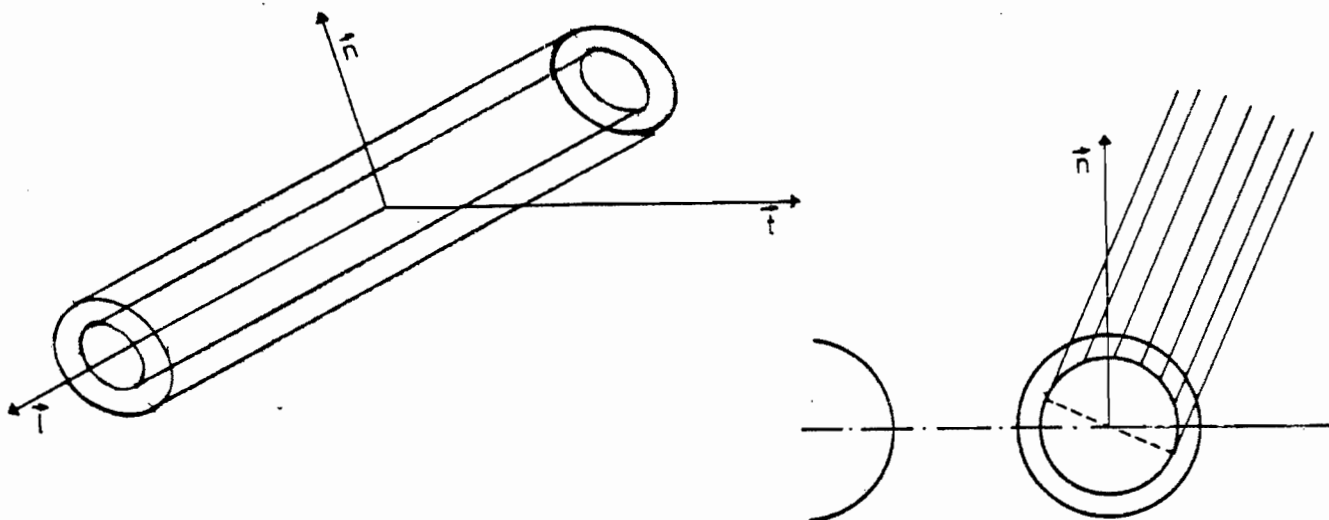
Si le coefficient d'absorption de l'absorbeur n'est pas directionnel, le produit du coefficient de Transmission Totale de la couverture par le coefficient d'absorption de l'absorbeur correspond à l'énergie absorbée en négligeant les réflexions multiples entre la couverture et l'absorbeur.

En utilisant un code de calcul simple, connaissant la direction du soleil et la position du capteur, il est possible de calculer le rendement optique en fonction de lpl et lpt .



**Figure 28** *Surface de rendement optique*

### 3.4.2 CAPTEUR A TUBES SOUS VIDE



**Figure 29** *Capteur à tubes sous vide*

Il faut, tout d'abord, considérer un système d'axes lié à ce capteur.

En représentant la direction du Rayonnement Solaire dans ce système d'axes, nous pouvons constater que  $I_{pt}$  n'a aucune influence, car tout se passe comme si le capteur suivait le soleil, c.a.d. que la normale de la section qui intercepte le rayonnement suit le soleil mais par contre  $I_{pl}$  a une influence sur le Flux intercepté.

3.4.3 - TRANSMISSION DE L' ENVELOPPE TRANSPARENTE

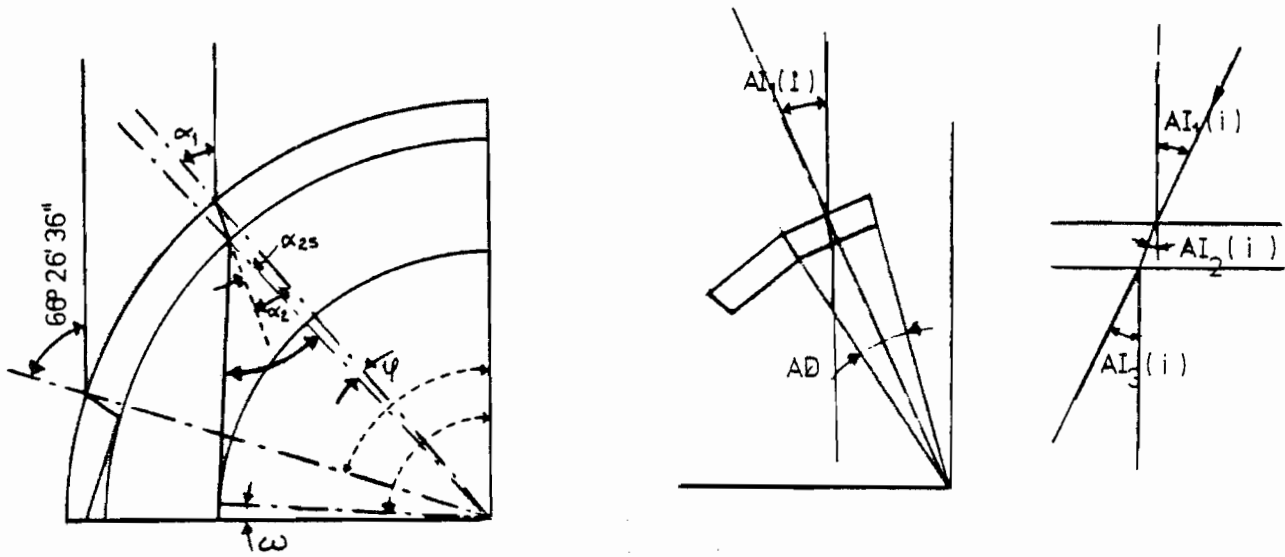


Figure 30 Transmission de l'enveloppe

Si l' absorbeur était la face interne de l'enveloppe extérieure en verre, le rayon extrême correspondant à un rayon de sortie tangent à l'absorbeur serait obtenu par le théorème de BOUGUET:

$$\alpha_{LIM} = \text{asn} ( R_i / R_e )$$

Comme ce n'est pas le cas , il nous faut déterminer l' angle correspondant au rayon extrême et le plus simple sera de le faire par itérations.

Une fois connu l' angle du rayon extrême nous allons représenter le tube par un ensemble d'éléments plans et nous calculerons la transmission pour un quart de tube, la transmission de tout le tube étant le double de cette valeur ( la précision est déjà acceptable avec 10 éléments finis ).

Pour chaque élément plan, de référence ( i ), dont on connaît la position, nous calculons:

$$\rho_p(i) = (\rho_{p//} + \rho_{p\perp}) / 2$$

$$T_p(i) = e^{-kL} \frac{[1 - \rho_p(i)]^2}{1 - e^{-2kL} [\rho_p(i)]^2}$$

$\rho_p(i)$  - Coefficient de Reflexion Simple de l'élément ( i )

$T_p(i)$  - Coefficient de transmission totale de l'élément ( i )

La Transmission totale sera :

$$\text{TRANS}(i) = 2 \cos [A(i)] T_p(i) \sin (AD/2)$$

$$AD = \alpha_{\text{LIM}} / D$$

**D** étant le nombre d'éléments considérés

Dans le tableau suivant , nous présentons l'étude faite pour un tube sous vide ayant un diamètre extérieur de 48 mm et une épaisseur de 2 mm.

Nous pouvons constater que le rayon de l'absorbeur a une influence sur la transmission.

Le verre de l'enveloppe si elle était plane, aurait une transmission de 88.2 % .

RAYON ABSORBEUR mm	ANGLE limite s/ l'enveloppe °	ANGLE limite s/ l'absorbeur °	TRANSMISSION %
5	12.0	89.6	20.0
10	24.6	89.1	39.7
15	38.7	88.1	59.0
19	52.4	86.0	73.6
21	61.2	82.5	80.4
22	66.4 (*)	66.4	83.5

(\*) Par le Théorème de BOUGUET

La transmission d'une vitre plane est donc plus élevée mais le tube a l'avantage d'être toujours pointé ( demi-suivi  $l_{pt}=0$  ). Ainsi , le long de la journée on peut considérer son rendement optique comme étant constant, car  $l_{pt} = 0$  et  $\cos (|p|) < 0.8$  .

## 4 - PARAMETRES THERMIQUES

### 4.1 - INTRODUCTION

L'absorbeur noir mat est le capteur solaire le plus simple et son rendement instantané est :

$$\eta = \frac{E_u}{I \times A} = \frac{I \times A - \text{Pertes Optiques} - \text{Pertes Thermiques}}{I \times A}$$

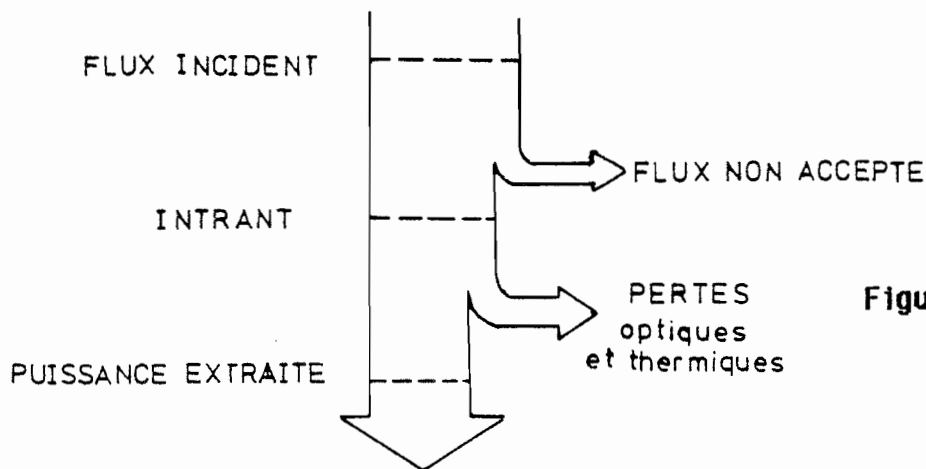


Figure 31 *Bilan thermique*

$$\eta = 1 - \frac{\text{PERTES}}{I \times A}$$

I - Flux incident

A - Aire d'ouverture

Pour améliorer ce rendement deux solutions sont possibles:

- Diminution des pertes
- Augmentation du flux incident

### 4.2 - DIMINUTION DES PERTES

#### 4.2.1 - SELECTIVITE EN SURFACE

Une façon de diminuer les pertes est l'utilisation des revêtements avec des propriétés optiques particulières :

- |                |       |      |       |
|----------------|-------|------|-------|
| - 0.25 à 2.5 μ | ρ ≈ 0 | donc | α ≈ 1 |
| - 2.5 à 50 μ   | ρ ≈ 1 | donc | α ≈ 0 |

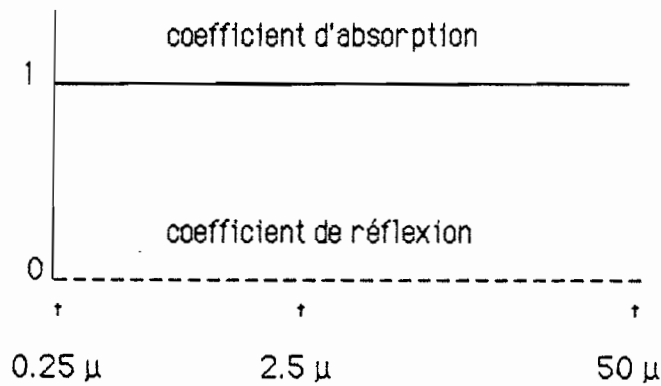
Ce revêtement a donc un comportement identique à celui du corps noir dans la gamme de longueurs d'onde du Rayonnement Solaire, mais son comportement au delà des 2.5  $\mu$  est totalement différent.

Le corps noir , par définition, a un coefficient d'absorption spectrale unitaire, indépendamment de la longueur d'onde et de même son coefficient d'émission spectrale est unitaire , car

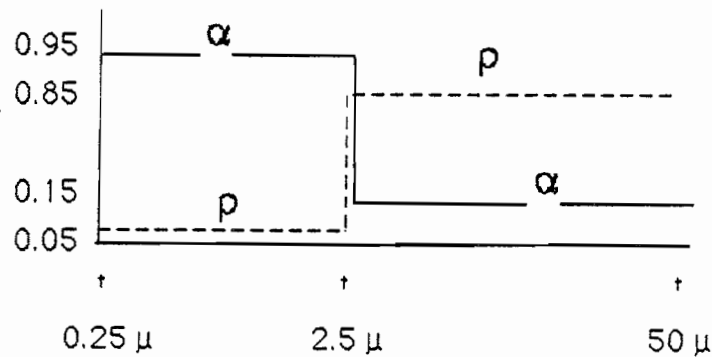
$$\alpha_{\lambda} = \epsilon_{\lambda}$$

L'énergie rayonnée par un corps sera, par la loi de Stéphan ,  $\epsilon \sigma T^4$

**Figure 32 CORPS NOIR**



**Figure 33 SURFACE SELECTIVE**



Du fait que pour la surface sélective  $\alpha_{2.5-50\mu}$  est bas, son coefficient d'émission l'est aussi.

La surface , que nous avons prise comme exemple ( Fig 33), absorbe bien le rayonnement Solaire (  $\approx 95 \%$  ) et aux températures normales de fonctionnement elle n'émet que  $\approx 15 \%$  de l'énergie émise par le corps noir à la même température.

#### 4.2.2 - SELECTIVITE EN VOLUME

##### **Effet de Serre**

Consiste à renfermer le corps noir ou la surface sélective dans une boîte, isolée par l'arrière et par les cotés, avec une couverture transparente sur la face avant.

La couverture idéale devrait avoir les caractéristiques optiques spectrales suivantes:

<b>0.25 à 2.5 <math>\mu</math></b>	Coefficient de transmission unitaire	(pour le verre $T \approx 0.87$ )
<b>2.5 à 50 <math>\mu</math></b>	Coefficient de transmission nul	(pour le verre $T \approx 0$ )
	Coefficient d'émission nul	(pour le verre $E \approx 0.8$ )

Le verre est opaque au rayonnement émis par l'absorbeur, mais en l'absorbant il s'échauffe et par conduction la température de la face extérieure s'élève et une partie de cette énergie se perd vers l'extérieur par conduction, convection et radiation.

L'effet de serre protège l'absorbeur de l'environnement, en diminuant ses pertes.

##### **Nids d'abeille**

Une structure alvéolaire sur l'absorbeur diminue les pertes convectives.

De même, car les alvéoles diminuent l'angle solide selon lesquels les éléments de surface de l'absorbeur voient l'environnement, les pertes radiatives se trouvent aussi diminuées en proportion.

Néanmoins les alvéoles fonctionnent comme des ailettes et les pertes conductives de l'absorbeur augmentent.

Aussi faut-il optimiser le rapport entre le diamètre et la longueur des alvéoles et il faut faire attention au choix des matériaux, de préférence peu conducteurs.

##### **Tubes sous vide**

L'extraction de l'air autour de l'absorbeur annule les pertes conductives et convectives et les pertes radiatives diminuent aussi car l'enveloppe est en verre et ceci est opaque au rayonnement émis par l'absorbeur, constituant ainsi une excellente protection.

### 4.3 – AUGMENTATION DU FLUX INCIDENT

L'augmentation du flux incident est une autre façon d'améliorer le rendement du capteur à une certaine température de fonctionnement de l'absorbeur.

#### **Systèmes optiques non focalisants**

- Concentrateur Parabolique Composé
- Concentrateurs de section circulaire
- etc.

#### **Systèmes optiques focalisants**

- Catoptriques ( cas des capteurs cylindro-paraboliques et des paraboloïdes )
- Dioptriques ( cas des lentilles convexes )

#### **Systèmes optiques pseudo-focalisants**

- Approximation de systèmes catoptriques focalisants par un nombre fini d'éléments plans ( cas du pseudo-paraboloïde )
- Approximation de systèmes dioptriques focalisants ( cas des lentilles de FRESNEL )

Il est maintenant évident que la caractérisation d'un capteur solaire est bien plus complexe qu'une simple étude de INPUT/ OUTPUT d'une boîte noire.

D'une façon générale nous savons que les essais doivent se décomposer en deux parties:

- caractérisation thermique
- caractérisation optique

A part les gammes de température, tous les capteurs sans accumulation incorporée peuvent être testés de façon identique.

Néanmoins, la sensibilité aux conditions extérieures, température équivalente de ciel, vitesse et régime de vent est d'autant plus grande que la sélectivité est petite ( en surface ou en volume ). Cette sensibilité diminue aussi avec le renforcement du flux solaire.

Nous avons vu au Chap II 1 que pour caractériser un capteur nous avons besoin de connaître l'INTRANT, par ses composantes de rayonnement direct, diffus anisotrope ( associé à la position du soleil ), et diffus isotrope et aussi le rayonnement infra-rouge descendant.

Nous voulons connaître les performances des capteurs dans toute la gamme de températures de fonctionnement.

Le long de la journée et le long de l'année, l' INTRANT varie mais on dispose de modèles de Rayonnement permettant des prévisions statistiques raisonnables.

Nous avons vu au Chap II 2 comment prendre en considération les variations de l'INTRANT au niveau du rendement optique et que la notion de température résultante d'environnement permettait de tenir compte du rayonnement infra-rouge.

#### **4.4 – COEFFICIENT DE PERTES**

En ce qui concerne les pertes thermiques, une des différences principales est liée au fluide caloporteur:

- Capteurs à liquide
- Capteurs à air
- Capteurs à diode thermique

Cette étude porte surtout sur des capteurs à liquide et dans ce cas il n'y a pas une grosse différence en ce qui concerne la façon de caractériser thermiquement les différents types de capteurs, les pertes étant plus faibles si le capteur a des dispositifs de diminution de pertes et/ou un renforcement du flux incident .

Nous avons constaté expérimentalement, cependant, que pour les concentrateurs le coefficient de pertes a normalement une dépendance linéaire avec la Température réduite, ce qui implique des modèles thermiques du second ordre.

D' autre part, l' inhomogénéité de la répartition du flux sur l'absorbeur a une grande influence car si l'absorbeur n'est pas symétrique, la résistance thermique entre la périphérie de l'absorbeur et le fluide n'est pas uniforme et la répartition de flux influencera le coefficient de transfert.

#### **4.5 – NORMES d'ESSAI ET DISPERSION DES RESULTATS**

##### **4.5.1 – NORMES d'ESSAI**

La Commission des Communautés Européennes, consciente des problèmes de dispersion et de non reproductibilité des essais de capteurs, a commandé à 21 laboratoires européens des essais de trois capteurs différents.

A. DERRICK a publié les résultats et leur analyse critique [ 7 ] et dans ce rapport les méthodes d'essai utilisées sont groupées de la façon suivante :

#### 4.5.1.1 – METHODE NBS – Régime quasi-stationnaire en ensoleillement naturel.

La norme du "National Bureau of Standards" [2] permet la détermination du rendement instantané d'un capteur en régime quasi-stationnaire, pour de différentes températures de fonctionnement.

Le suivi rigoureux de cette méthodologie peut conduire à des périodes d'essai extrêmement longues surtout au nord et au centre de l'Europe.

#### 4.5.1.2 – METHODE BSE – Essai combiné extérieur / intérieur

La norme de la "Bundesverband Solar Energy" [3], préconise un essai combiné intérieur et extérieur pour permettre des périodes d'essai beaucoup plus petites.

On effectue deux séries de mesures:

- Le facteur optique  $F' \eta_0$  est déterminé en ensoleillement naturel en régime quasi-stationnaire, le fluide n'étant jamais à plus de 10°C au dessus de la température ambiante.
- Les pertes thermiques globales ( $Q_L$ ) sont déterminées à l'intérieur en régime quasi-stationnaire.

La valeur du rendement instantané en ensoleillement artificiel sera donnée par :

$$\eta = F' \eta_0 - \frac{Q_L}{(A_a I)}$$

$A_a$  - aire d'ouverture  
 $I$  - flux solaire

Ces mesures doivent être répétées pour différentes valeurs de Flux.

#### 4.5.1.3 – METHODE AFNOR

La norme AFNOR P 50-501 pour la mesure des performances thermiques d'un capteur solaire, demande la détermination des rendements instantanés sous des conditions de test spécifiées, en régime quasi-stationnaire.

#### 4.5.1.4 - METHODE TRANSITOIRE

Le rendement instantané d'un capteur peut être déterminé quand le capteur est en train d'échanger de l'énergie avec l'extérieur [6].

L'avantage de cette méthode est que le nombre de journées de ciel clair nécessaires pour l'essai d'un capteur se trouve diminué.

Cette méthode exige aussi la détermination de la capacité thermique effective.

#### 4.5.2 - RECOMMANDATIONS POUR LE "ROUND ROBIN"

Pour permettre la comparaison des résultats des essais réalisés par les différents laboratoires, il y a eu un accord de principe sur une série de recommandations :

- a** - Le fluide caloporteur doit parcourir le capteur du bas vers le haut
- b** - Le débit du fluide caloporteur devait être de  $0.02 \text{ Kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .
- c** - L'inclinaison du capteur doit être de  $45 \pm 5^\circ$ .
- d** - Si la position du capteur est fixe, son azimuth doit être nul mais il est admis un demi-suivi du soleil, en azimuth.
- e** - L'élévation de température dans le capteur doit être comprise entre 1.5 et 15 K.
- f** - L'éclairement énergétique au niveau de l'ouverture du capteur doit être supérieur à  $600 \text{ W/m}^2$ .
- g** - L'angle d'incidence entre le rayonnement direct et la normale à la surface doit être inférieur à  $40^\circ$ .

4.5.3 - RESULTATS OBTENUS

Le tableau et la figure suivants nous donnent une idée de la dispersion obtenue.

LABO	RENDEMENT DU CAPTEUR			Méthode utilisée	Capacité thermique [kJ K <sup>-1</sup> ]
	$\eta_0$	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>		
1	0.80	0.72	-	Extérieur quasi-stationnaire	30.2 - 32.8
2	0.86	0.50	0.25	Extérieur quasi-stationnaire	
3	0.72	0.36	0.69	Extérieur quasi-stationnaire	
4	0.78	0.38	0.30	Extérieur quasi-stationnaire	
4	0.73	0.48	0.07	Simulateur solaire	
5	0.79	0.66	0.15	Simulateur solaire	
6	-	-	-	Capteur hors service	
7					
8	0.86	0.74	-	Extérieur quasi-stationnaire	58.1
9	0.82	0.68	-	Extérieur quasi-stationnaire	
10	0.70	0.22	0.33	Extérieur quasi-stationnaire	43.2
12	0.63	0.60	-	Extérieur quasi-stationnaire	
13	0.86	0.70	-	Extérieur quasi-stationnaire	
14	-	-	-	Capteur hors service	
15	0.79	0.52	0.15	Simulateur solaire	
16	0.82	0.51	0.39	Extérieur quasi-stationnaire	
17	0.80	0.74	-	Extérieur quasi-stationnaire	
18	0.76	0.45	-	Extérieur + intérieur	
19	0.85	0.40	0.32	Extérieur quasi-stationnaire	55.8

Tous les points 0.755 0.567 0.027

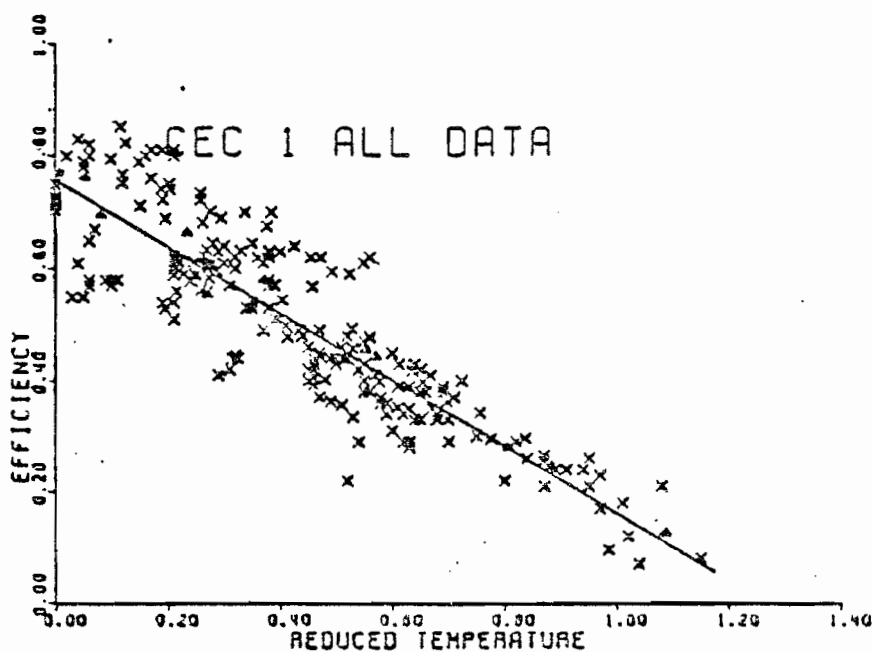


Figure 34 Dispersion des résultats d'essais d'un capteur ( Extrait de [7] )

#### 4.5.4 - DISCUSSION

Pour la caractérisation des capteurs à faible concentration, nous avons déjà vu que les essais en ensoleillement artificiel étaient difficiles à réaliser par les difficultés de caractérisation de l'INTRANT.

La méthode d'essai de la BSE n'est pas adaptée aux essais des capteurs à faible concentration parce qu'elle est basée sur une partie de l'essai en ensoleillement artificiel.

En ce qui concerne les autres normes de caractérisation en régime quasi stationnaire, la différence principale est sur :

- les critères de stabilité, notamment du flux solaire
- les seuils imposés de flux solaire, flux infra-rouge et vitesse du vent

La dispersion des résultats obtenus montre que les normes considérées ne sont pas satisfaisantes malgré les recommandations supplémentaires qui ont été formulées.

Sans mettre en cause la qualité des mesures, la seule explication possible pour cette dispersion sont les différences de l'environnement, notamment le flux infra-rouge déjà pris en compte avec le TRE et l'influence du vent que nous traiterons par la suite.

### 4.6 - INFLUENCE DU VENT

#### 4.6.1 - POSITION DU PROBLEME

Le modèle thermique le plus répandu est :  $\eta = F' (\tau\alpha) - F' U_L (T_{MF} - T_{AMB}) / I$

- |          |                         |                |   |
|----------|-------------------------|----------------|---|
| $F'$     | - Facteur d'irrigation  | $(\tau\alpha)$ | - Rendement optique avec réflexions multiples |
| $U_L$    | - Coefficient de pertes |                |   |
| $T_{AR}$ | - Température ambiante  | $T_{MF}$       | - Température moyenne du fluide               |
| $I$      | - Flux Solaire          |                |   |

Normalement on fait l'une des deux hypothèses suivantes:

$$U_L = \text{Constante} \quad \text{ou} \quad U_L = U_{L0} + U_{L1} \Delta T$$

Aucune de ces deux hypothèses n'est correcte car on devrait considérer soit les pertes radiatives ( terme en  $T^4$  ) soit la Température Résultante d'Environnement et d'autre part l'influence du vent n'est pas négligeable.

P. GALLET [29] a suggéré la décomposition du coefficient de pertes en deux termes, l'un dépendant de  $\Delta T$ , l'autre proportionnel à la vitesse du vent  $h = f_1(\Delta T) + f_2(ve)$

Selon W. H. McAdams [35], le coefficient d'échange en régime turbulent (dans le cas du capteur  $Gr = 1.7 \cdot 10^{10}$ ), serait proche de :

$$h = 1.52 \Delta T^{1/3} \quad [W m^{-2} K^{-1}]$$

D'après WATMUFF [39] le terme du vent,  $f_2(ve)$ , serait de l'ordre de  $3 ve$  (m/s) au lieu de  $3.8 ve$  proposés par MacAdams [35].

Nous pouvons donc considérer  $U_L = K [1.52 \Delta T^{1/3} + 3 ve]$

$K$  - tient compte de l'éventuelle existence d'un boîtier, des pertes par l'arrière et par le bord

$$\eta = F'(\tau\alpha) - 1.52 F' K I^{1/3} T_{RED}^{4/3} - 3 F' K ve T_{RED} \quad (1)$$

$T_{RED} = (T_{MF} - T_{RE}) / I$  - car nous avons déjà vu que  $T_{RE}$  doit remplacer  $T_{AMB}$

#### 4.6.2 - APPLICATION

Dans le modèle de l'équation (1) nous avons deux paramètres  $ve$  et  $I$

Considérons un capteur dont on connaît deux points de fonctionnement par vent nul:

$$\eta(T_{RED}=0) = 0.85 \quad \eta(T_{RED}=0.04) = 0.37$$

Si  $ve = 0$  l'équation (1) devient:

$$\eta = F'(\tau\alpha) - 1.52 F' K I^{1/3} T_{RED}^{4/3} \quad (2)$$

Considérons les données correspondantes aux Figures 35 à 40 :

**Familles de courbes pour  $ve = 0$  ; 2 et 5 m/s**

Figure 35  $I = 1000 W/m^2$

Figure 36  $I = 800 W/m^2$

Figure 37  $I = 500 W/m^2$

### Familles de courbes pour $I = 1000 ; 800$ et $500 \text{ W/m}^2$

Figure 38  $V_e = 0 \text{ m/s}$

Figure 39  $V_e = 2 \text{ m/s}$

Figure 40  $V_e = 5 \text{ m/s}$

Nous avons lissé les données par la méthode des moindres carrés et nous avons constaté qu' en première approche nous pouvons représenter chaque famille de courbes ( des trois premières figures ), en considérant un modèle du type  $F' U_L = K_1 + K_2 V_e$  :

$$I = 1000 \text{ W/m}^2 \quad F' U_L = 13.2 + 5.99 V_e$$

$$I = 800 \text{ W/m}^2 \quad F' U_L = 12.3 + 6.06 V_e$$

$$I = 500 \text{ W/m}^2 \quad F' U_L = 10.4 + 6.32 V_e$$

Le modèle simplifié proposé sera :  $\eta = 0.85 - ( 12.5 + 6.03 V_e ) T_{RED}$

Ce modèle représente bien les résultats présentés dans Engineer's Guide to Solar Energy [34] , pour un capteur sans couverture, et comme ordre de grandeur nous pouvons constater que le terme du vent est à peu près la moitié du coefficient de pertes sans vent .

#### 4.6.3 - CONCLUSION

Nous pouvons conduire l'essai selon les normes existantes mais , en protégeant le capteur du vent , nous déterminons les coefficients du modèle par vent nul ( équation (2) ).

Pour faciliter ce calcul nous avons fait un changement de variables:  $X = T_{RED}^{4/3}$

$$\eta = A_0 + A_1 X \quad \text{et} \quad F' K = A_1 / ( 1.52 I^{1/3} )$$

le modèle proposé sera alors:  $\eta = F' ( \tau \alpha ) - 1.52 F' K I^{1/3} T_{RED}^{4/3} - 3 F' K V_e T_{RED}$

Nous pouvons alors déterminer des familles de points, par exemple à  $850 \text{ W/m}^2$ , ayant comme paramètre la vitesse du vent ( par exemple 0 ; 2 et 5 m/s ).

En lissant ces points par des droites nous obtenons  $F' U_L = f( V_e )$ .

Le modèle simplifié proposé sera  $\eta = F' ( \tau \alpha ) - ( K_1 + K_2 V_e ) T_{RED}$

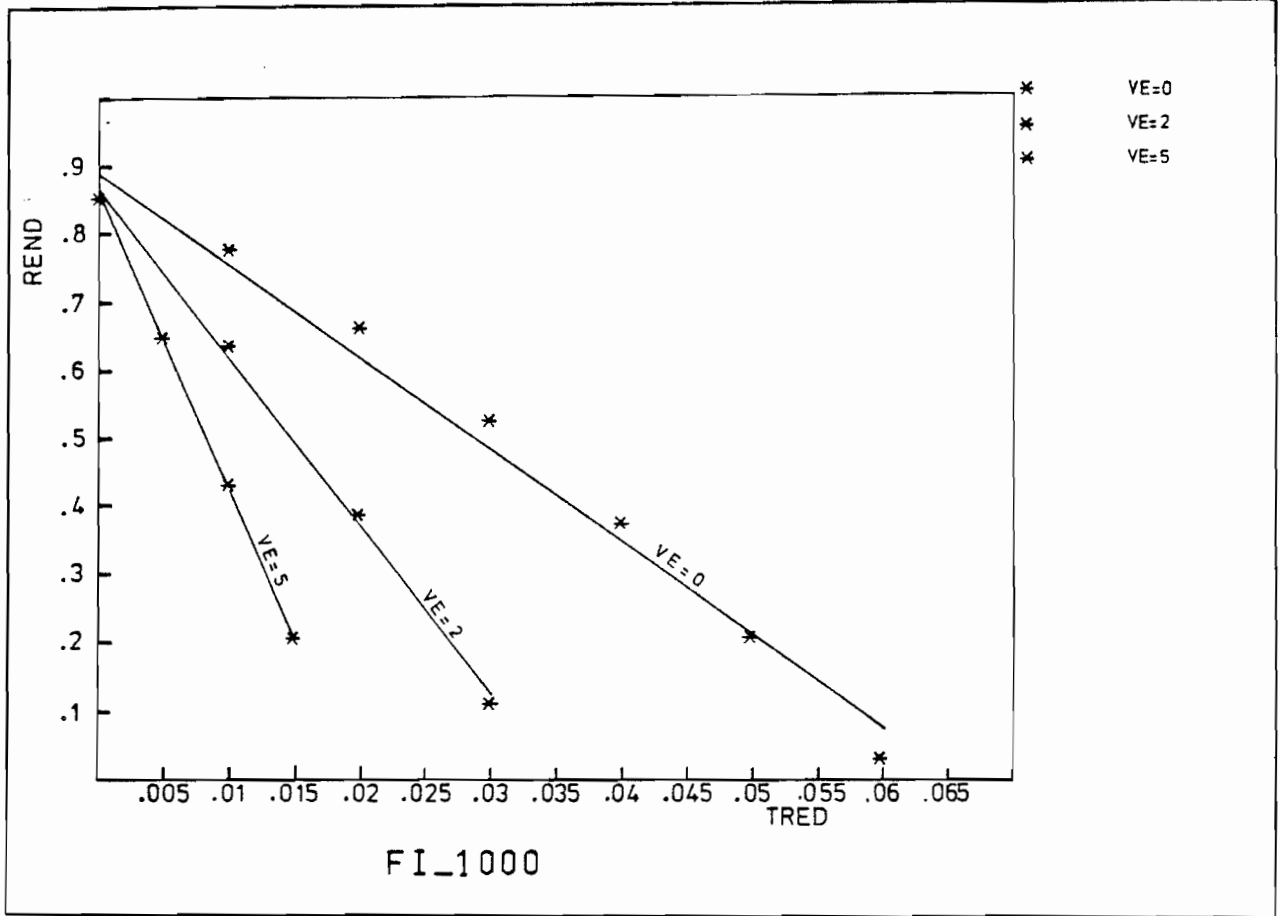


Figure 35 Influence du vent - Flux Solaire = 1000 W/m²

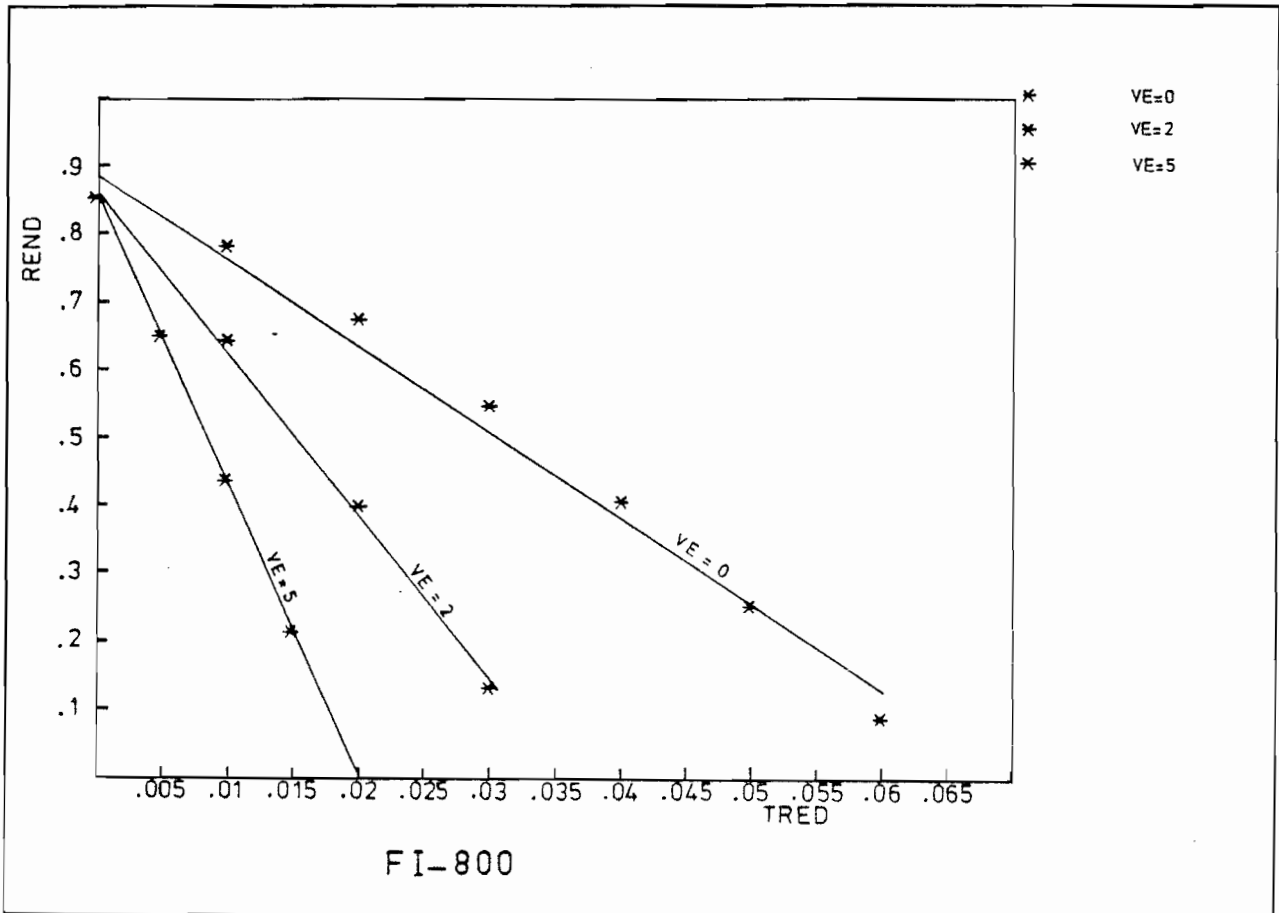


Figure 36 Influence du vent - Flux Solaire = 800 W/m²

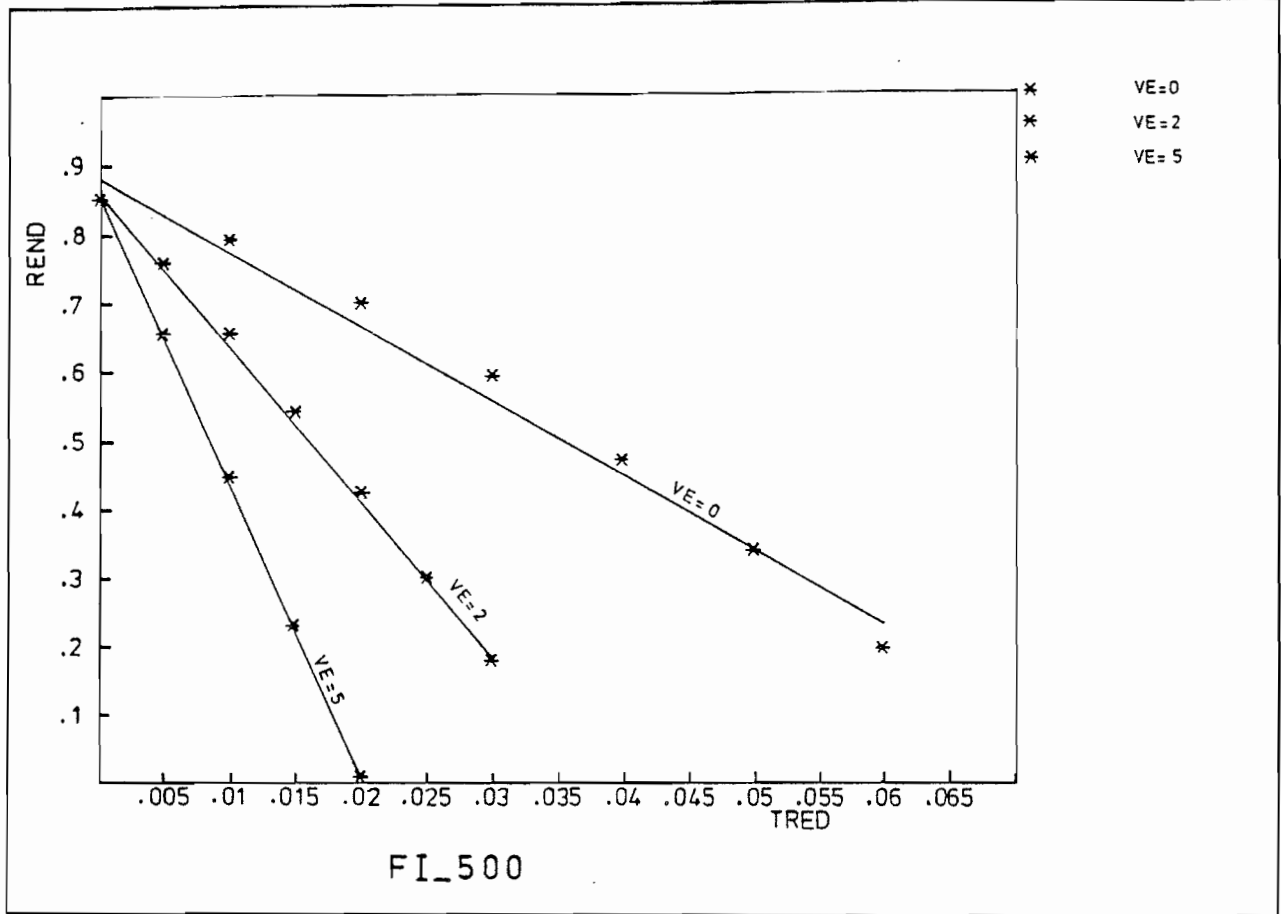


Figure 37 Influence du vent - Flux Solaire = 500 W/m<sup>2</sup>

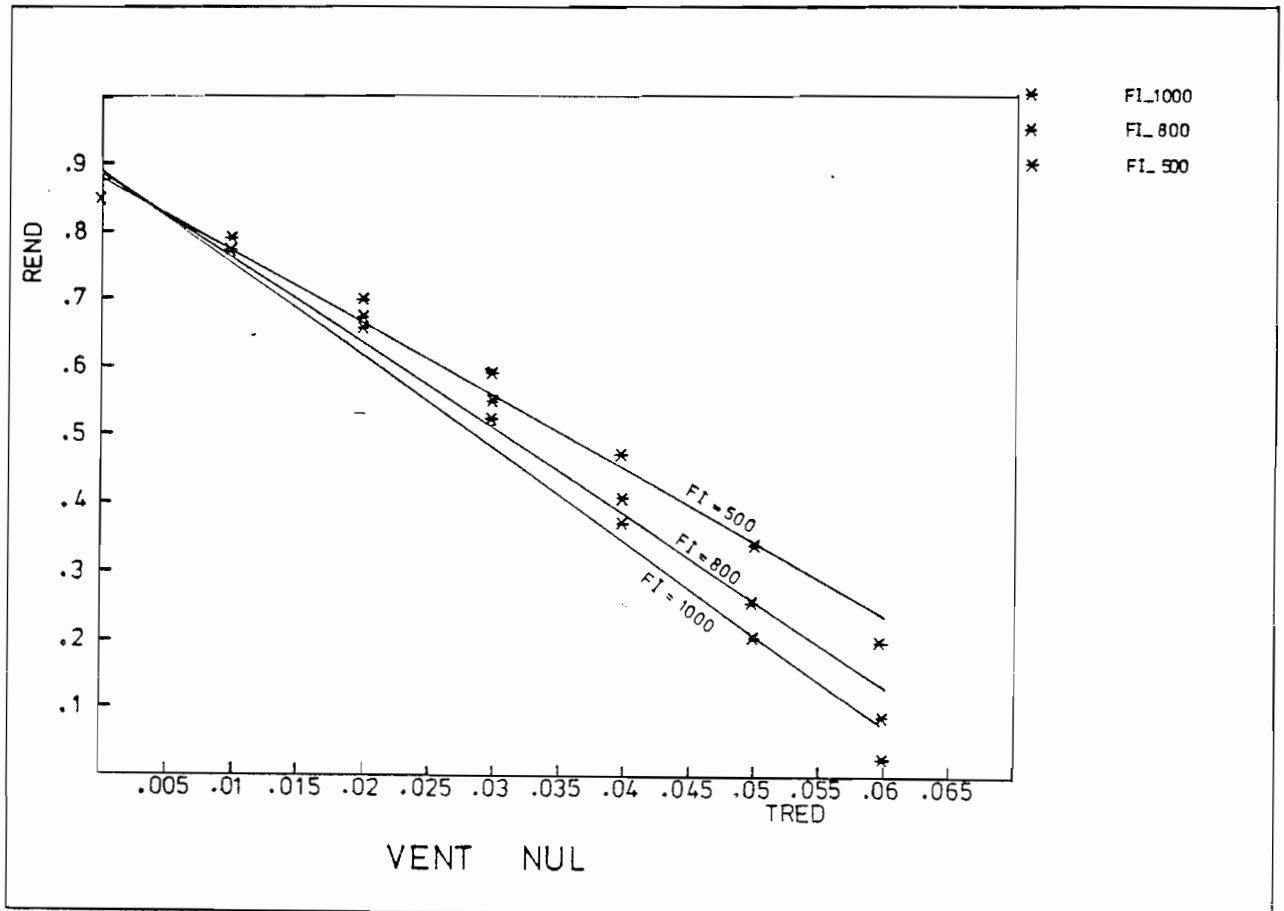


Figure 38 Influence du vent - Vitess du vent 0 m/s

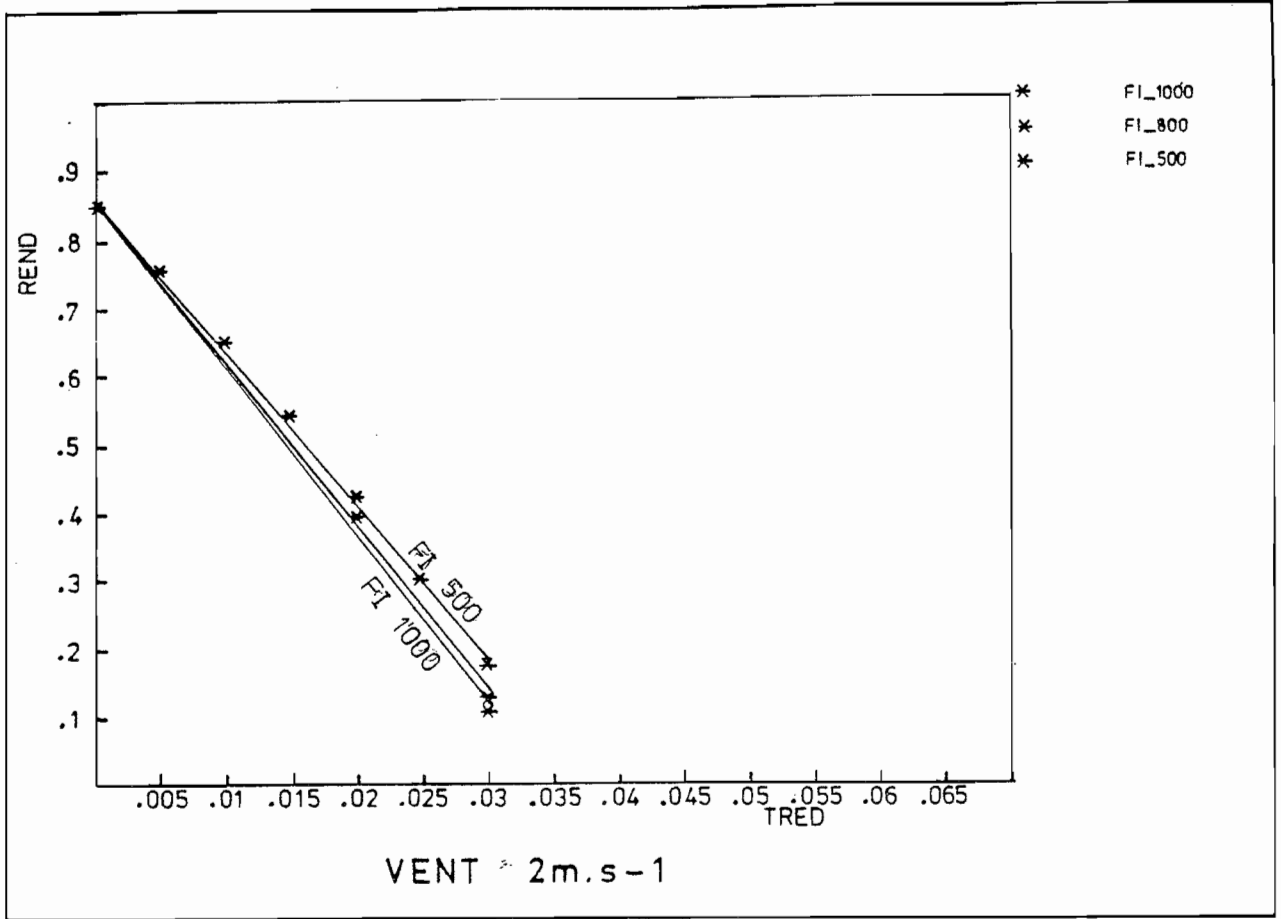


Figure 39 Influence du vent - Vitesse du vent 2 m/s

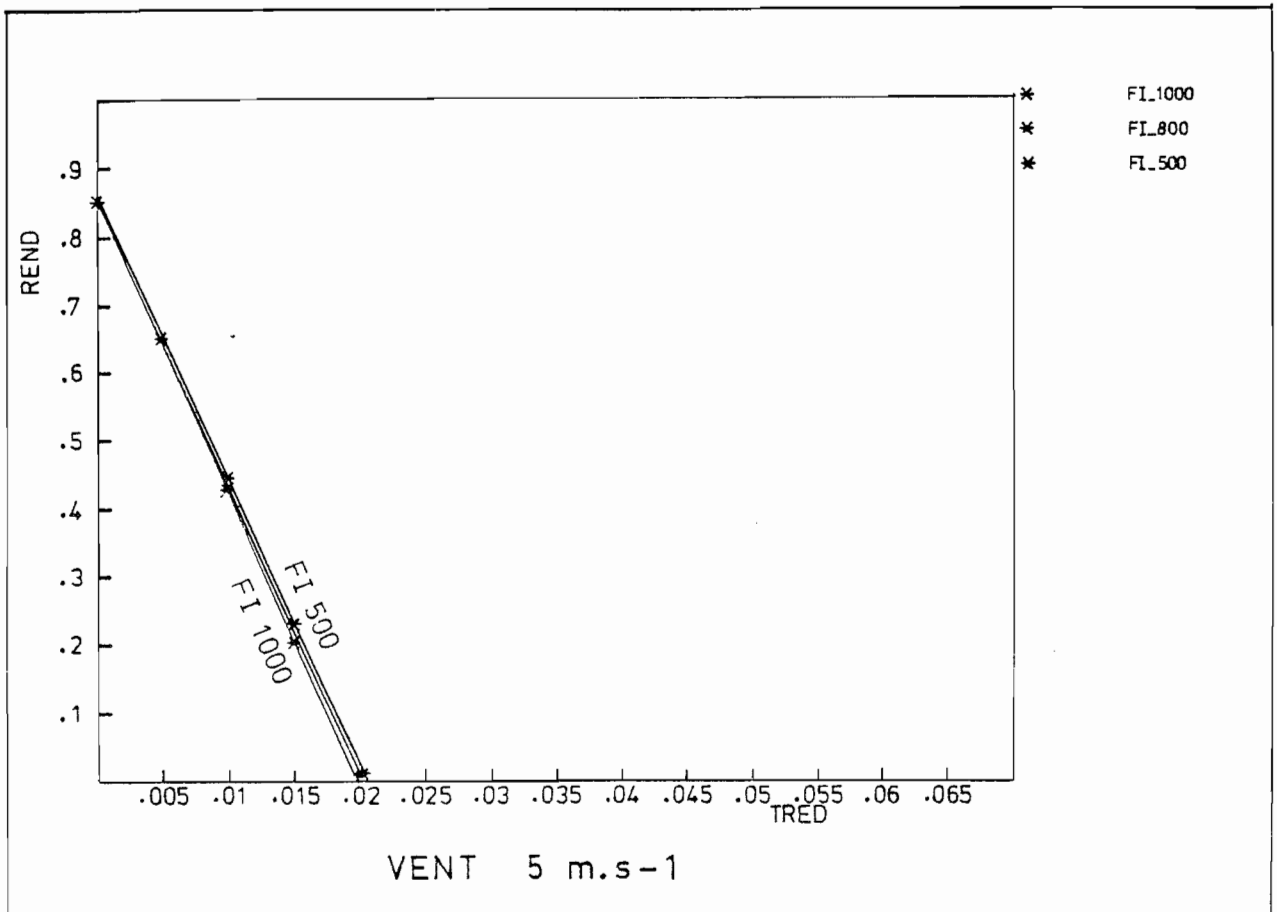


Figure 40 Influence du vent - Vitesse du Vent 5 m/s

### III - APPLICATION AU CAS DES CONCENTRATEURS PARABOLIQUES COMPOSES

#### 1 - PRESENTATION DES CAPTEURS

##### 1.1 - INTRODUCTION

Cette étude a pour but la caractérisation d'un CPC à tubes sous vide et elle est la suite d'une autre étude menée sur des capteurs utilisant les mêmes tubes mais avec un plan diffusant en arrière.

Nous présenterons les caractéristiques des deux concentrateurs étudiés et les résultats expérimentaux obtenus.

##### 1.2 - DESCRIPTION DES CAPTEURS

**Partie Optique** La géométrie du réflecteur est du type Parabolique Composé avec un absorbeur cylindrique.

La forme du réflecteur a été obtenue par moulage et sur cette forme nous avons placé soit une feuille d'aluminium poli ( épaisseur = 0.4 mm ), pour le Capteur 1, soit une feuille de polyester aluminisé avec une épaisseur de 17.5  $\mu$ , pour le Capteur 2.

Le profil est tronqué et la Concentration géométrique réelle est de 1.93 x , contre une Concentration de 2 x du Concentrateur théorique, mais le tronquage permet une réduction de 23 % de la surface du miroir. Nous étudierons ceci en détail dans le chapitre III 2.

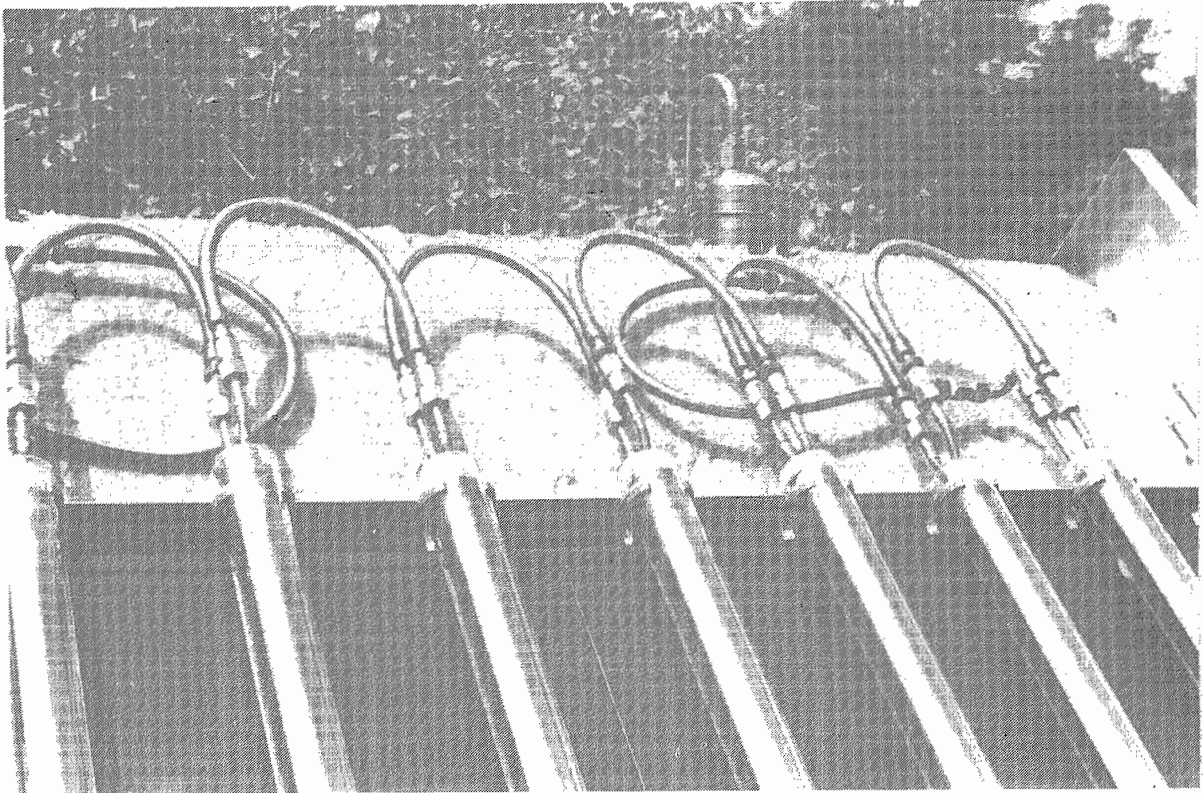
Le Capteur 1 ( réflecteur en aluminium poli ) dispose aussi d'une couverture transparente en Plexiglas, de 4 mm d'épaisseur, avec un coefficient de transmission de 0.85 ( 0.25 à 2.5  $\mu$  ).

**Absorbeur** Chaque capteur a 6 tubes sous-vide fabriqués au LEMM / CEN GRENOBLE et les tubes sont raccordés en série. Le système retenu pour l'extraction ( d'après les essais du capteur à plan diffusant ), est une épingle en cuivre.

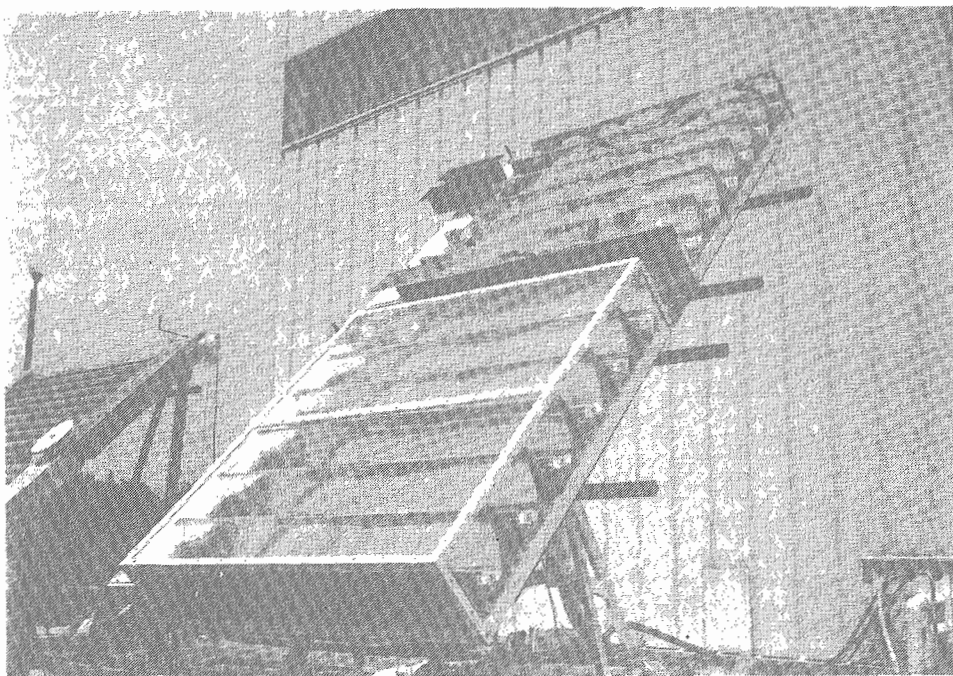
Sur la figure 41 nous pouvons voir un détail du raccordement du capteur à plan diffuseur et sur la figure 42 nous présentons le capteur 1 ( bas ) et le capteur 2 ( haut ).

Le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide est assuré par l'interposition de laine de cuivre.

Le tableau de la page 87 synthétise les caractéristiques de ces deux capteurs.



**Figure 41** *Raccordement des tubes sous vide  
( Cas d'un capteur avec un diffuseur plan en arrière )*



**Figure 42** *CAPTEUR 1 ( bas ) et CAPTEUR 2 ( haut )*

CARACTERISTIQUES	CAPTEUR 1	CAPTEUR 2
<b>GEOMETRIE</b>		
Longueur du tube	1.4 m	
Longueur de l'auge	1.48 m	
Surface d'ouverture	2.04 m <sup>2</sup>	
Diamètre ext. enveloppe	48 mm	
Diamètre ext. de l'absorbeur	38 mm	
Epaisseur des deux tubes	2 mm	
Distance Axe/Ouverture	100 mm	
<b>PARTIE OPTIQUE</b>		
<u>Couverture</u>		
Epaisseur	4 mm	
Coefficient d'extinction	0.15 cm <sup>-1</sup>	
Indice de réfraction	1.52	
<u>Miroirs</u>		
Coefficient de réflexion	0.77	0.75
<u>Absorbeur</u>		
Coefficient d'absorption	0.96	
Coefficient d'émission	0.16	
<b>PARTIE THERMIQUE</b>		
K <sub>T/F</sub>	Coefficient d'échange Tube/Fluide	40 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
K <sub>LIAISONS</sub>	Coefficient de pertes des liaisons	0.4 W K <sup>-1</sup>
K <sub>BOITIER</sub>	Coefficient de pertes du boîtier	10 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>

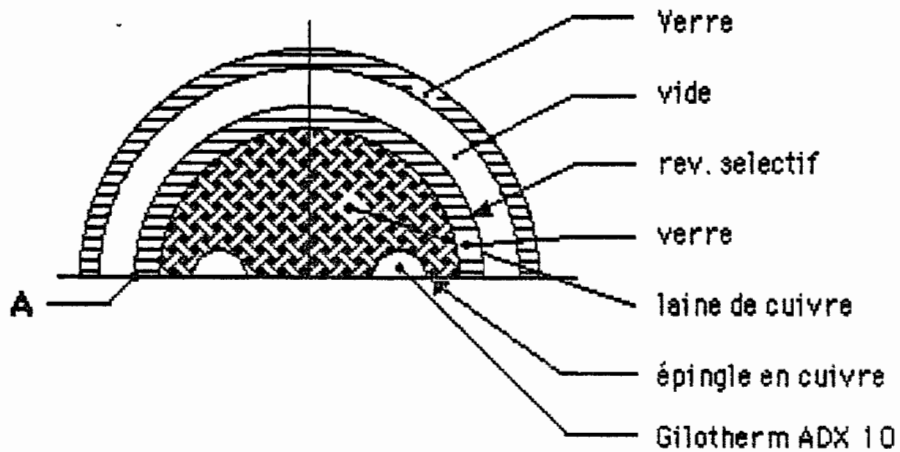


Figure 43 SCHEMA DE L'ABSORBEUR

### 1.3 – SURFACE REFLECHISSANTE

Nous allons maintenant, définir la surface réfléchissante pour un absorbeur cylindrique.

Le profil est conçu de telle sorte que pour l'angle limite d'incidence ( $\theta_{\text{pt}} = \theta_a$ ) le rayon lumineux soit tangent à l'absorbeur.

D'après WINSTON [ 14] les équations définissant ce profil sont :

$$\begin{cases} X = R \sin \theta - R_0 \cos \theta \\ Y = -R \cos \theta - R_0 \sin \theta \end{cases}$$

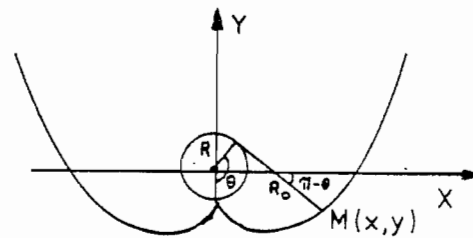


Figure 44 Concentrateur parabolique composé

Le profil se décompose en deux courbes, une développante de cercle et un arc de parabole

$$0 < \theta < \theta_a + \pi/2 \quad \theta_a - \text{Angle d'acceptance}$$

$$R_0(\theta) = R \times \theta$$

$$\theta_a + \pi/2 \leq \theta \leq 3\pi/2 - \theta_a$$

$$R_0(\theta) = R \frac{[\theta + \theta_a + \pi/2 - \cos(\theta - \theta_a)]}{1 + \sin(\theta - \theta_a)}$$

Comme l'absorbeur est à l'intérieur d'un tube en verre il y a un jeu entre l'enveloppe et l'absorbeur et ce jeu entraîne des pertes optiques.

Nous avons étudié deux solutions de modification géométrique de la surface réfléchissante pour minimiser ces pertes [38].

Sachant que :  $\alpha = \arccos(R_1/R_2)$  et que  $\beta = \tan \alpha - 2\alpha$

$R_1$  = Rayon extérieur de l'absorbeur

$R_2$  = Rayon intérieur de l'enveloppe

les équations définissant le profil modifié sont les suivantes :

$$2\alpha \leq \theta \leq \theta_a + \pi/2 \quad \theta_a - \text{Angle d'acceptance}$$

$$Ro(\theta) = R_1 (\theta + \beta)$$

$$-\theta_a + \pi/2 \leq \theta \leq 3\pi/2 - \theta_a$$

$$Ro(\theta) = R_1 \frac{[\theta + \theta_a + \pi/2 + 2\beta - \cos(\theta - \theta_a)]}{1 + \sin(\theta - \theta_a)}$$

Le profil ainsi obtenu est relativement différent ( Fig 58) et la concentration géométrique maximale est plus faible :

$$C'_{\max} = \frac{\pi + \beta}{\pi} C_{\max} \quad (\beta \text{ est négatif})$$

Dans le chapitre 2.2 MODELE OPTIQUE nous verrons l'influence de ces modifications sur la répartition de flux sur l'absorbeur.

## 2 - MODELE OPTOTHERMIQUE

### 2.1 - INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons modéliser analytiquement un capteur parabolique composé.

Cette modélisation implique la définition d'un modèle de calcul décrivant le comportement optique du capteur et d'un autre modèle de calcul décrivant son comportement thermique.

La modélisation optique nous a permis de constater que la surface réfléchissante provoque des pics de flux et ceci a imposé l'utilisation d'un modèle thermique permettant de prendre en compte l'asymétrie des conditions aux limites.

Ce modèle, basé sur un calcul par éléments finis, sera décrit plus loin. Il permettra de calculer les coefficients d'échange entre l'absorbeur et le fluide, tenant compte de ces pics de flux.

Le modèle optique utilisé fait l'objet du code CHAOPT [22] et le modèle analytique complet a été validé avec des tests du capteur CPC complet.

Il est alors possible de calculer les performances à court et à long terme et nous avons validé le modèle en comparant les performances journalières calculées avec les performances journalières mesurées.

Le même code de calcul permet le calcul des températures de stagnation du capteur.

Les deux composantes du modèle global qui décrit le comportement du capteur sont incorporées dans le code de calcul de prévision des performances ( Code CPC ).

Dans le Chapitre III 5 nous ferons une application de ce code de calcul pour la prévision des performances annuelles d'un champ de capteurs.

## 2.2 – MODELE OPTIQUE

### 2.2.1 – SYSTEME à 2 DIMENSIONS

Le code de calcul CHAOPT est du type Ray-tracing, développé pour l'étude des capteurs du type WINSTON et il permet non seulement de calculer la transmission optique, d'un système 2D général travaillant par réflexion mais aussi de suivre chaque rayon de la surface d'entrée jusqu'à l'absorbeur, après avoir éventuellement traversé une enveloppe transparente.

**Principe général** : On considère un faisceau de rayons parallèles arrivant dans la surface d'entrée qui est découpée en  $n$  intervalles ( $n$  de l'ordre de 100 à 500 rayons ).

Nous avons considéré que l'énergie cumulée de tous les rayons était unitaire et pour cette raison chaque rayon apporte une énergie égale à  $1/n$ .

Connaissant l'incidence des rayons et leur position d'entrée dans le système, le code CHAOPT va suivre chaque rayon jusqu'à ce qu'il atteigne la surface de l'absorbeur.

La surface réfléchissante comprend plusieurs surfaces, décrites par un ensemble de points  $(X_i, Y_i)$ , ou par une équation mathématique.

Partant du point  $X_0^i, Y_0^i$ , dans la direction  $V_x^o, V_y^o$ , le rayon frappe une surface réfléchissante ou l'absorbeur.

Le code CHAOPT sélectionne parmi les surfaces, la surface réellement concernée ( problème des masques ) et calcule :

- le point d'intersection du rayon avec la surface réelle  $X_{i,j}, Y_{i,j}$
- la normale à la surface en ce point  $N_{x,j}, N_{y,j}$

Le rayon réfléchi est défini par la relation :

$$\vec{r}'' = \vec{r} - 2(\vec{n} \cdot \vec{r})\vec{n}$$

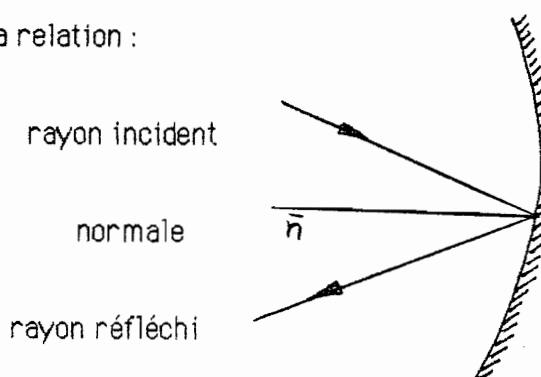


Figure 45 Surface réfléchissante

L'énergie élémentaire réfléchie vaut:

$$T_i = T_i \times \rho_i \quad \rho_i \text{ coefficient de réflexion spéculaire de la surface}$$

Si le rayon atteint l'absorbeur, on se contente de calculer  $X_i^j$   $Y_i^j$

et l'énergie absorbée vaut alors

$$A_i = T_i \alpha_i \quad \alpha_i \text{ coefficient d'absorption de l'absorbeur}$$

Ce calcul est effectué pour chaque rayon frappant la surface d'entrée et la transmission optique sera :

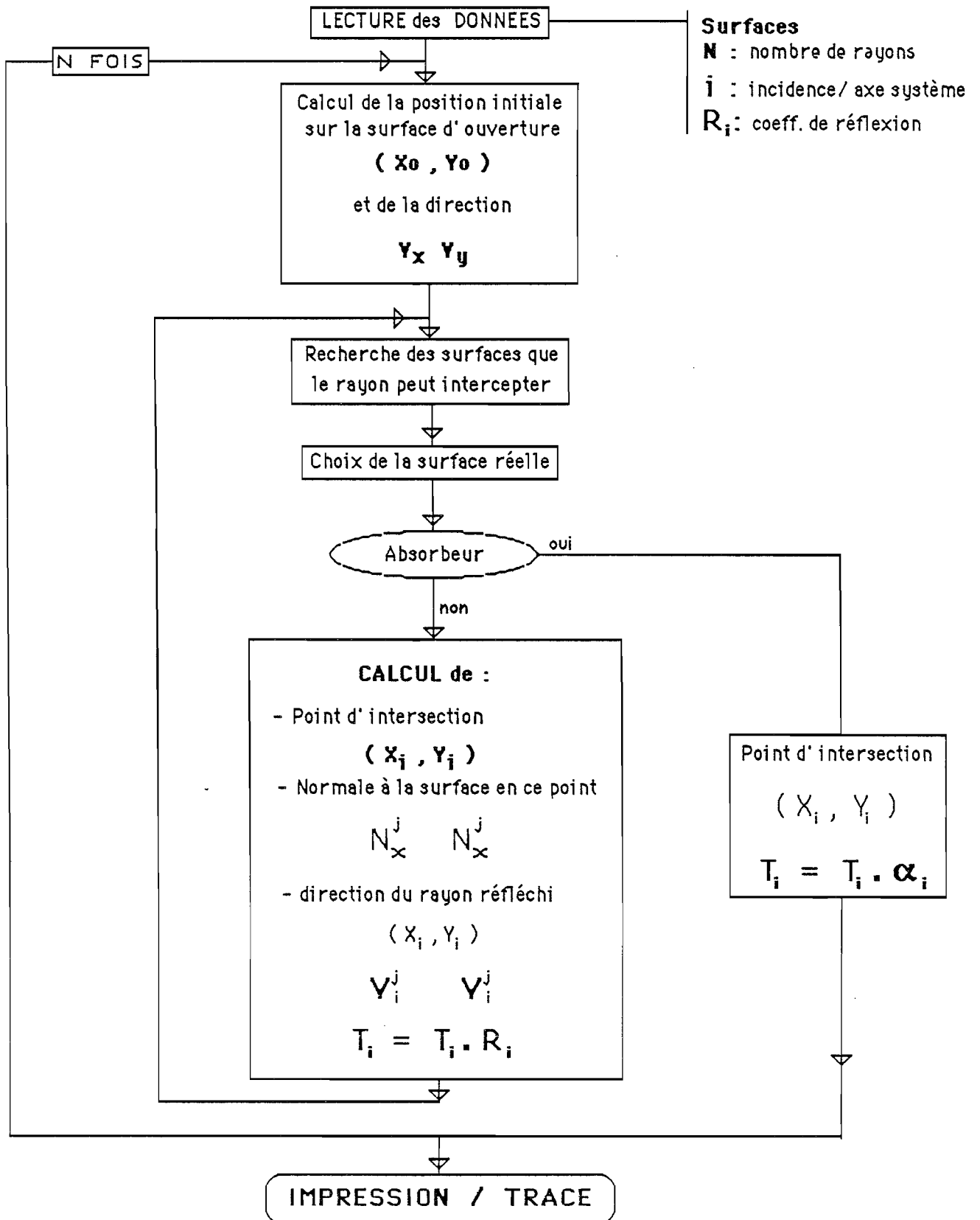
$$T_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N A_i$$

Le code de calcul CHAOPT fournit également :

- le profil du flux incident sur l'absorbeur
- le nombre moyen de réflexions pour l'ensemble des rayons

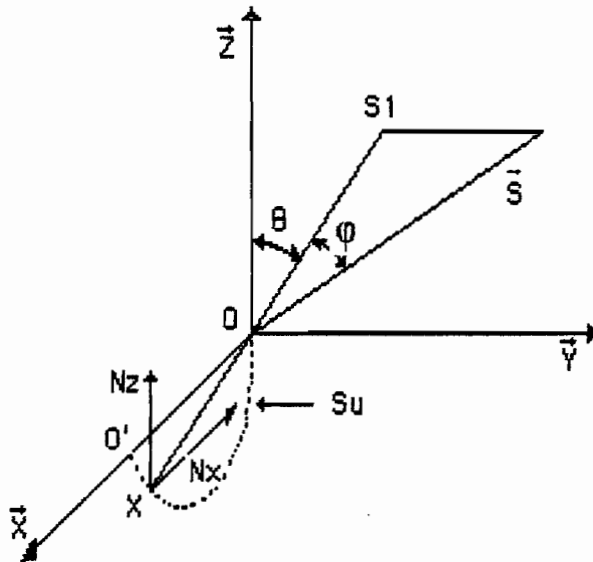
Dans la page suivante nous présentons l'organigramme du code de calcul CHAOPT

**ORGANIGRAMME du CODE CHAOPT**



2.2.2 - GENERALISATION DU CODE CHAOPT de 2 à 3 DIMENSIONS

Si on considère que le système à étudier est infiniment grand selon  $\overline{OY}$  ( voir figure 46 ), on peut raisonner de la façon suivante :



**Figure 46**  
*Système d'axes*

Soit un rayon  $\overline{r} = \overline{OS}$  arrivant dans le plan d'ouverture  $XOY$  du système optique :

$$\overline{r} = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \varphi \\ \cos \varphi \cos \theta \end{pmatrix}$$

La normale à la surface sera :

$$\overline{n} = \begin{pmatrix} n_x \\ 0 \\ n_z \end{pmatrix}$$

Le rayon réfléchi  $\overline{r}''$  par la surface au point M s'écrira :

$$\overline{r}'' = \overline{r} - 2(\overline{n} \cdot \overline{r}) \overline{n}$$

$$\overline{r}'' = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} - 2(n_x r_x + n_z r_z) \begin{pmatrix} n_x \\ 0 \\ n_z \end{pmatrix}$$

soit :

$$\begin{cases} r''_x = r_x - 2(n_x r_x + n_z r_z) n_x \\ r''_y = r_y \\ r''_z = r_z - 2(n_x r_x + n_z r_z) n_z \end{cases}$$

et finalement nous obtenons le système d'équations (1)

$$\begin{aligned} r''_x &= \cos \varphi (\sin \theta - 2 (n_x \sin \theta + n_z \cos \theta) n_x) \\ r''_y &= \sin \varphi \\ r''_z &= \cos \varphi (\cos \theta - 2 (n_x \sin \theta + n_z \cos \theta) n_z) \end{aligned}$$

Quand on raisonne en 2D, dans le plan XOZ (cas du calcul CHAOPT), on peut écrire en prenant en compte le vecteur  $\bar{r}_2 // \bar{OS}_1$

$$\bar{r}_2 = \begin{vmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{vmatrix}$$

Au point M : 
$$\bar{r}_2'' = \bar{r}_2 - 2 (\bar{n} \cdot \bar{r}_2) \bar{n}$$

et nous obtenons le système d'équations (2) :

$$\begin{aligned} r_2''_x &= \sin \theta - 2 (n_x \sin \theta + n_z \cos \theta) n_x \\ r_2''_z &= \cos \theta - 2 (n_x \sin \theta + n_z \cos \theta) n_z \end{aligned}$$

Nous pouvons donc déduire le système d'équations (1) à partir du système d'équations (2), en utilisant les relations:

$$\begin{cases} r''_x = \cos \varphi r_2''_x \\ r''_y = \sin \varphi \\ r''_z = \cos \varphi r_2''_z \end{cases}$$

Le vecteur  $\bar{r}''_{3D} = \begin{vmatrix} r''_x \\ r''_y \\ r''_z \end{vmatrix}$  est donc colinéaire à  $\bar{r}_2'' = \begin{vmatrix} r_2''_x \\ r_2''_z \end{vmatrix}$

**Le traitement optique des chemins parcourus par les rayons est donc le même, si on raisonne sur la projection de ces rayons dans le plan transversal d'un système optique infiniment long dans l'autre axe.**

Il faut également tenir compte dans le traitement de CHAOPT de la transmission de l'enveloppe transparente éventuellement mise autour de l'absorbant :

Dans le cas 2D 
$$\cos i_{2D} = (n_x \sin \theta + n_z \cos \theta)$$

alors que dans le cas du 3D 
$$\cos i_{3D} = \cos \varphi (n_x \cos \theta + n_z \cos \theta) = \cos \varphi \cos i_{2D}$$

$$\cos i_{3D} = \cos \varphi \cos i_{2D} \quad \text{relation (3)}$$

Connaissant  $i_{2D}$ , issu du calcul CHAOPT et les angles  $\theta$  et  $\varphi$  directeurs des rayons incidents, on calculera la transmission de l'enveloppe en prenant en compte  $i_{3D}$  défini par (3).

### 2.2.3 - APPLICATIONS

Nous avons utilisé le code de calcul CHAOPT pour obtenir :

- La répartition de flux sur l'absorbeur.
- L'angle d'incidence entre le rayon incident et la normale à la surface de l'absorbeur.
- La transmission optique du système ainsi que le nombre moyen de réflexions pour une incidence donnée.

Les pertes optiques par le jeu ( gap ) entre l'absorbeur et le réflecteur peuvent être importantes (  $\approx 20\%$  ). Une bonne conception du système doit minimiser les pertes par le jeu et d' autre part, pour un CPC par exemple, la partie supérieure du profil ne joue pas un rôle important.

Pour les tubes sous-vide fabriqués à Grenoble, nous allons considérer trois hypothèses :

- 1 - **Profil théorique** ( Quantification des pertes par le jeu ) [14]
- 2 - **Profil sans jeu** ( étude de deux solutions ) [38]
- 3 - **Profil théorique tronqué** [17]

Dans les calculs nous avons supposé le coefficient de réflexion des miroirs, égal à 0.85 et sur les tableaux suivants nous montrons les résultats du calcul de la transmission optique et le nombre moyen de réflexions moyen pour les différentes incidences.



### TRANSMISSION OPTIQUE

ANGLE de INCIDENCE	PROFIL THEORIQUE	PROFIL SANS JEU	PROFIL THEORIQUE Tronqué
0	0.75	0.80	0.80
5	----	0.82	----
10	0.80	----	----
20	0.84	0.87	----
28	0.79	0.83	0.83
30	----	0.45	----

## NOMBRE MOYEN DE REFLEXIONS

ANGLE de INCIDENCE	PROFIL THEORIQUE	PROFIL SANS JEU	PROFIL THEORIQUE Tronqué
0	1.18	1.293	1.29
5	----	1.287	----
10	1.18	----	----
20	0.94	0.86	----
28	0.88	0.92	0.92
30	----	0.53	----

La Figure 47 résume les résultats de la transmission optique pour les calculs effectués:

- (1) Le profil du miroir entre A et B est du type 
- (2) Le profil du miroir entre A et B est du type 

Pour ces deux cas :

$$C'_{MAX} = 2 (\pi - 0.543) / \pi = 1.65$$

Ces deux solutions donnent des résultats identiques.

Pour la solution (1) les pertes optiques par le jeu sont inférieures à 7 % pour un angle d'incidence de 0° et avec cette géométrie d'absorbeur.

Les Figures 51, 53, 55 et 57 montrent la répartition de flux sur l'absorbeur pour différents angles d'incidence et pour le profil théorique.

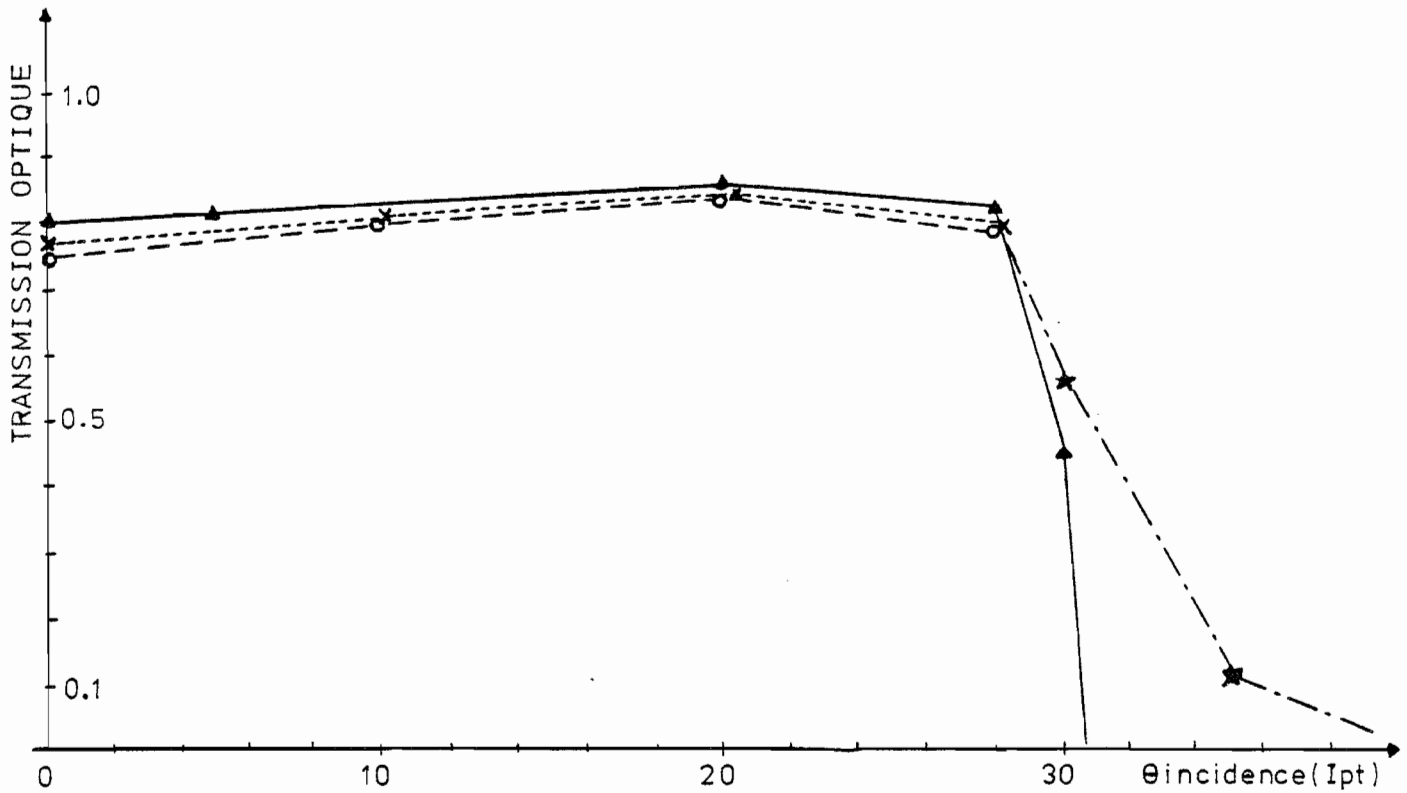
L'abscisse représente le déplacement sur l'absorbeur, l'origine étant la partie inférieure de l'absorbeur qui est décrit dans le sens inverse du sens trigonométrique.

L'intensité des pics croît quand  $l_{pt}$  varie de 0 à l'angle d'acceptance et localement la concentration énergétique atteint **6.6** pour  $l_{pt} = 0^\circ$  et **11** pour  $l_{pt} = 28^\circ$ .

Les figures 50, 52, 54 et 56 montrent le parcours des rayons pour différentes incidences.

### TRANSMISSION OPTIQUE DES MIROIRS EN FONCTION DE L' ANGLE D' INCIDENCE PROJETE ( $I_{pt}$ )

(VALEURS CALCULÉES)



- ▲ PROFIL SANS JEU (type 1)
- + PROFIL SANS JEU (type 2)
- PROFIL THEORIQUE
- ★ PROFIL THEORIQUE TRONQUE

**Figure 47** *Transmission optique en fonction de l' angle d' incidence*

Si le profil théorique est tronqué (  $X = 115.4$   $Y = 158.6$  ) la concentration sera de 1.93 et le calcul nous donne les valeurs de transmission suivantes :

ANGLE d' INCIDENCE	0°	28°	30°	35°	40°
TRANSMISSION	0.76	0.825	0.55	0.12	0.03
N <sup>bre</sup> de REFLEXIONS	1.22	0.920	----	----	----

Les Figures 59 à 63 montrent la répartition de flux sur l'absorbeur pour la solution sans pertes et on peut constater que les pics sont plus élevés dans cette solution.

Le calcul permet de comparer les différentes solutions pour le système optique de ce CPC que nous désignerons par **TYPE 2**.

En ce qui concerne la transmission optique des miroirs, compte tenu de la géométrie du tube absorbeur, les pertes optiques par le jeu atteignent 7 % avec le profil théorique du CPC Type 2.

Avec les tubes Corning-Glass, que nous avons utilisés pour le CPC Type 1, les pertes par le jeu atteignaient 20 %.

La troncation du miroir [17] permet de gagner un peu sur le temps d'utilisation du capteur sans provoquer des pertes significatives.

Les deux solutions " sans pertes " , (1) et (2) [38], quoiqu' ayant des transmissions supérieures aux précédentes, ont des concentrations plus faibles pour le même angle d'acceptance.

Dans la figure 49 on présente une visualisation du comportement de la surface réfléchissante par rapport à un faisceau parallèle, pour une incidence légèrement supérieure à l'angle d'acceptance.

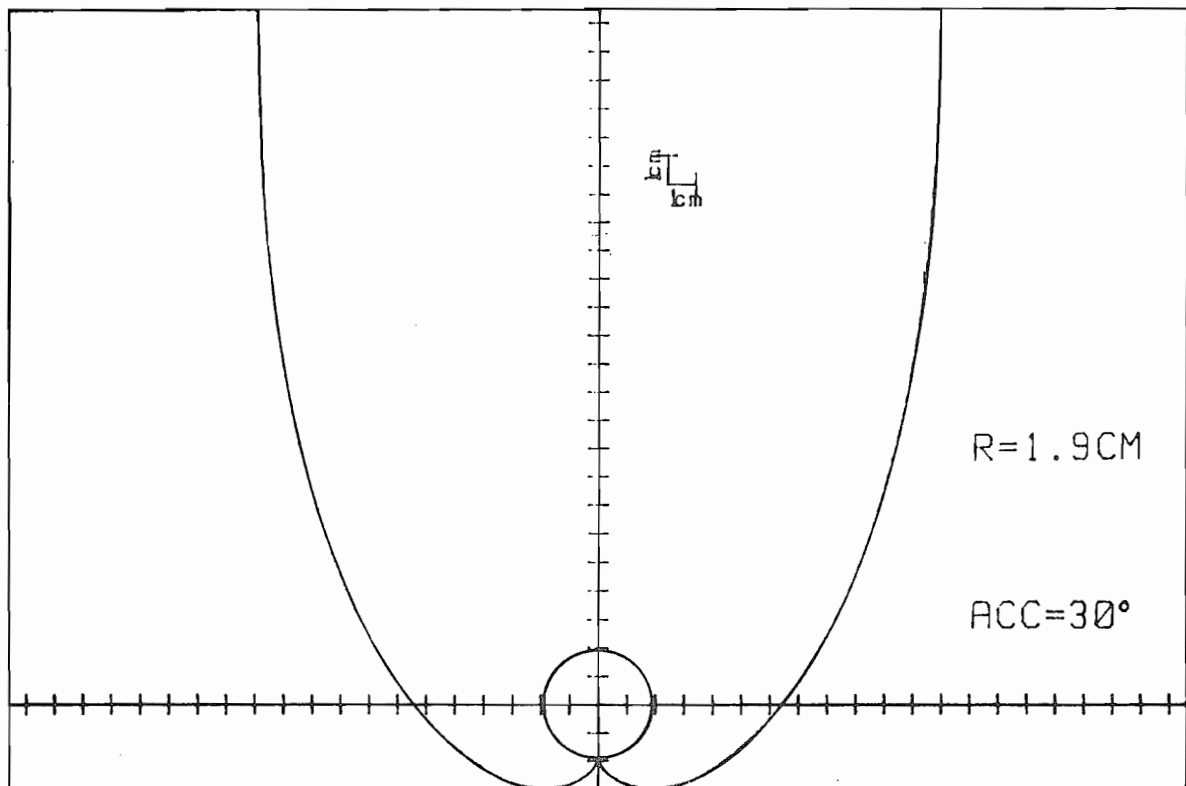


Figure 48 Profil du CPC théorique

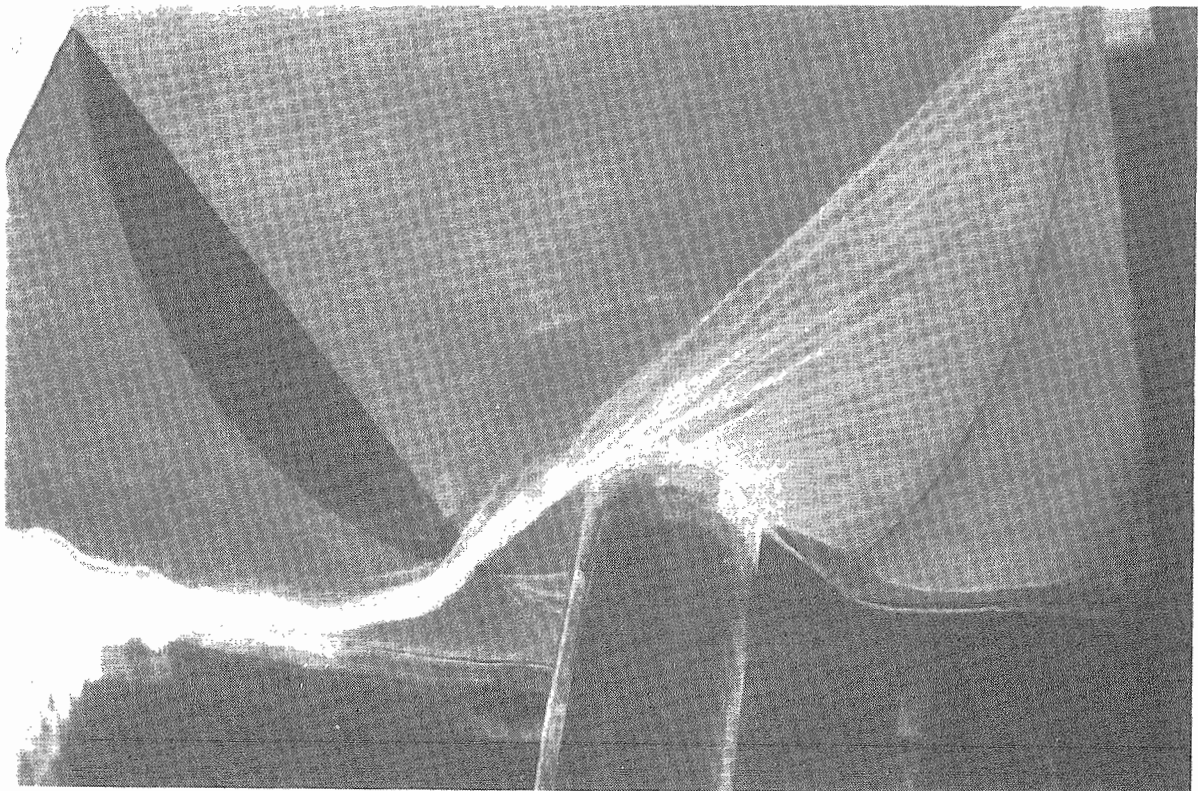


Figure 49 Visualisation des rayons réfléchis

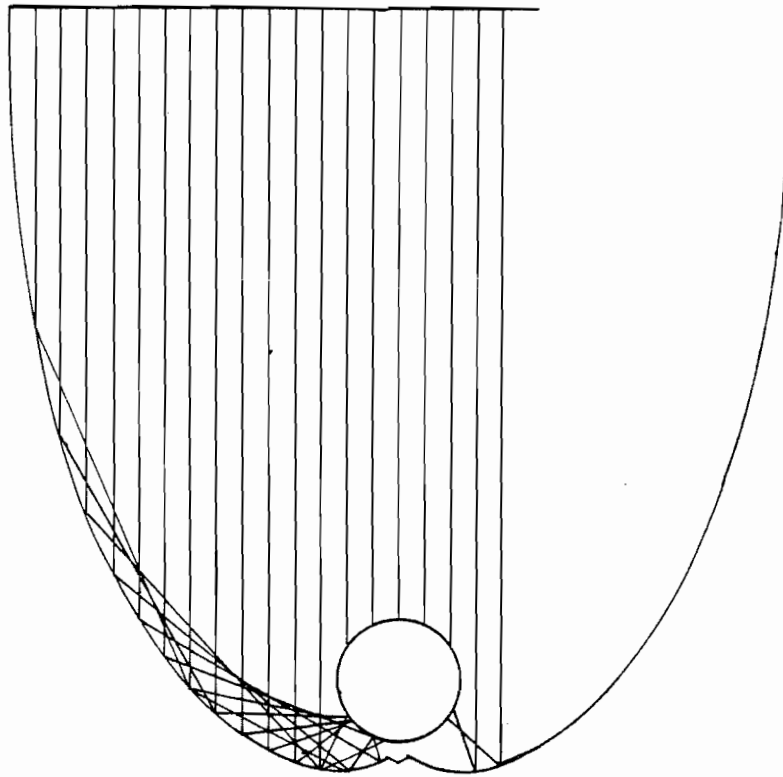


Figure 50 CPC Type II -  $lpt = 0^\circ$

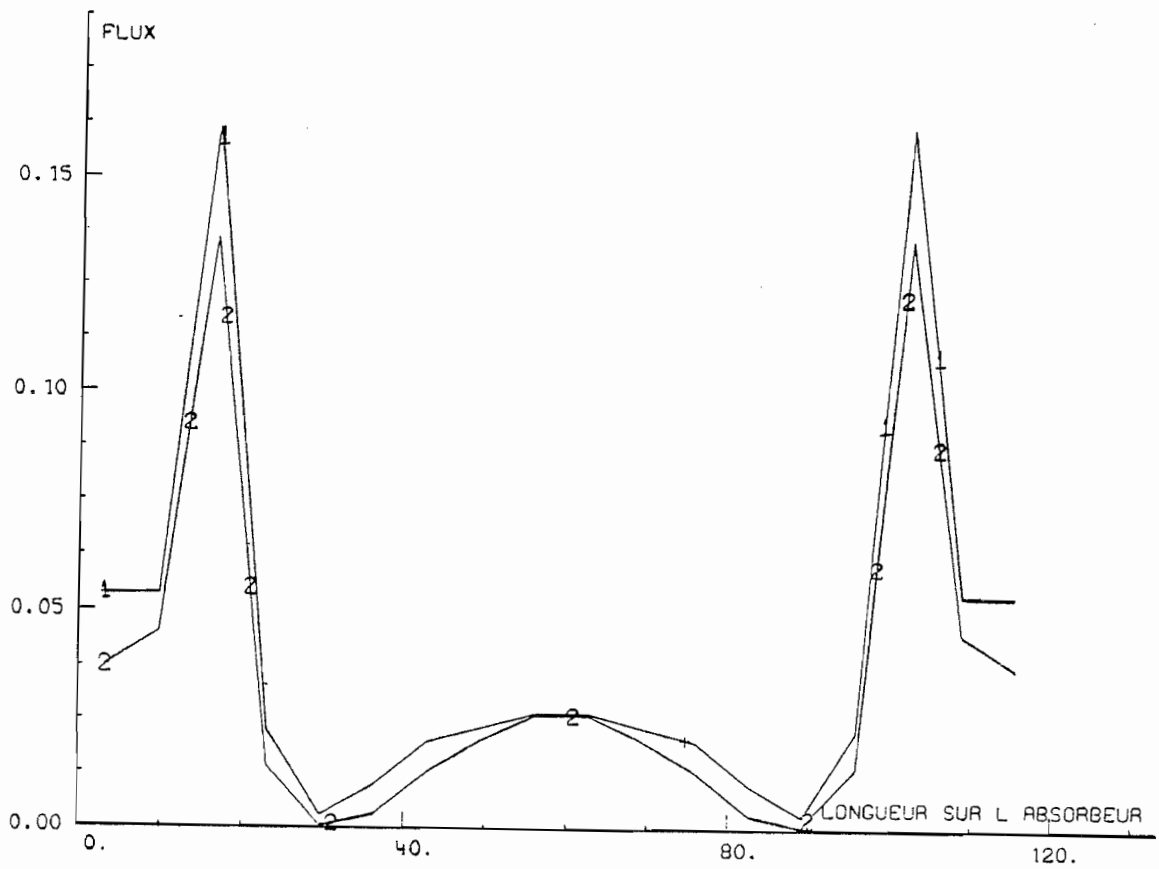


Figure 51 Répartition du flux sur l'absorbeur

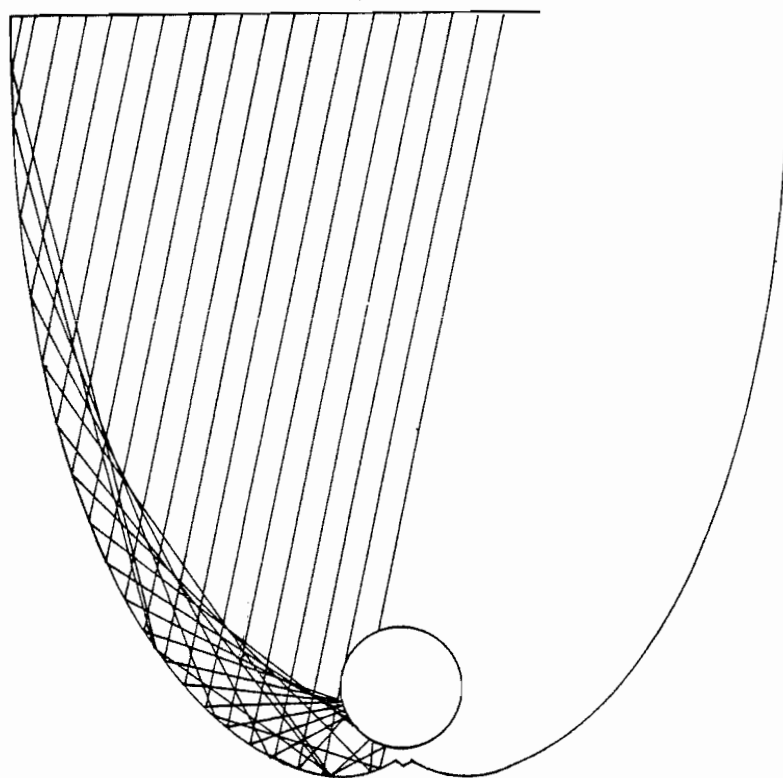


Figure 52 CPC Type II -  $lpt = 10^\circ$

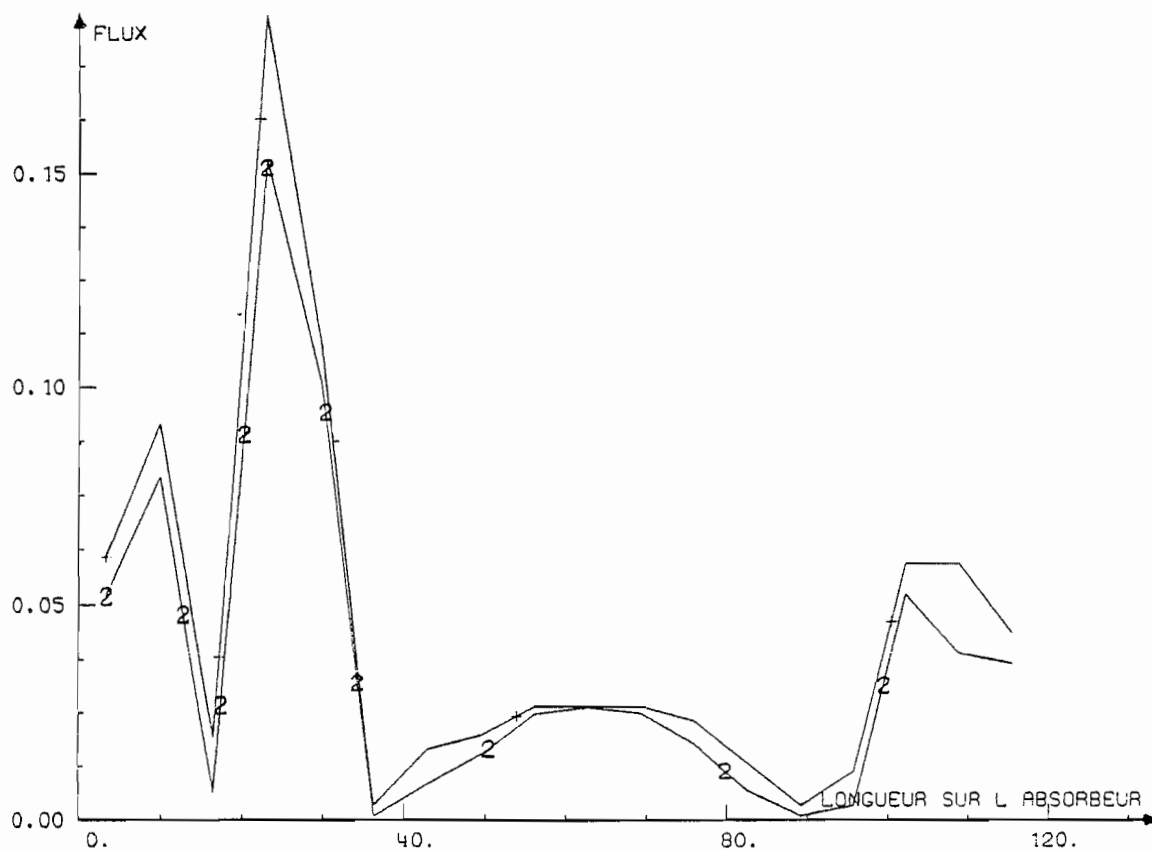


Figure 53 Répartition du flux sur l'absorbeur

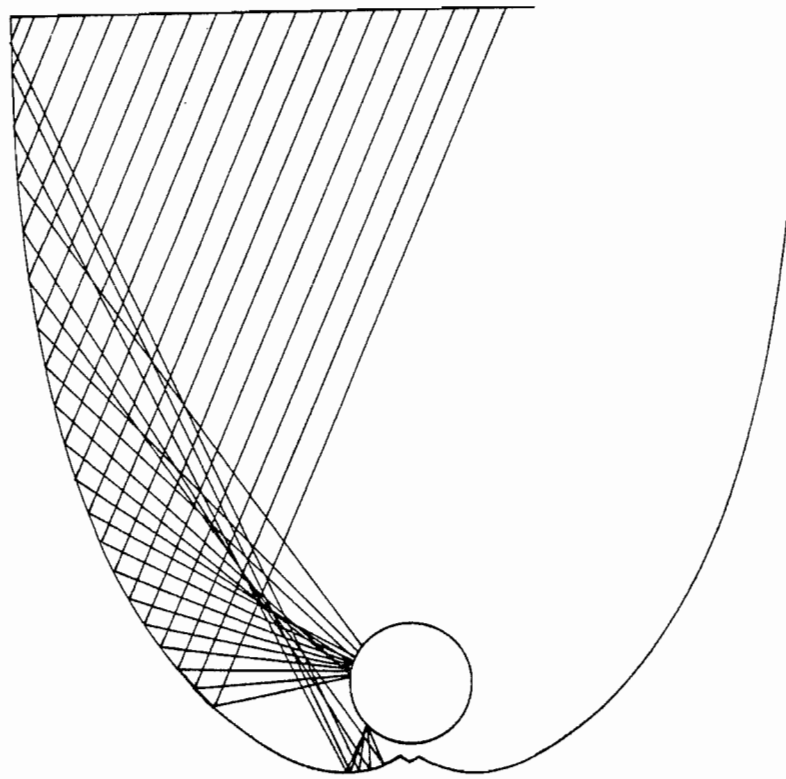


Figure 54 CPC Type II -  $\text{Ipt} = 20^\circ$

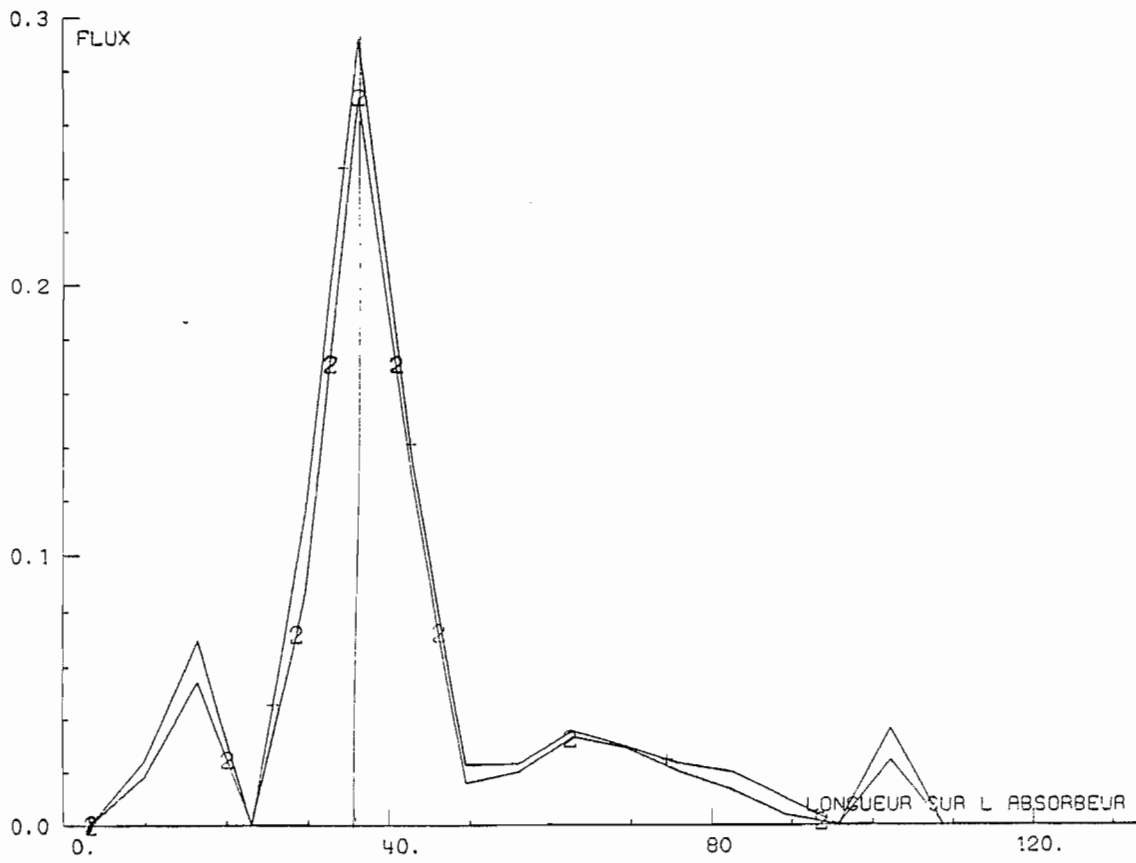


Figure 55 Répartition du flux sur l'absorbeur

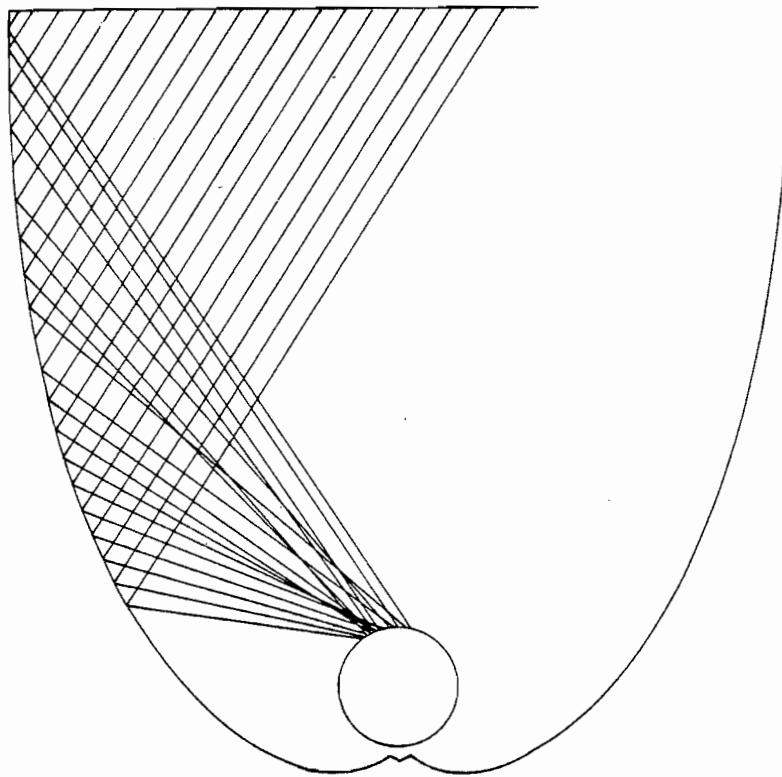


Figure 56 CPC Type II -  $\text{Ipt} = 28^\circ$

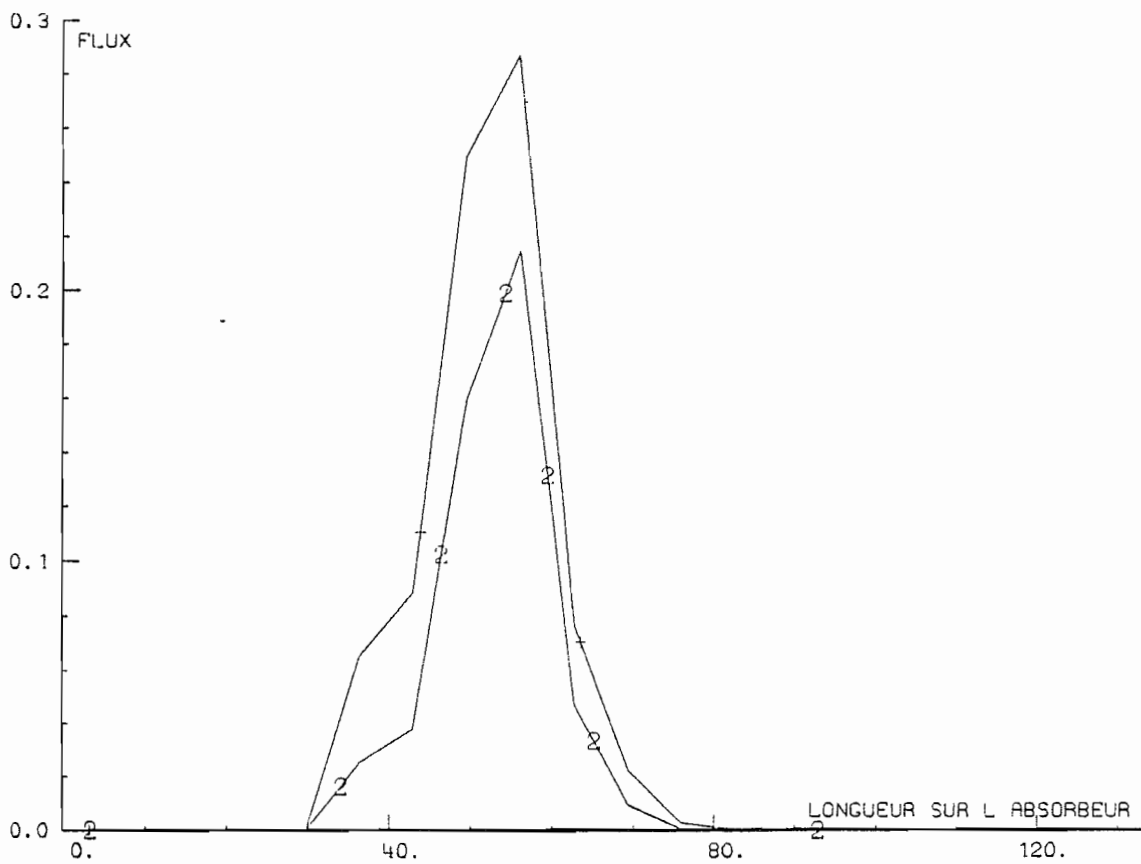


Figure 57 Répartition du flux sur l'absorbeur

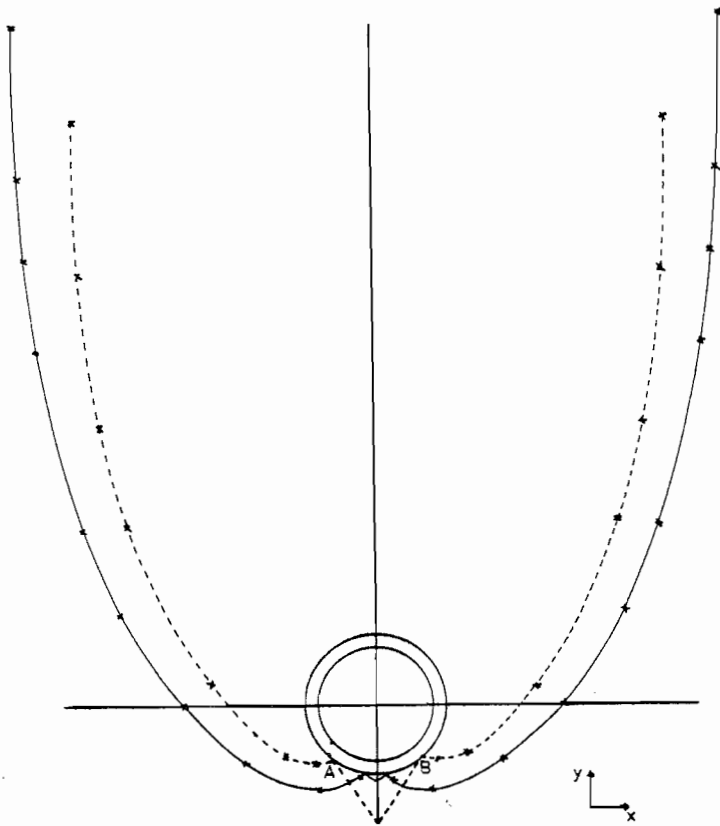


Figure 58 *CPC Type II Profils théorique et sans pertes*

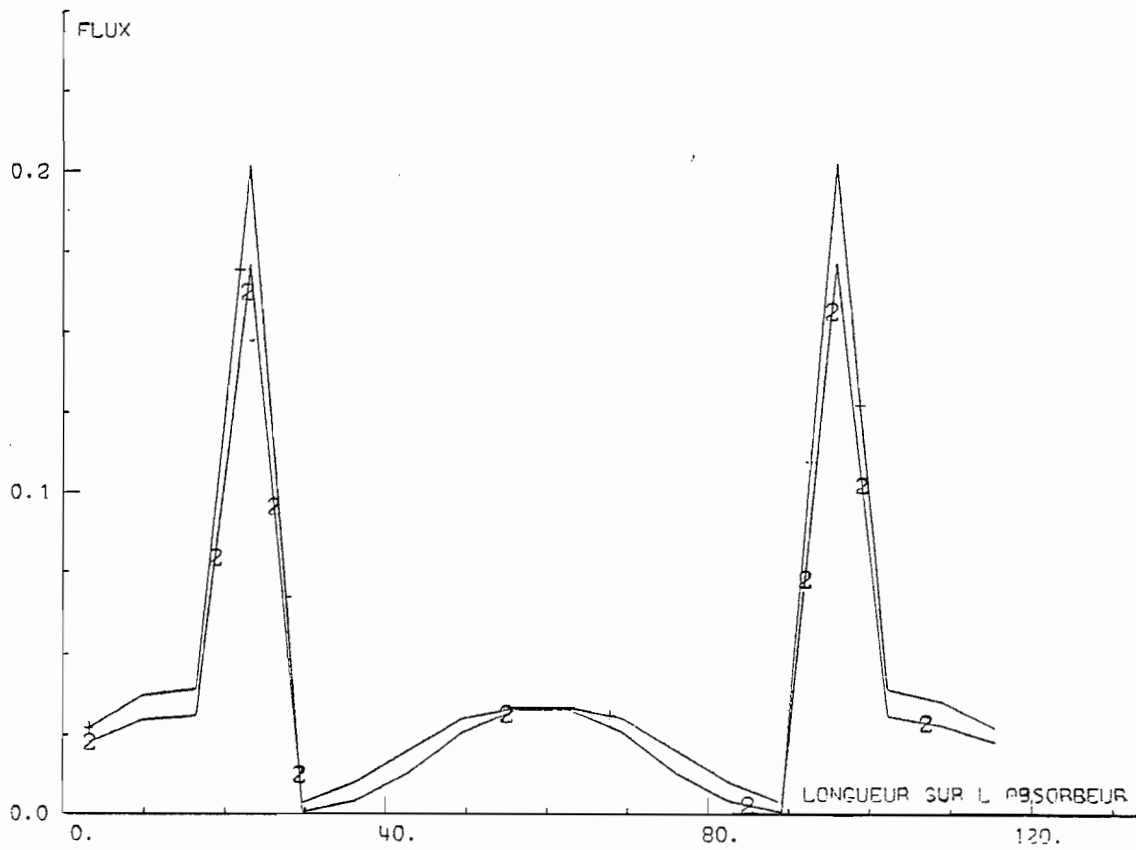
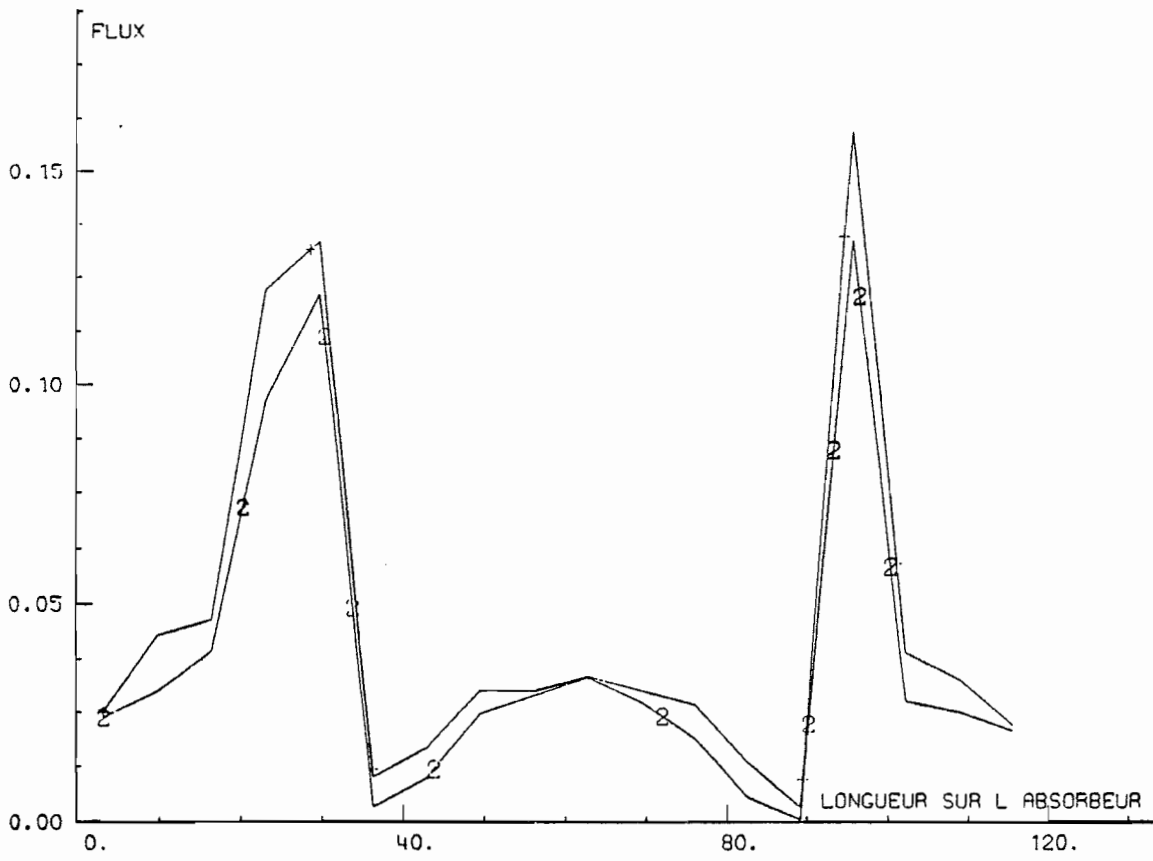
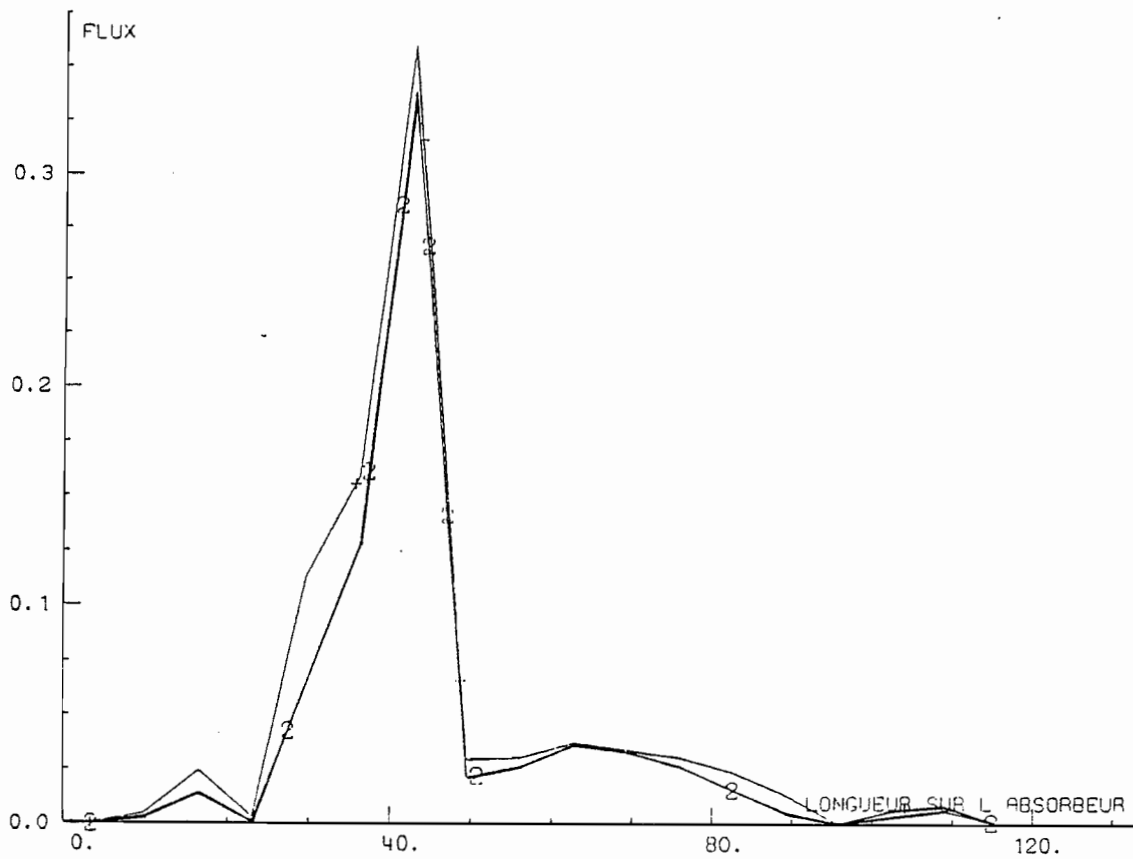


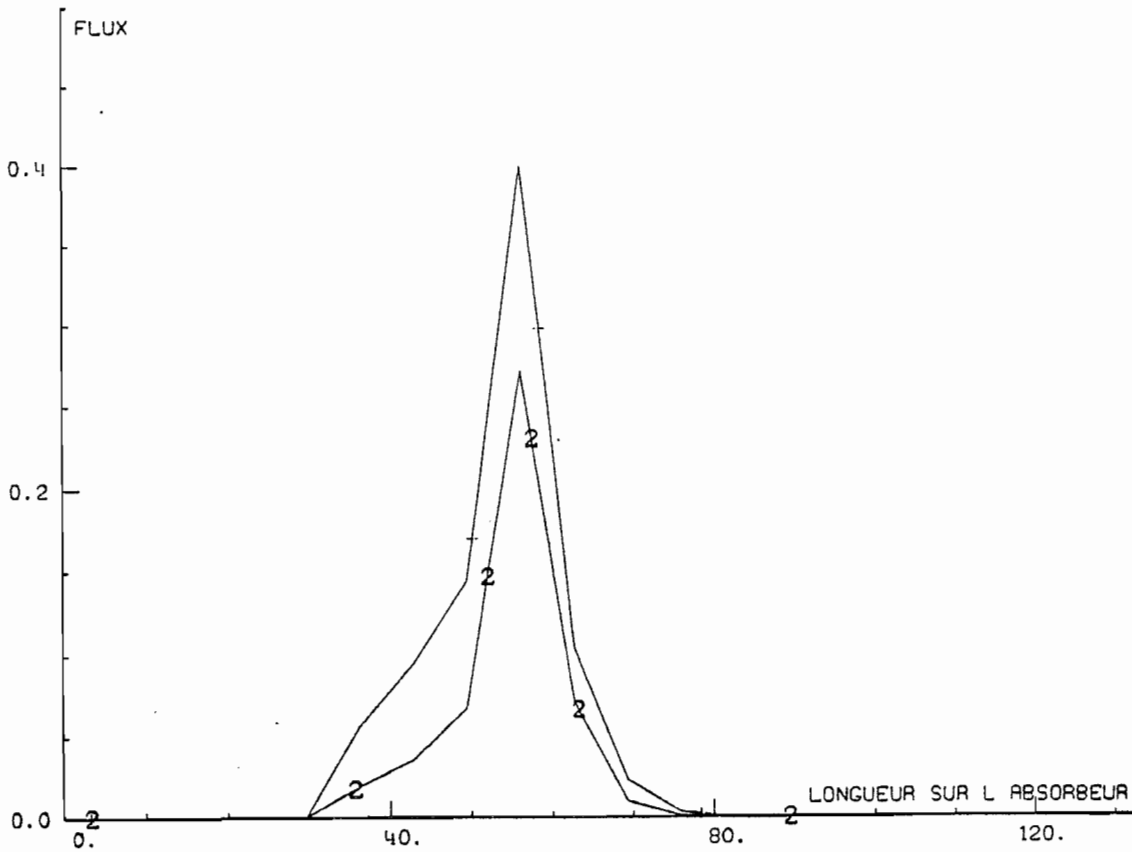
Figure 59 *Répartition de flux sur l'absorbeur  
Profil sans pertes -  $l_{pt} = 0^\circ$*



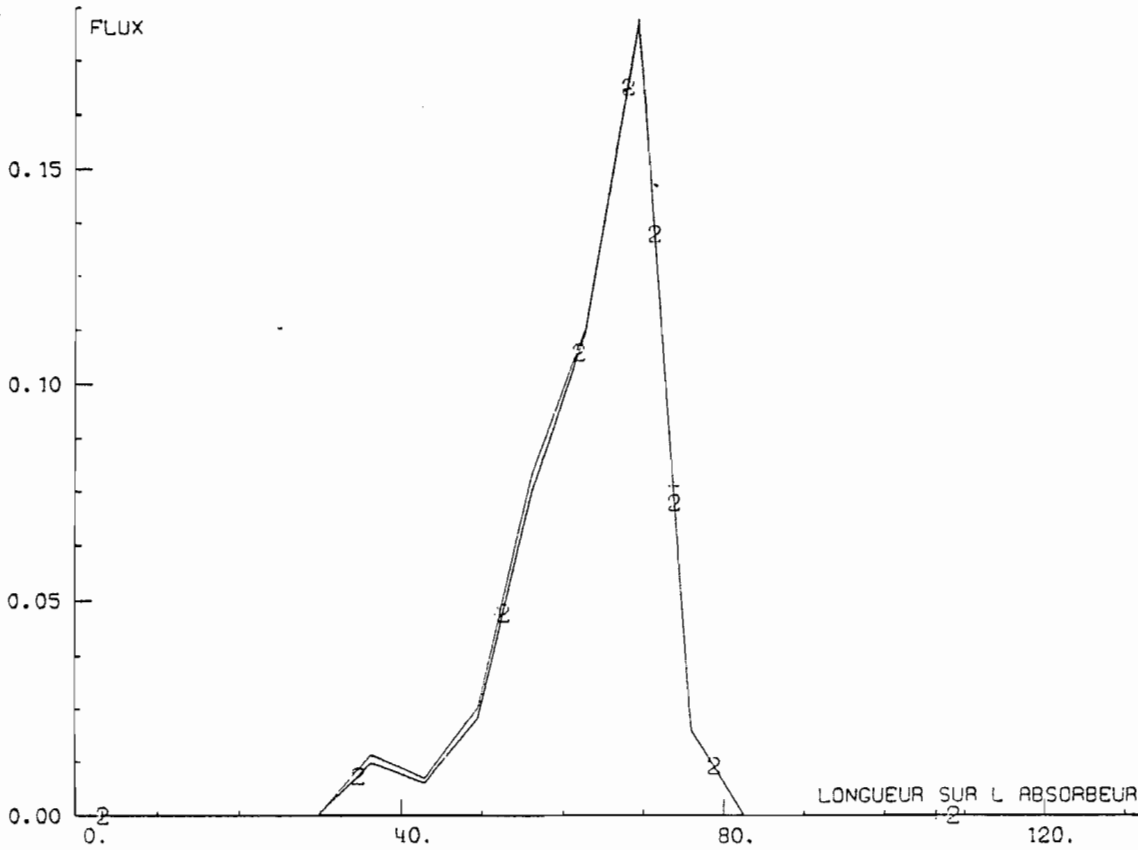
**Figure 60** Répartition de flux sur l'absorbeur  
 Profil sans pertes -  $lpt = 5^\circ$



**Figure 61** Répartition de flux sur l'absorbeur  
 Profil sans pertes -  $lpt = 20^\circ$



**Figure 62** Répartition de flux sur l'absorbeur  
 Profil sans pertes -  $l_{pt} = 28^\circ$



**Figure 63** Répartition de flux sur l'absorbeur  
 Profil sans pertes -  $l_{pt} = 30^\circ$

**2.3 – SURFACE DE RENDEMENT OPTIQUE ( Détermination analytique )**

La surface de rendement optique doit être incluse dans un modèle du type :

$$\eta = [\eta_0 ( |pt , |p| )] - A_1 T_{RED} - A_2 T_{RED}^2$$

$[\eta_0 ( |pt , |p| )]$  - Etant la surface de rendement optique

Nous avons considéré **le capteur 2** ( sans couverture ) et nous avons représenté cette surface par une fonction du type :

$$\eta_{OPT} ( |pt , |p| ) = A_0 ( |pt ) + A_1 ( |pt ) |p| + A_2 ( |pt ) |p|^2 + A_3 ( |pt ) |p|^3$$

$$A_i ( |pt ) = B_{i0} + B_{i1} |pt + B_{i2} |pt^2 + ..... + B_{ij} |pt^j + ..... + B_{i6} |pt^6$$

COEFFICIENTS $B_{ij}$				
i	0	1	2	3
j				
0	0.644	-0.001306	0.00007281	-0.0000013
1	0.02402	-0.0001265	0.00001481	-0.0000002
2	-0.008604	0.00003706	-0.0000058	0.0000001
3	0.001108	-0.0000018	0.00000068	-1.243 $10^{-8}$
4	0.0000637	-9.96 $10^{-8}$	-3.409 $10^{-8}$	6.776 $10^{-10}$
5	1.73 $10^{-6}$	8.106 $10^{-9}$	7.721 $10^{-10}$	-1.71 $10^{-11}$
6	-1.822 $10^{-8}$	-1.403 $10^{-10}$	-6.47 $10^{-12}$	1.635 $10^{-13}$

Sur le tableau suivant nous présentons les valeurs calculées qui ont servi à la détermination de la surface de rendement optique et aussi les valeurs recalculées à partir du lissage.

**COMPARAISON ENTRE LES VALEURS CALCULEES PAR CHAOPT  
ET LES VALEURS CALCULEES APRES LE LISSAGE**

p	0		30		45		60	
p	reel	fit	reel	fit	reel	fit	reel	fit
0	0.644	0.644	0.634	0.634	0.611	0.611	0.537	0.537
5	0.653	0.653	0.641	0.641	0.616	0.616	0.544	0.544
10	0.649	0.651	0.637	0.638	0.612	0.612	0.547	0.547
15	0.689	0.691	0.681	0.681	0.655	0.654	0.581	0.579
20	0.724	0.726	0.713	0.714	0.689	0.689	0.612	0.608
25	0.738	0.745	0.715	0.715	0.678	0.678	0.581	0.572

reel - Valeur calculée par le code CHAOPT

fit - Valeur obtenue par le lissage

Nous avons testé la qualité du lissage par:

$$\text{RMSE} = \text{SQRT} \left[ \frac{\sum (C_i - M_i)^2}{n} \right] = 3.107 \cdot 10^{-3}$$

Dans les figures 64 et 65 nous présentons une représentation graphique des valeurs obtenues pour la transmission.

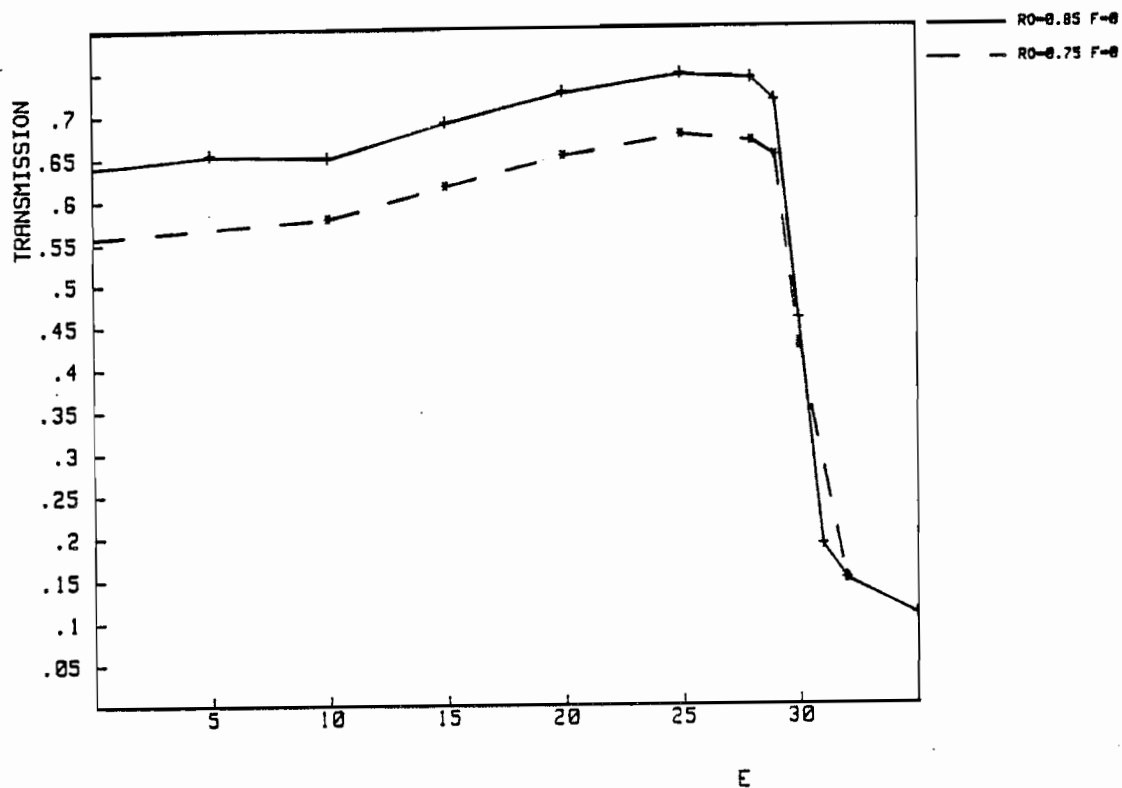


Figure 64 Transmission optique ( $\rho = 0.75$  et  $\rho = 0.85$ )

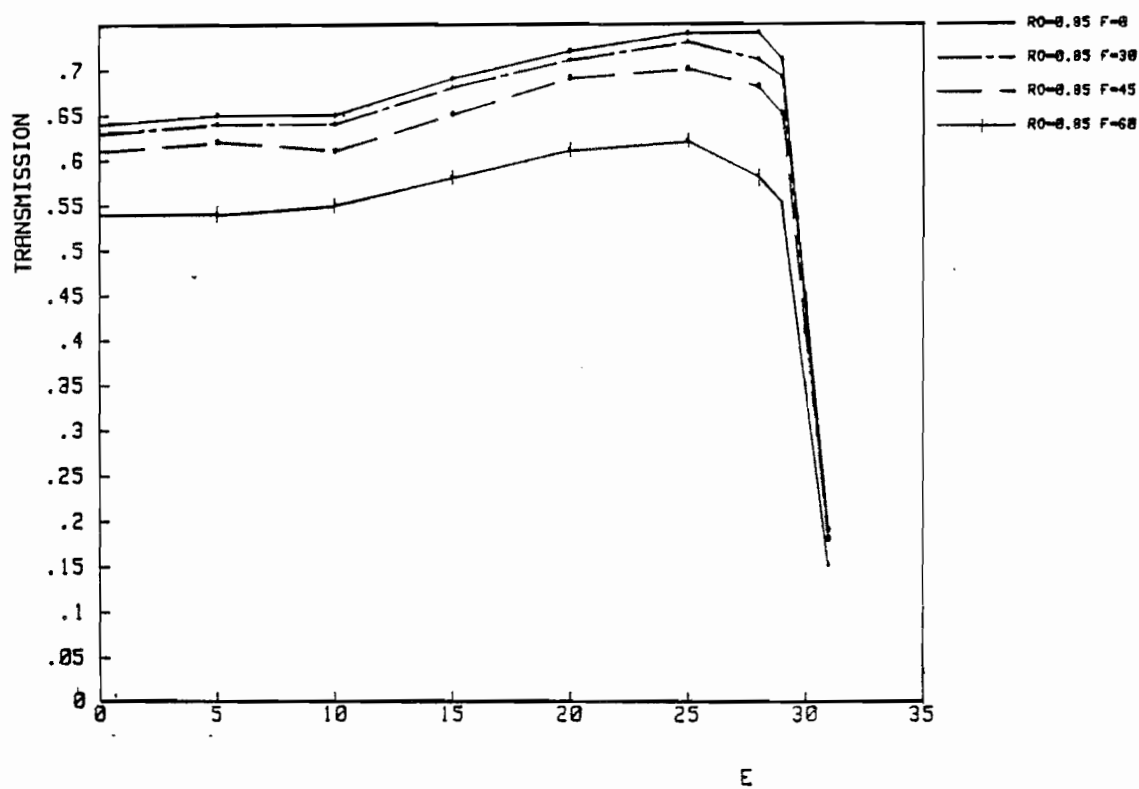


Figure 65 Transmission optique ( $\rho = 0.85$   $|\rho| = 0 ; 30 ; 45$  et  $60^\circ$ )

## 2.4 - MODELE THERMIQUE

Le modèle thermique retenu dans le code CPC est un modèle unidirectionnel pour lequel on peut écrire la relation suivante :

$$Q_{\text{ext}} = \frac{1}{[1 + B/A]} [ Q_{\text{ut}} - [T_{\text{mf}} - T_{\text{a}}]/A ] - K_{\text{S Liaison}} (T_{\text{mf}} - T_{\text{a}})$$

- Q<sub>ext</sub>** - Puissance extraite au niveau du capteur  
**T<sub>mf</sub>** - Température moyenne du fluide  
**T<sub>a</sub>** - Température ambiante  
**Q<sub>ut</sub>** - Puissance solaire utile au niveau de l'absorbeur ( calculée par le code CHAOPT )  
**K<sub>S Liaison</sub>** - Coefficient de pertes thermiques au niveau des liaisons

$$B = \frac{1}{h \pi D_1 L} + \frac{\log_e (D_2 / D_1)}{2 \pi k_1 L}$$

$$A = \left( \frac{1}{(1/\epsilon_2 + 1/\epsilon_2 - 1)} \sigma (T_2 + T_3) (T_2^2 + T_3^2) \pi D_2 L \right)^{-1} + \frac{\log_e (D_4 / D_3)}{2 \pi k_1 L} + [ h_c + \sigma \epsilon_c (T_4 + T_a) (T_4^2 + T_a^2) \pi D_4 L ]^{-1}$$

- D<sub>1</sub>** - Diamètre intérieur de l'absorbeur  
**D<sub>2</sub>** - Diamètre extérieur de l'absorbeur  
**D<sub>3</sub>** - Diamètre intérieur de l'enveloppe  
**D<sub>4</sub>** - Diamètre extérieur de l'enveloppe  
**h** - Coefficient de transfert entre le fluide et l'absorbeur  
**σ** - Constante de Stephan-Boltzman  
**ε<sub>2</sub>** - Coefficient d'émission de l'absorbeur  
**ε<sub>3</sub>** - Coefficient d'émission de la paroi interne de l'enveloppe  
**k<sub>1</sub>** - Conductibilité thermique du tube absorbeur  
**k<sub>2</sub>** - Conductibilité thermique de l'enveloppe  
**T<sub>1</sub>** - Température de la face interne de l'absorbeur  
**T<sub>2</sub>** - Température de la face extérieure de l'absorbeur  
**T<sub>3</sub>** - Température de la face interne de l'enveloppe  
**T<sub>4</sub>** - Température de la face extérieure de l'enveloppe

Du fait de la non uniformité du flux solaire sur l'absorbeur, de la non symétrie du système d'extraction, il est nécessaire de calculer la valeur du coefficient d'échange **h**, en utilisant un programme de calcul thermique bi dimensionnel.

Nous avons utilisé le Programme DELFINE [23] qui calcule les champs de température dans une structure bi dimensionnelle, avec la méthode des éléments finis . Le maillage de la structure est présenté sur la figure 66.

Nous avons considéré le cas le plus défavorable qui correspond au flux incident sur les trois éléments les plus éloignés du tube où circule le fluide.

D'après le code CHAOPT nous avons pu calculer que pour un flux de  $1000 \text{ W/m}^2$  , nous avons  $230 \text{ W}$  sur le tube et dans le cas extrême la surface de réception n'a que  $2 \text{ cm}^2$  et nous aurons donc une densité de flux solaire de  $115 \text{ W/cm}^2$  .

- Coefficient d'émission du revêtement sélectif de l'absorbeur: **0.15**
- Coefficient de transfert thermique entre le tube en cuivre et le fluide :  **$150 \text{ W/m}^2$**

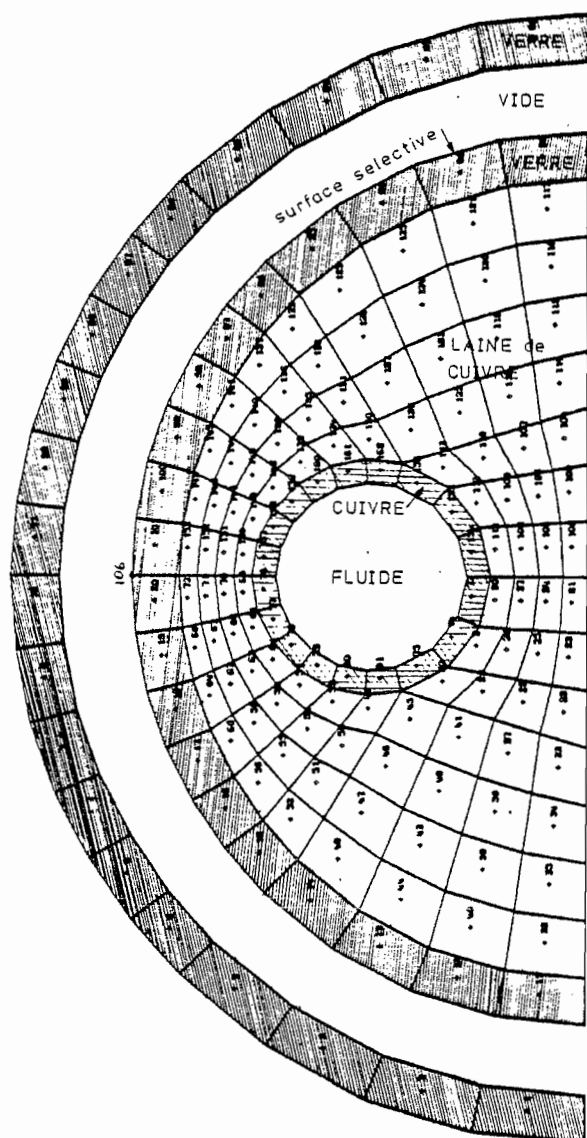


Figure 66 *Maillage du tube sous vide*

- Nous avons considéré deux températures 40 et 100 °C
- Nous avons considéré les deux cas extrêmes de conductibilité thermique de la laine de cuivre .  
Selon son tassement, la conductibilité varie entre 1 et 10  $Wm^{-1}K^{-1}$ .

Le calcul des coefficients de transfert , considérant comme référence le diamètre moyen du tube intérieur , donne les valeurs suivantes :

		$T_{MF} = 40\text{ °C}$		$T_{MF} = 100\text{ °C}$	
Cond. laine de cuivre	[W/(mK)]	= 1	10	1	10
Temp.moyenne absorbeur	[°C]	= 87	68	144	126
Q extrait	[ W ]	= 86	88	79	82
$h = \frac{Q_{ext}}{(T_{moy\ abs} - T_{fluide})}$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	= 32	56	32	55

Les profils de température sur l'extérieur du tube absorbeur sont présentés sur les figures 67 et 68 suivant les différentes hypothèses.

L' abscisse X représente la cote sur l'absorbeur à partir du point A . Le point A appartient au plan de symétrie de l'absorbeur où se situent les deux axes des tubes d'extraction ( voir Figure 43 de la page 87).

Les valeurs du coefficient d'échange que nous venons de calculer vont être utilisées dans le code de calcul complet du capteur CPC.

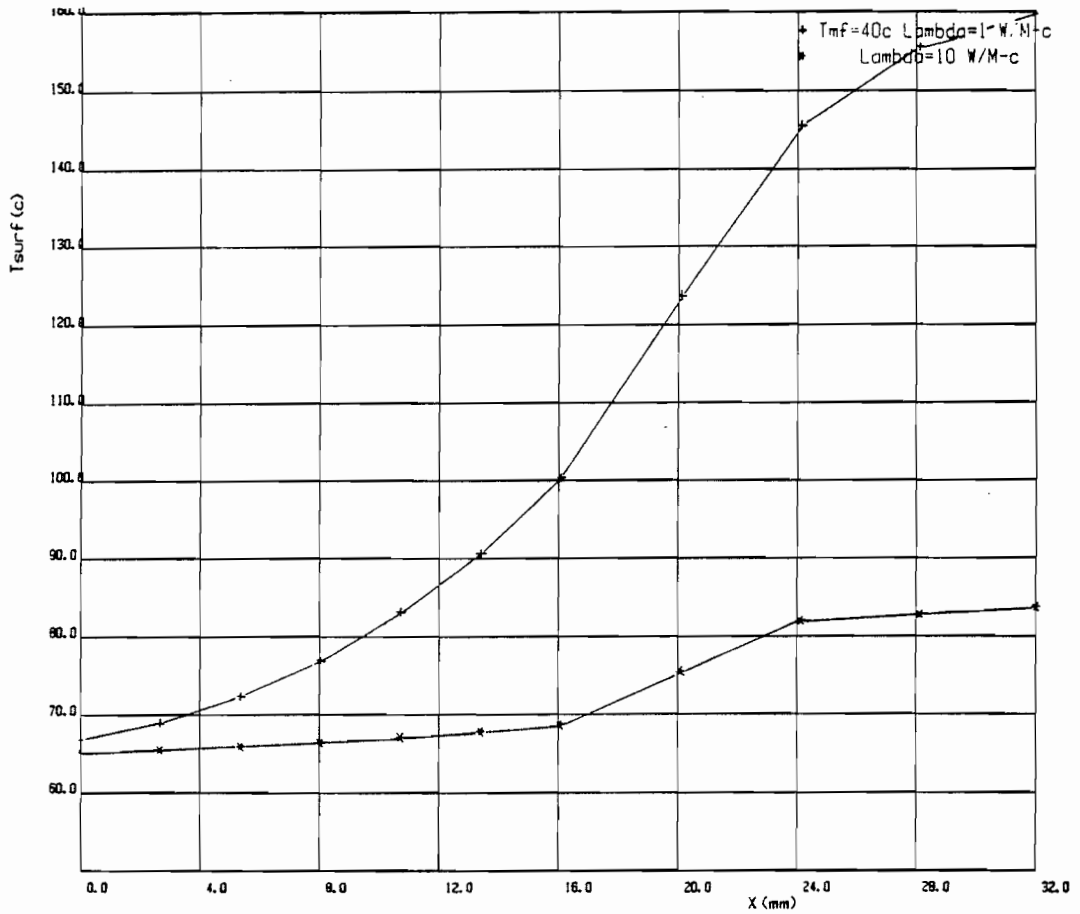


Figure 67 Répartition de températures sur l'absorbeur ( $T_{mf} = 40\text{ °C}$ )

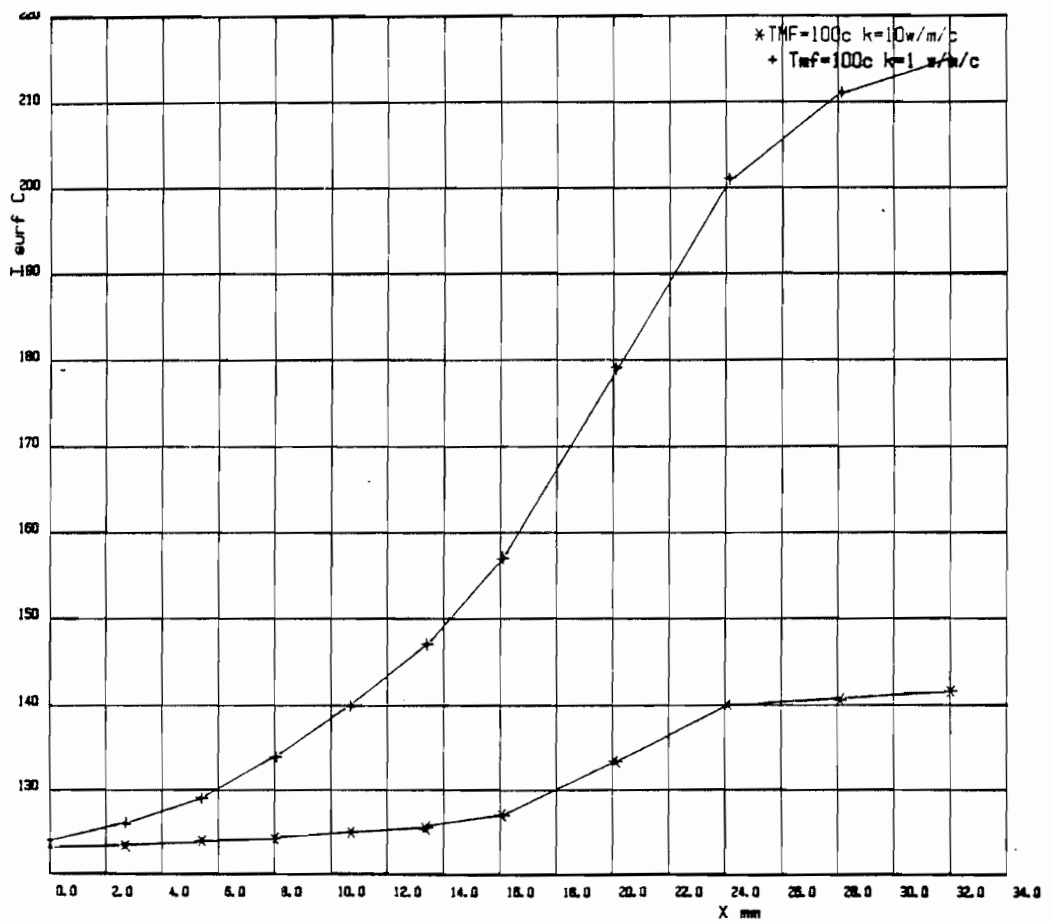


Figure 68 Répartition de températures sur l'absorbeur ( $T_{mf} = 100\text{ °C}$ )

## 2.5 – MODELE GENERAL DU CAPTEUR

### 2.5.1 – INTRODUCTION

Les deux modèles que nous avons définis nous ont permis de passer à l'étape suivante qui a pour objectif un modèle décrivant le comportement global du capteur , permettant ainsi de prévoir les performances du capteur à court et à long terme.

Les essais réalisés, que nous décrivons dans le chapitre III 4 , ont permis la validation de ce code de calcul que nous appellerons le Code CPC.

Dans le chapitre III 5 nous utiliserons le code CPC pour prévoir les performances du capteur en une année moyenne.

En annexe nous présentons un organigramme du code de calcul et un programme en langage HPL.

### 2.5.2 – DESCRIPTION DU CODE DE CALCUL DES PERFORMANCES ( CPC )

Le code de calcul de la productibilité d'un capteur CPC a été développé sur micro-ordinateur HP 9816 en langage HPL .

L'organigramme et le programme de calcul sont présentés dans l'annexe 2 ( page 155 ).

Les données descriptives du capteur ( géométrie, taille de l'absorbeur, caractéristiques thermiques, etc ) sont introduites par l'utilisateur , ainsi que la période de calcul souhaitée.

- Les phénomènes optiques sont calculés par le sous programme optique qui fournit l'énergie utile au niveau de l' absorbeur.
- Les phénomènes thermiques sont traités en utilisant le modèle décrit dans le paragraphe précédent, en prenant en compte le coefficient de transfert entre l'absorbeur et le tube déterminé par le code DELFINE.

Ce code permet de calculer l'énergie fournie par le capteur soit au niveau d'une journée soit pour une année pour une température moyenne du fluide.

#### 2.5.2.1 – PERFORMANCES JOURNALIERES

Au niveau des performances journalières ce code de calcul peut utiliser des valeurs réelles de flux ou des valeurs calculées.

Pour une journée, on calcule pour chaque pas de temps considéré, les coordonnées du soleil, l'angle d'incidence des rayons solaires sur le capteur et les angles  $|\rho|$ ,  $|\rho_t|$ , puis on fait appel aux sous programmes OPTIQUE et THERMIQUE qui fournissent le rendement instantané et par intégration sur le pas de temps, l'énergie extraite.

### 2.5.2.2 – PERFORMANCES ANNUELLES

Pour les performances annuelles nous considérons 12 jours caractéristiques.

La trajectoire apparente du soleil varie le long de l'année car l'angle entre l'axe de la Terre et le plan de l'Ecliptique n'est pas nul ( $23^\circ 27'$ ).

Le mouvement de translation de la Terre dont l'axe se déplace parallèlement à lui même, provoque des variations annuelles de la déclinaison.

Par exemple la journée géométriquement représentative du mois de janvier est le 17, car il s'agit de la journée où la déclinaison est la plus proche de la moyenne pour cette période :

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Jour du mois	17	15	16	15	15	10	17	16	16	16	15	10
Jour / 1 <sup>er</sup> Jan	17	46	75	105	135	161	198	228	259	289	319	344

L'optimisation du positionnement du capteur, d'un point de vue strictement géométrique, correspond à l'adapter à la trajectoire apparente du soleil pour la journée représentative de la période considérée qui peut à la limite être une saison ou même l'année:

**CAPTEUR Stationnaire**       $\beta = \varphi = 43^\circ$  ( latitude de Cadarache )

**CAPTEUR à 2 positions**       $\beta_{\text{hiver}} = \varphi - \delta = 57^\circ$

$\beta_{\text{été}} = \varphi + \delta = 29^\circ$

L'optimisation énergétique de la position d'un capteur, peut être différente de l'optimisation géométrique et dépend essentiellement :

- de la répartition de la charge le long de l'année
- de l'énergie disponible, qui est toujours plus importante en été.

Avec une répartition uniforme le long de l'année, l'optimum énergétique conduit à des inclinaisons inférieures à la latitude; si la charge est plus importante en été l'optimum sera encore plus bas et si elle est plus importante en hiver, l'inclinaison sera supérieure à la latitude.

Ce programme de calcul permet de calculer l'énergie disponible si un système de régulation imposait une température constante, arrêtant la circulation quand le rendement devient négatif.

Le calcul se déroule comme pour les performances journalières, mais il passera 12 fois.

Dans cette configuration on considère le modèle de CHOUARD [36], mais il est possible d'imposer les données météorologiques à condition de le faire jour par jour.

Comme Ph. CHOUARD, nous admettons aussi une répartition uniforme de  $fN$  heures de soleil et des  $(1-f)N$  heures de ciel couvert,  $f$  étant la fraction d'insolation et  $N$  le nombre d'heures de la période diurne.

Cette hypothèse est acceptable si le site a un indice de transparence élevé ( $K_h$  - rapport entre la moyenne mensuelle du rayonnement global horizontal au sol et hors atmosphère).

Ceci est le cas de climats comme celui de Lisbonne, Cadarache, Carpentras etc, et sur la figure 69 il est possible de vérifier la validité de cette hypothèse.

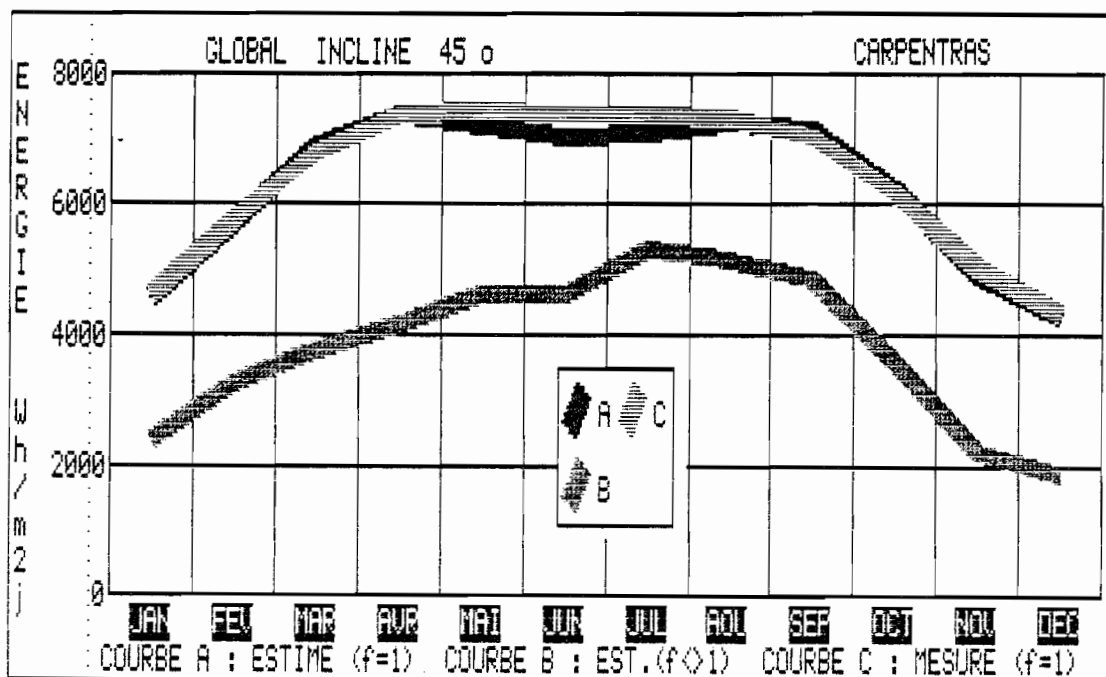


Figure 69 *Energie incidente mensuelle*

Ensuite nous avons pondéré ces courbes d'énergie utilisable par la fraction d'insolation.

Ces nouvelles courbes, appelées **courbes d'utilisabilité**, représentent l'énergie utilisable en fonction de la température d'utilisation:

$$E_{UTIL} = F + D T_U + F T_U^2 \quad T_U - \text{Température d'utilisation}$$

Sur le tableau suivant nous présentons les énergies disponibles à différentes températures, ainsi que les coefficients des courbes d'utilisabilité.

### ENERGIE UTILISABLE [ Wh/(m<sup>2</sup> jour)]

MOIS	F. Ins	En 20°C	En 60°C	En 100°C	En 140°C	En Inc	Coef F	Coef E	Coef D
JAN	52	1212	1137	992	807	2389	1233	-0.65	-0.0172
FEV	57	1652	1492	1286	1052	3252	1721	-3.17	-0.0116
MAR	55	1810	1628	1408	1157	3790	1889	-3.72	-0.0108
AYR	57	2064	1876	1645	1360	4179	2138	-3.43	-0.0152
MAI	64	2112	1928	1741	1507	4609	2188	-3.76	-0.0098
JUN	66	1731	1554	1414	1240	4635	1809	-4.11	-0.0005
JUL	75	2240	2020	1831	1596	5307	2336	-5.52	-0.0023
AOU	71	2517	2293	2058	1766	5154	2609	-4.52	-0.0106
SEP	68	2352	2115	1838	1514	4827	2453	-4.81	-0.0136
OCT	58	1783	1602	1386	1126	3601	1857	-3.49	-0.0123
NOV	46	1213	1097	950	774	2247	1260	-2.16	-0.0094
DEC	44	945	860	753	619	1877	978	-1.49	-0.0077

La figure 70 nous permet la visualisation de ces courbes.

Quand la température augmente, le capteur fonctionne pendant moins de temps et de façon symétrique par rapport à midi solaire vrai.

Quand le capteur fonctionne proche de son angle d'acceptance, le rendement optique est plus élevé et la pente du modèle linéaire des courbes d'utilisabilité, est plus petite.

Tel est le cas des mois de Mai, Juin et Décembre.

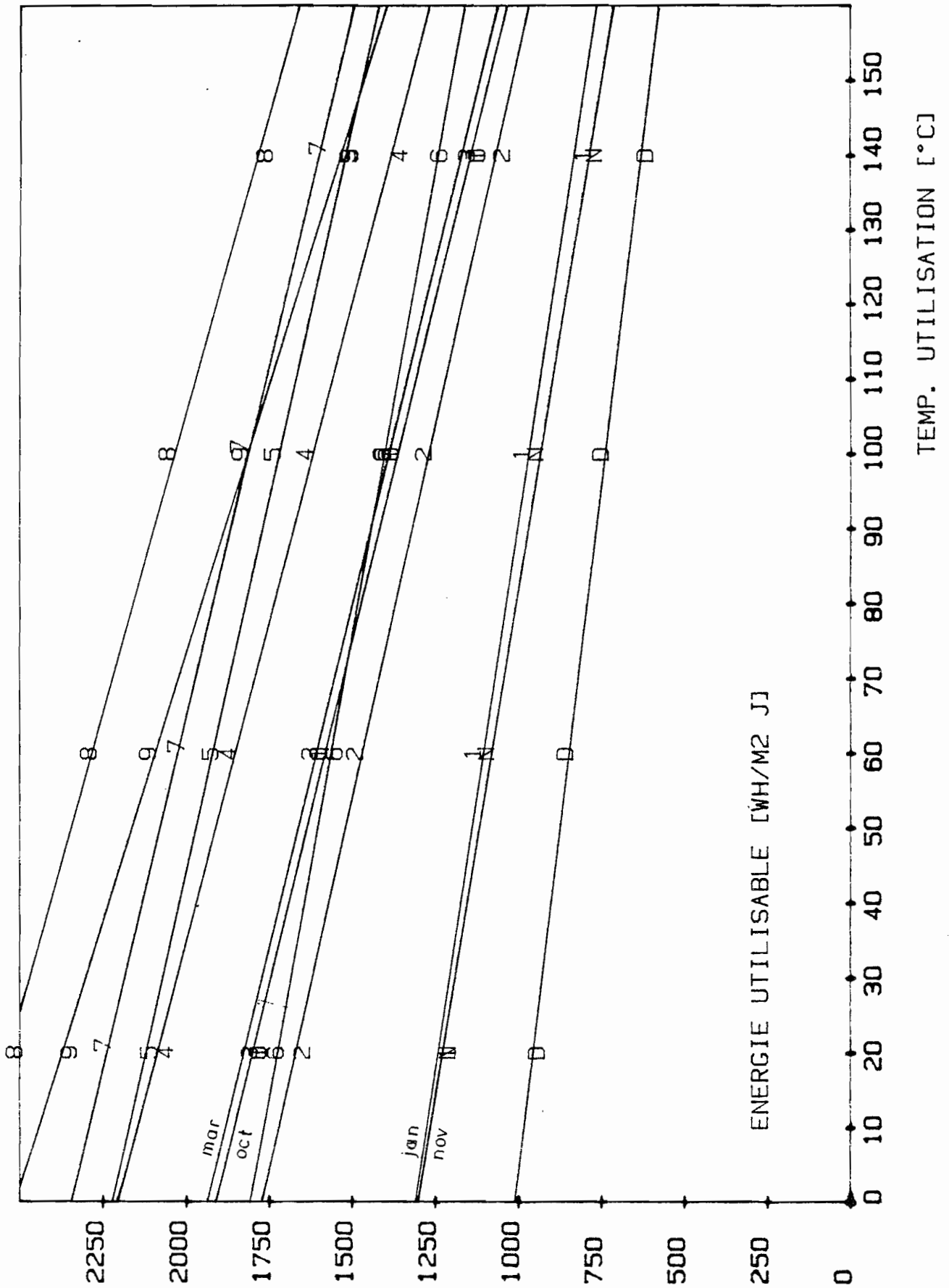


Figure 70 Energie utilisable ( mois par mois )

### **3 – BOUCLE D'ESSAI ET INSTRUMENTATION**

#### **3.1 – BOUCLE D'ESSAI**

Les capteurs ont été testés en parallèle reliés à un régulateur thermostatique de type industriel, PARMILLEUX, utilisant comme fluide le gilotherm ADX 10.

Ce régulateur a la particularité d'avoir les deux actions , chaude et froide, en parallèle.

Un contrôleur du type PID assure la gestion de ces deux actions avec une stabilité meilleure que 0.1 K , à l'entrée du capteur.

Dans la figure 71 nous présentons le schéma de l'appareil PARMILLEUX.

#### **3.2 – INSTRUMENTATION**

##### **3.2.1 – DETECTEURS et LEUR ETALONNAGE**

**Sondes de température** : Nous avons utilisé deux types de sondes à résistance variable, de platine Pt 100 DIN et Cuproswem, ayant eu la préoccupation de les positionner le plus près possible des endroits où on voulait les mesures.

Nous avons essayé d'assurer une bonne homogénéisation du fluide en amont par l'interposition de corps assurant des vortices et les sondes ont été montées en contre-courant pour assurer une bonne irrigation de leur zones sensibles .

Nous avons fait l'étalonnage par comparaison avec une sonde étalon , de précision à 0.01 K , dans un bain thermostaté. Pour une meilleure stabilité des températures dans le bain , l'étalon et les sondes à étalonner étaient placées dans un bloc en cuivre, de masse 10 kg.

**Sondes différentielles** : Nous avons utilisé des sondes avec 10 thermocouples en série dans des gaines en acier inox.

Nous avons fait l'étalonnage dans le même bain thermostaté, par comparaison avec la sonde étalon, mais en deux étapes de façon à avoir la réponse de chaque sonde l'autre étant dans un autre bain à 0 °C.

**Débitmètres** : Nous avons utilisé , pour la mesure des débits de gilotherm dans les capteurs deux turbines FAURE-HERMAN TZ 20-05 reliées à des convertisseurs (fréquence-courant) FH 102 , pour des débits de 50 à 500 l/h .

Pour la régulation du débit d'eau du circuit de réfrigération nous avons utilisé des débitmètres à flotteur.

Nous avons fait l'étalonnage par comparaison avec une turbine étalon pour établir les courbes du débit volumique en fonction de la fréquence ayant comme paramètre la température du fluide.

Nous avons constaté que les turbines TZ 20-05 peuvent être caractérisées par une seule courbe, pour des débits de gilotherm entre 100 et 250 l/h et des températures de 30 à 150 °C.

**Anémomètre** : Nous avons utilisé un anémomètre du type coupoles tournantes. La constante d'étalonnage de l'anémomètre est donnée par le constructeur.

**Pyranomètres** : Nous avons utilisé deux pyranomètres, l'un mesurant le flux dans le plan d'ouverture et l'autre ayant l'acceptance tronquée. Les deux pyranomètres étaient des EPPLEY à double coupole.

L'étalonnage a été réalisé en position inclinée, par comparaison avec un pyranomètre étalon PSP.

### 3.2.2 - SYSTEME d'ACQUISITION et CHAINE de MESURE

Nous avons utilisé un ordinateur Hewlett- Packard HP 9825 et un système d'acquisition HP 3497A de 30 voies.

Nous avons compensé les longueurs de câbles par étalonnage de toute la chaîne d'acquisition.

## 3.3 - ACQUISITION

Nous avons choisi un taux d'acquisition de 2 par minute, les données étant stockées sous forme de grandeurs physiques non traitées.

Les grandeurs traitées, valeurs moyennes, rendement etc, étaient obtenues par un programme de dépouillement des valeurs stockées.

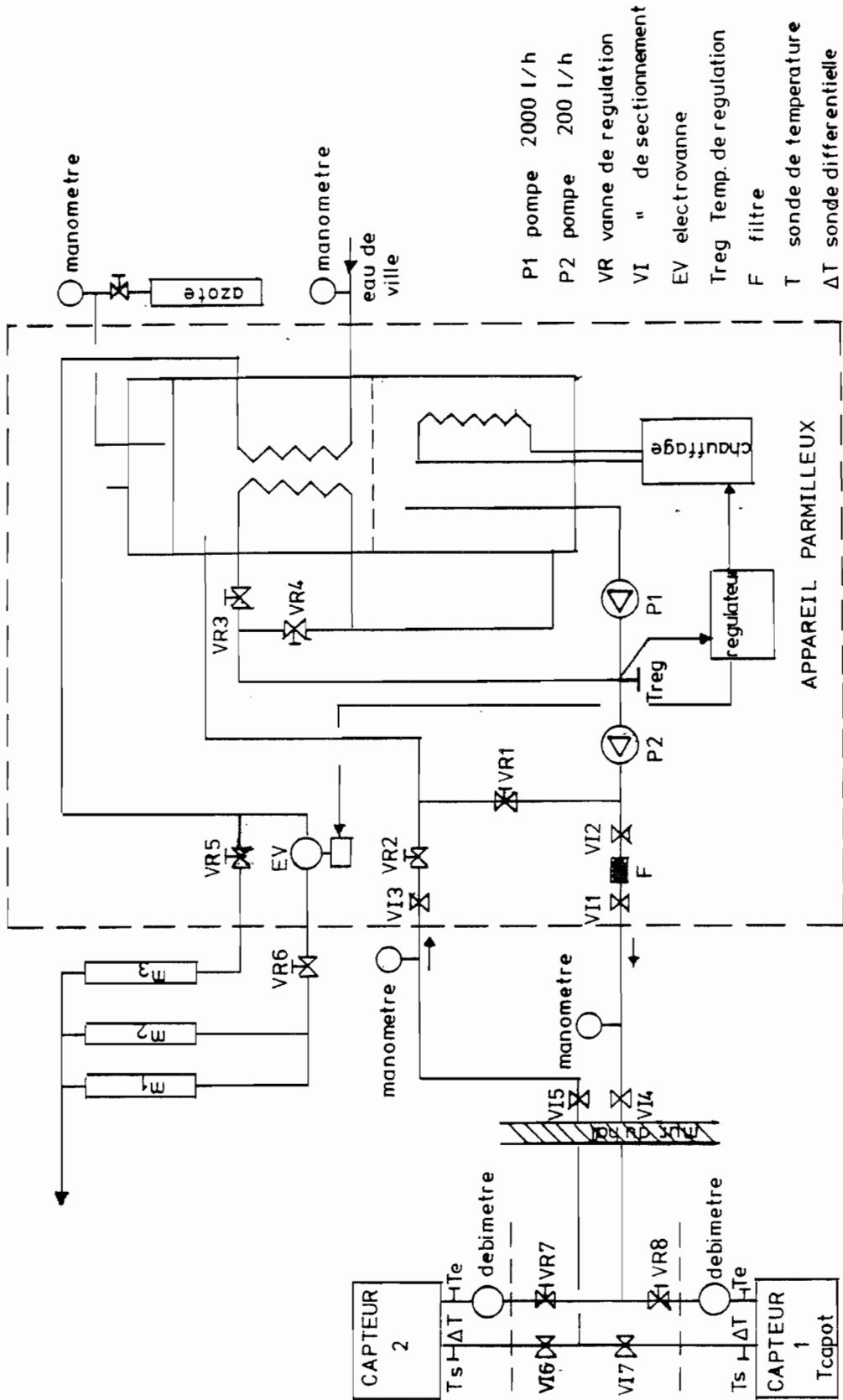


Figure 71 Boucle d'essai et instrumentation

#### 4 – RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les essais ont pour but de définir le comportement optothermique du capteur et de permettre le recalage du code CPC.

Nous définirons le rendement par rapport à la surface d'entrée et nous ne considérerons que le flux global accepté au niveau du plan de l'ouverture.

Pour le traitement des données nous avons considéré des périodes de stabilité de 360 s pour les rendements instantanés mais nous avons aussi calculé les énergies cumulées sur la journée.

Tous les essais ont été effectués avec des débits proches de 200 l/h .

##### 4.1 – RENDEMENTS JOURNALIERS

A titre indicatif nous présentons dans le tableau suivant quelques résultats journaliers obtenus pendant la campagne d'essais .

DATE	H. Légale début	H. Légale fin	$Q_{INC}$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$\eta$ journalier [%]	$T_{MF}$ [°C]	$T_{AMB}$ max [°C]
31/10	10H00	14H03	3349	47	65	26.7
26/11	10H28	13H00	1472	43	82	12.7
27/11	10H13	15H07	3679	54	33	19.2
28/11	10H47	14H06	2195	49	62	15.7
05/12	11H12	15H41	3105	50	62	20.5
06/12	10H22	14H06	2700	45	100	19.5
10/12	10H28	15H29	3564	41	119	17.3
11/12	10H20	12H24	1523	43	137	15.7

Nous avons déjà vu dans le Chapitre II 2.2 , que le rendement optique dépend des angles d'incidence projetés  $|\rho|$ ,  $|\rho_t$ .

Nous présentons dans la Figure 72, les résultats de rendement instantané en fonction de la température réduite entre 11 et 13 h et nous pouvons constater que si le capteur n'est pas pointé pendant la caractérisation thermique, les résultats obtenus dépendent de l'angle d'incidence transversal.

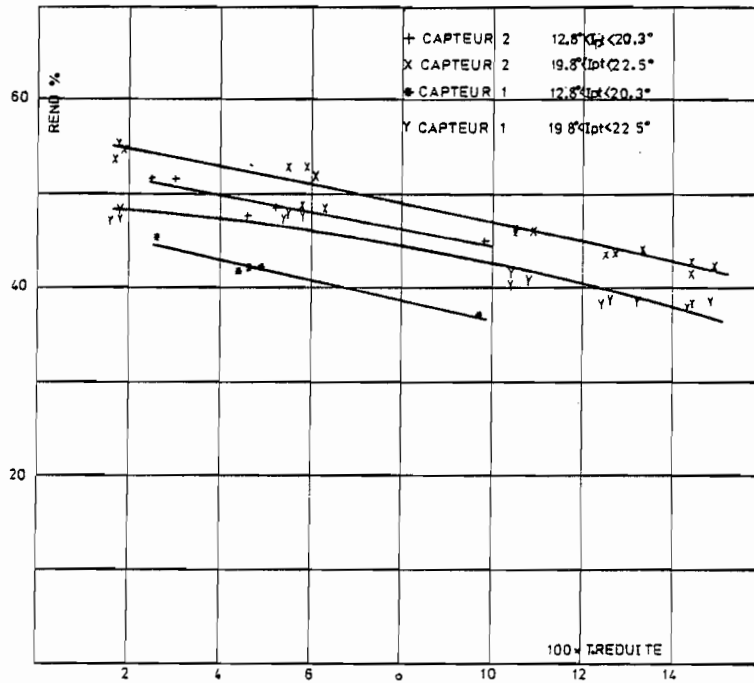


Figure 72 Essais du capteur CPC entre 11 et 13 h

Le capteur 2 est meilleur que le capteur 1, la différence de 15 %, est due à la couverture en plexi-glass.

Les figures 73 à 76 montrent l'évolution en fonction de l'heure locale, pendant une journée de Décembre, des grandeurs suivantes :

- Flux solaire direct, global, et global dans l'acceptance
- Température dans le capôt du capteur 1
- Température d'entrée du capteur 2
- Température de sortie du capteur 2
- Température dans l'absorbeur

Sur la Figure 73 nous pouvons constater l'importance de mesurer seulement le flux solaire accepté . Un Pyranomètre incliné, avec une acceptance transversale de 90° , accepte aussi le flux réfléchi par les murs du hall qui est derrière mais ce flux n'est pas accepté par le capteur (courbe 2).

Nous avons pu constater que la couverture du capteur 1 a un rôle important sur la température de l'air autour des tubes , mais que la différence sur les performances thermiques est moins importante que la pénalisation du rendement optique.

La sonde à l'intérieur de l'absorbeur nous a permis d'avoir une idée de la surchauffe et d'évaluer aussi le Facteur de Forme F'. Le  $\Delta T$  maximum mesuré a été de 20 °C .

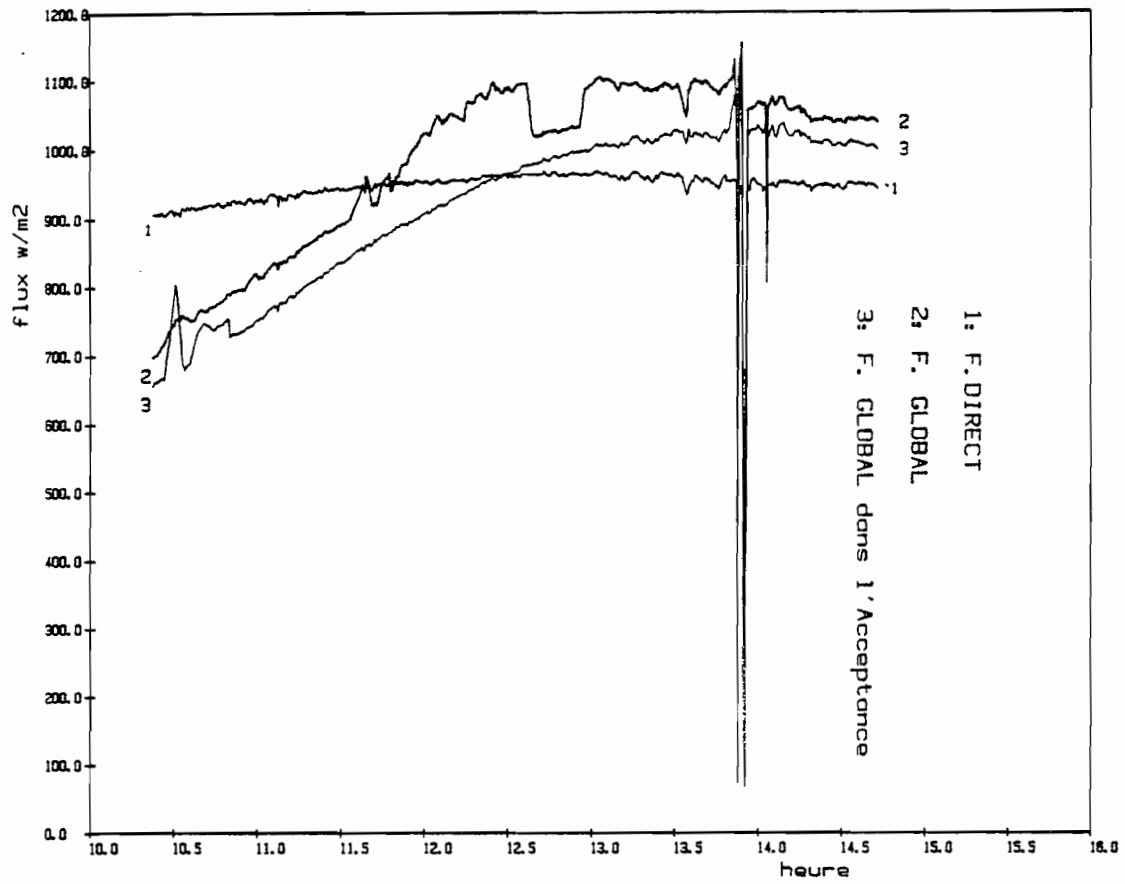


Figure 73 Flux Solaire Direct, Global et Global dans l'acceptance

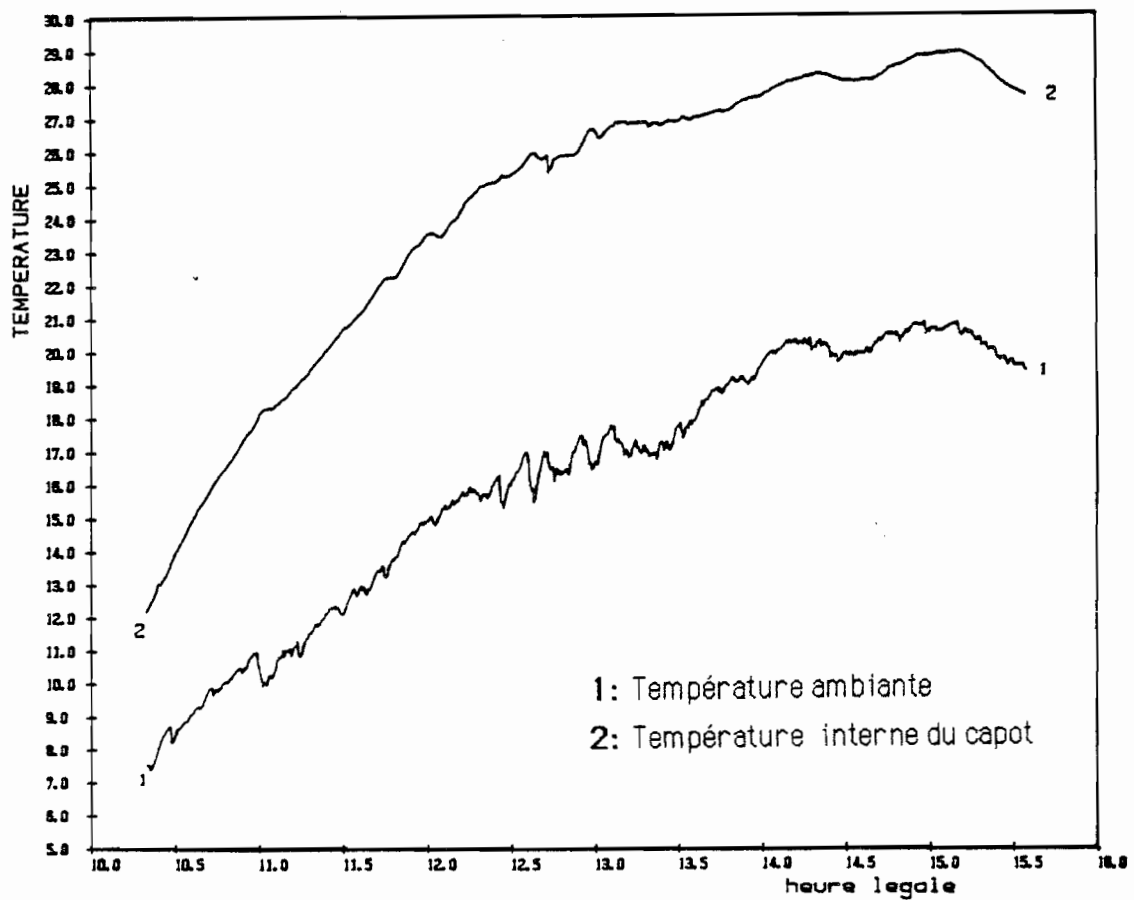


Figure 74 Variation journalière des températures, ambiante et dans le capot

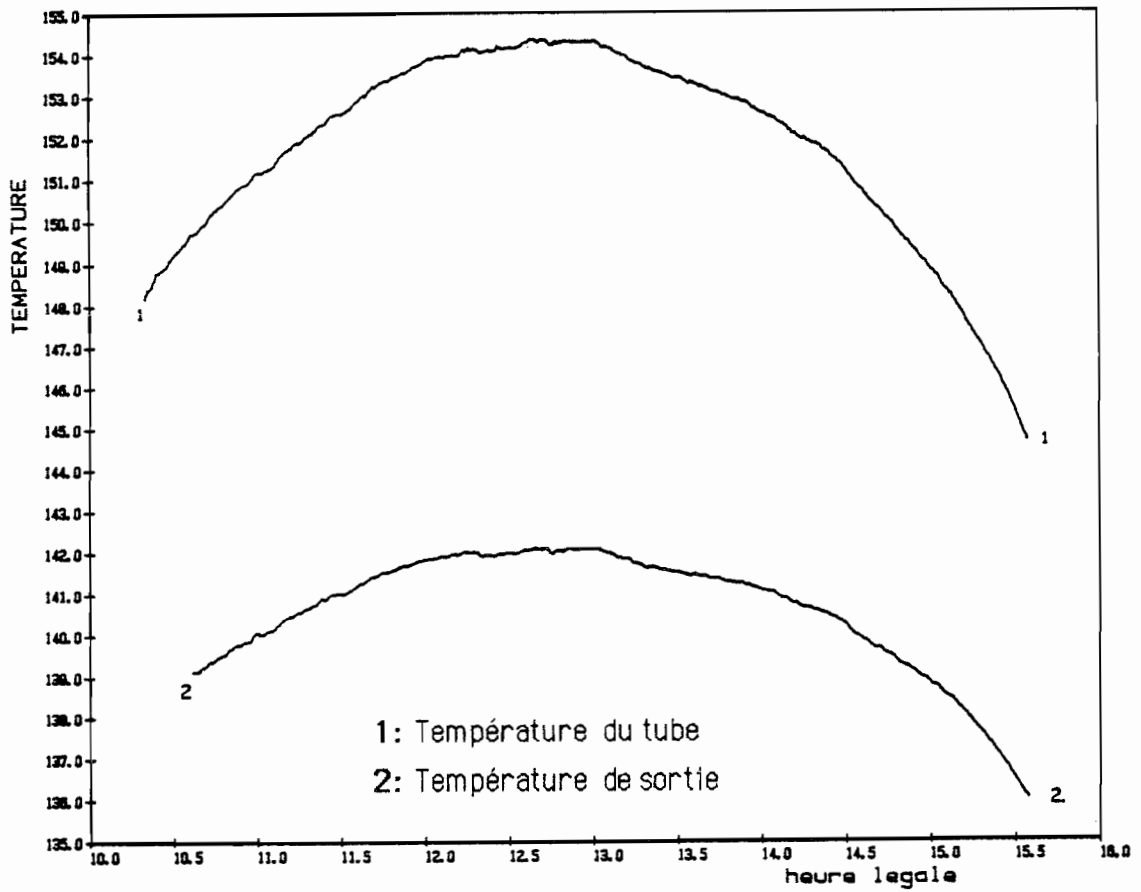


Figure 75 *Variation journalière des températures de tube et de sortie*

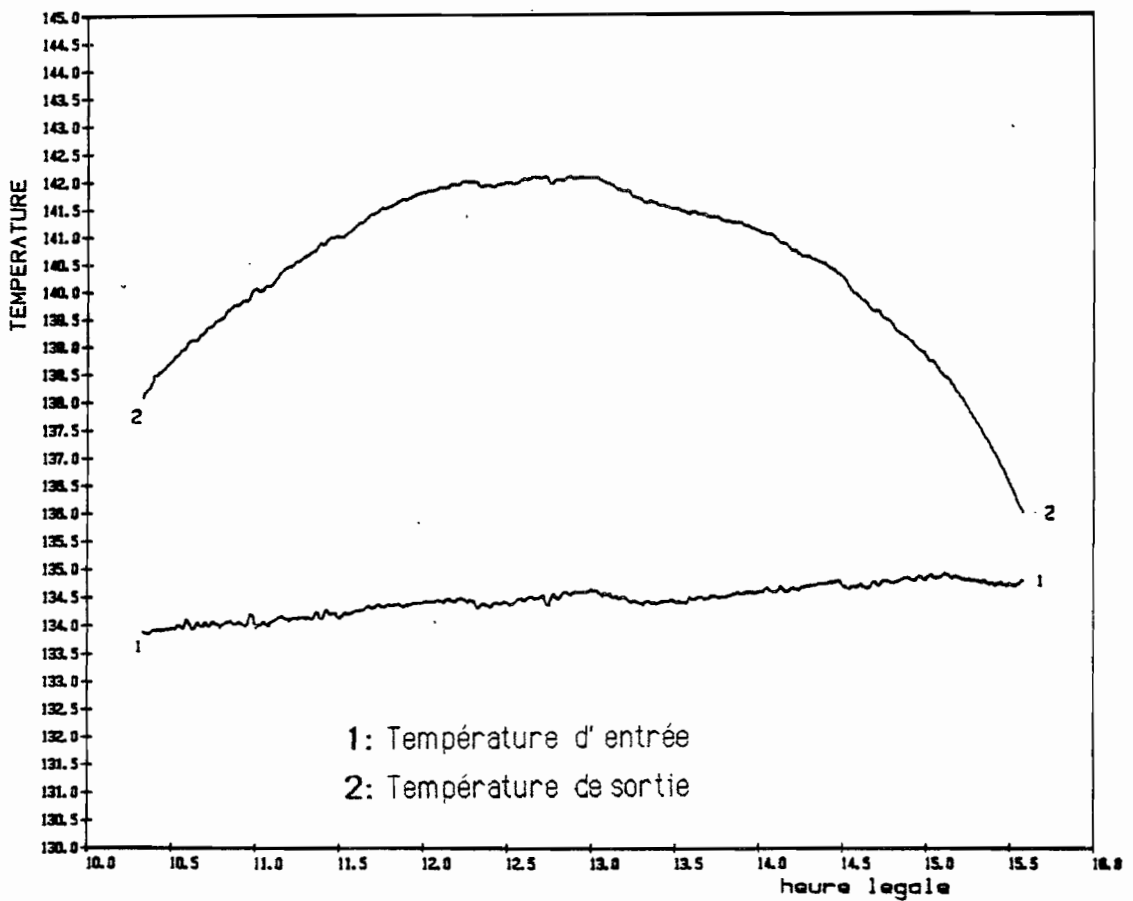


Figure 76 *Variation journalière des températures d'entrée et de sortie*

## 4.2 – MODELE THERMIQUE POINTE

Sur le tableau suivant nous avons groupé les valeurs expérimentales utilisées pour la détermination du modèle thermique pointé ( $l_p=l_{pt}=0$ ):

NP	T <sub>MF</sub>	T <sub>AMB</sub>	FLUX GLOBAL	V. VENT	T <sub>RED</sub>	RENDEMENT
1	35.2	13.1	1027.5	2.01	0.0215	0.521
2	35.3	12.8	1033.2	2.20	0.0217	0.525
3	35.3	12.9	1042.7	1.99	0.0215	0.525
4	53.6	14.2	1053.2	1.99	0.0374	0.494
5	54.0	14.2	1054.6	2.35	0.0377	0.502
6	54.0	14.5	1064.7	2.36	0.0371	0.499
7	54.0	14.3	1067.7	3.07	0.0372	0.494
8	54.1	14.8	1061.5	2.02	0.0370	0.492
9	53.8	15.1	1062.0	1.97	0.0365	0.495
10	53.6	14.8	1067.4	2.22	0.0364	0.487
11	74.3	16.7	1063.7	1.80	0.0558	0.451
12	80.1	17.1	1067.9	1.86	0.0590	0.452
13	80.4	16.5	1066.7	1.98	0.0599	0.456
14	80.5	16.5	1068.4	2.08	0.0599	0.459
15	80.6	17.2	1068.2	1.54	0.0593	0.457
16	80.6	17.0	1068.7	1.97	0.0595	0.457
17	80.6	16.6	1069.2	1.98	0.0599	0.457
18	80.5	16.9	1073.4	1.63	0.0593	0.451
19	102.8	18.1	1064.8	2.09	0.0795	0.420
20	102.9	18.3	1060.1	2.03	0.0798	0.424
21	103.0	18.2	1061.1	2.20	0.0799	0.423
22	122.3	17.8	1062.9	2.33	0.0983	0.390
23	122.6	18.0	1056.6	2.31	0.0990	0.401
24	122.7	18.3	1055.1	2.30	0.0989	0.402
25	122.8	18.2	1046.2	2.20	0.1000	0.407

Sur ces données nous avons déterminé, par la méthode des moindres carrés, un modèle descriptif du second ordre et la Figure 77 nous montre le modèle :

$$\eta = 0.558 - 1.102 T_{RED} - 0.042 T_{RED}^2$$

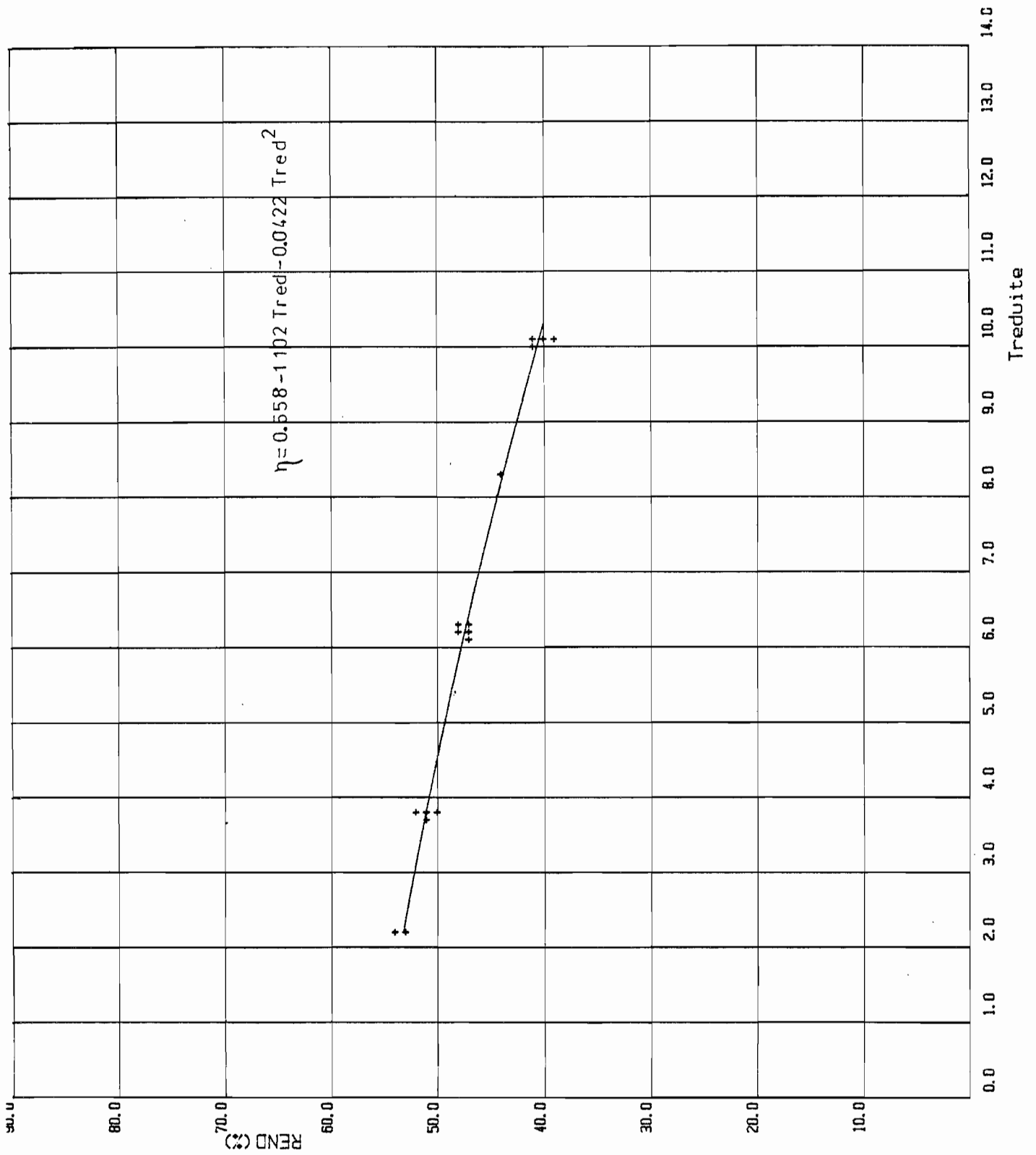


Figure 77 *Modèle du second ordre du capteur CPC type II*

### 4.3 – RENDEMENT OPTIQUE

Pendant une journée de ciel clair, nous avons testé le capteur à une température proche de la température ambiante, en faisant varier  $|p|$  et  $lpt$  :

- Matin Variation de  $|p|$ , en maintenant nuis l'azimuth et  $lpt$ .

$|p|$  est calculé pour l'heure solaire vraie du milieu de l'intervalle de stabilité, sachant que :

$$|p| = \text{asn} ( \cos h \sin a_s )$$

**h** - Hauteur du soleil

**$a_s$**  - Azimuth du soleil

- Après-midi Le capteur a suivi le soleil en azimuth et nous avons fait varier  $lpt$ .

Nous avons caractérisé ainsi la surface de rendement optique par des intersections à  $|p|$  constant.

Le tableau suivant contient les points expérimentaux qui ont servi à la détermination de la **surface de rendement optique**.

Le rendement optique ( $F'\eta_0$ ) est obtenu par extrapolation à température réduite nulle, en utilisant le modèle thermique (pointé).

La Figure 78 montre l'aspect de cette surface et nous pouvons vérifier qu'elle est indépendante de  $|p|$ , pour le domaine balayé ( $-40^\circ$  à  $+40^\circ$ ) ce qui est logique car le capteur n'a pas de couverture et les effets de bout sont faibles.

Nous avons eu besoin de monter jusqu'au 5<sup>ème</sup> ordre pour avoir une représentation correcte des points expérimentaux :

$$F'\eta_0 = A_0 + A_1 |p| + A_2 |p|^2 + A_3 |p|^3 + A_4 |p|^4 + A_5 |p|^5$$

$$A_0 = 0.533$$

$$A_1 = - 1.033 \cdot 10^{-2}$$

$$A_2 = 2.467 \cdot 10^{-3}$$

$$A_3 = - 1.929 \cdot 10^{-4}$$

$$A_4 = 7.01 \cdot 10^{-6}$$

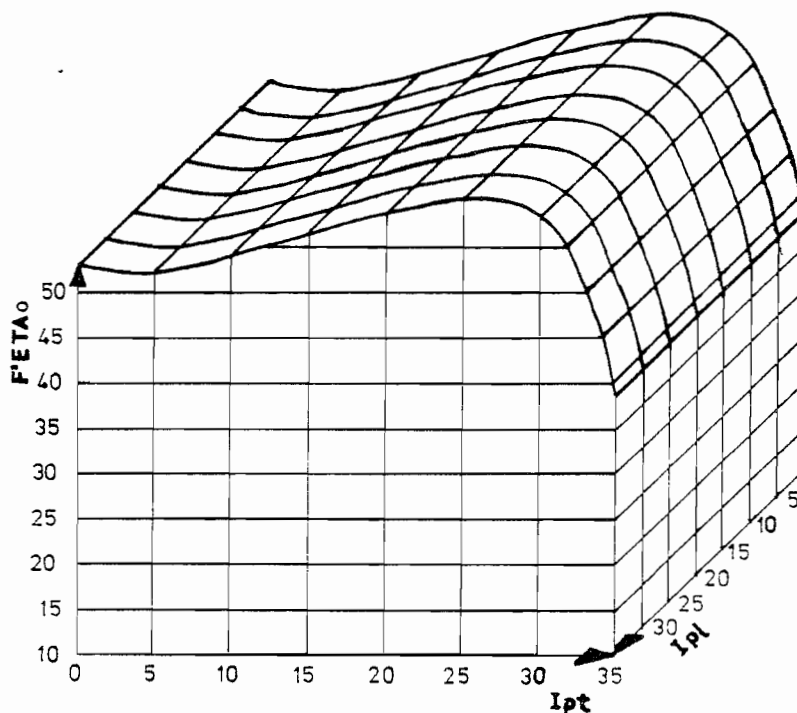
$$A_5 = - 9.616 \cdot 10^{-8}$$

L'erreur commise est inférieure à  $10^{-5}$  et nous pouvons donc considérer le lissage comme étant acceptable.

Le tableau suivant regroupe les valeurs expérimentales qui ont permis cette détermination.

**VALEURS EXPERIMENTALES POUR LA DETERMINATION  
DE LA SURFACE DE RENDEMENT OPTIQUE**

HAUTEUR [°]	AZIMUTH [°]	$l_{pt}$ [°]	$l_{pl}$ [°]	$T_{RED}$ [m <sup>2</sup> K/W]	REND $\eta$	Rend Optique $F' \eta_0$
<b>BALAYAGE LONGITUDINAL</b>						
46.12	-60.45	0	- 37.08	0.018	0.51	0.531
48.98	-55.27	0	- 32.64	0.017	0.52	0.539
50.34	-52.49	0	- 30.42	0.017	0.52	0.539
51.65	-49.58	0	- 28.19	0.016	0.52	0.537
52.91	-46.51	0	- 25.95	0.015	0.52	0.537
53.51	-44.91	0	- 24.82	0.016	0.52	0.538
54.66	-41.62	0	- 22.59	0.014	0.52	0.535
56.69	-34.69	0	- 18.21	0.014	0.52	0.535
57.61	-30.91	0	- 15.97	0.013	0.52	0.534
58.79	-24.89	0	- 12.61	0.012	0.52	0.533
59.72	-18.53	0	- 9.22	0.012	0.52	0.533
60.21	-14.12	0	- 6.96	0.012	0.52	0.533
60.67	- 7.33	0	- 3.58	0.011	0.52	0.532
60.84	- 0.41	0	- 0.20	0.011	0.52	0.532
<b>BALAYAGE TRANSVERSAL</b>						
		5	0	0.012	0.51	0.523
		10	0	0.013	0.53	0.544
		15	0	0.013	0.55	0.564
		20	0	0.013	0.57	0.584
		25	0	0.012	0.59	0.602



**Figure 78** *Surface de rendement optique*

## **5 - PREVISION DES PERFORMANCES**

### **5.1 - RENDEMENTS INSTANTANES**

Le modèle utilisé permet soit la prévision de l'utilisabilité annuelle, soit les performances journalières .

Dans le cas où le flux incident est calculé, nous utiliserons le modèle de Ph. CHOUARD [36] car nous avons besoin d'un modèle prenant en compte le mouvement apparent du soleil.

La validation de ce code a été réalisée en comparant , au niveau de la journée , les performances calculées et mesurées et dans les figures 79 et 80 nous pouvons vérifier que l'accord est assez bon.

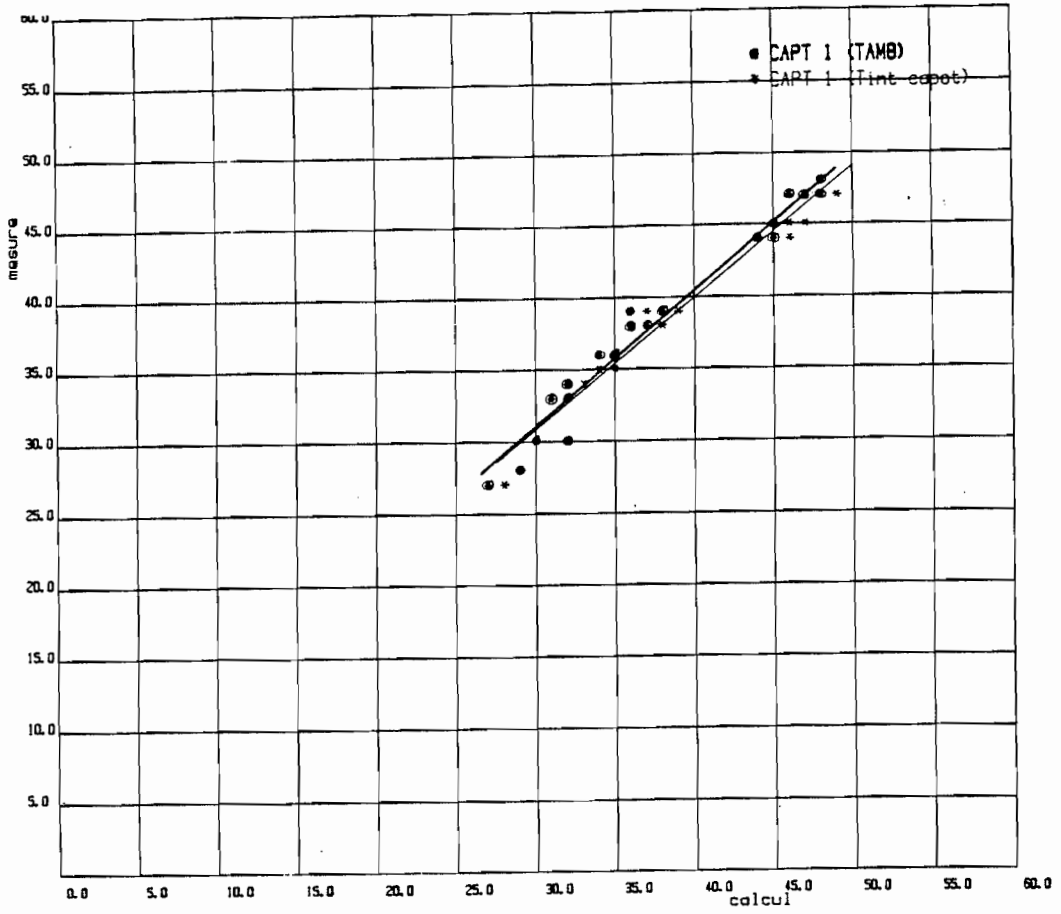


Figure 79 *Comparaison Modèle - Expérience* CAPTEUR 1

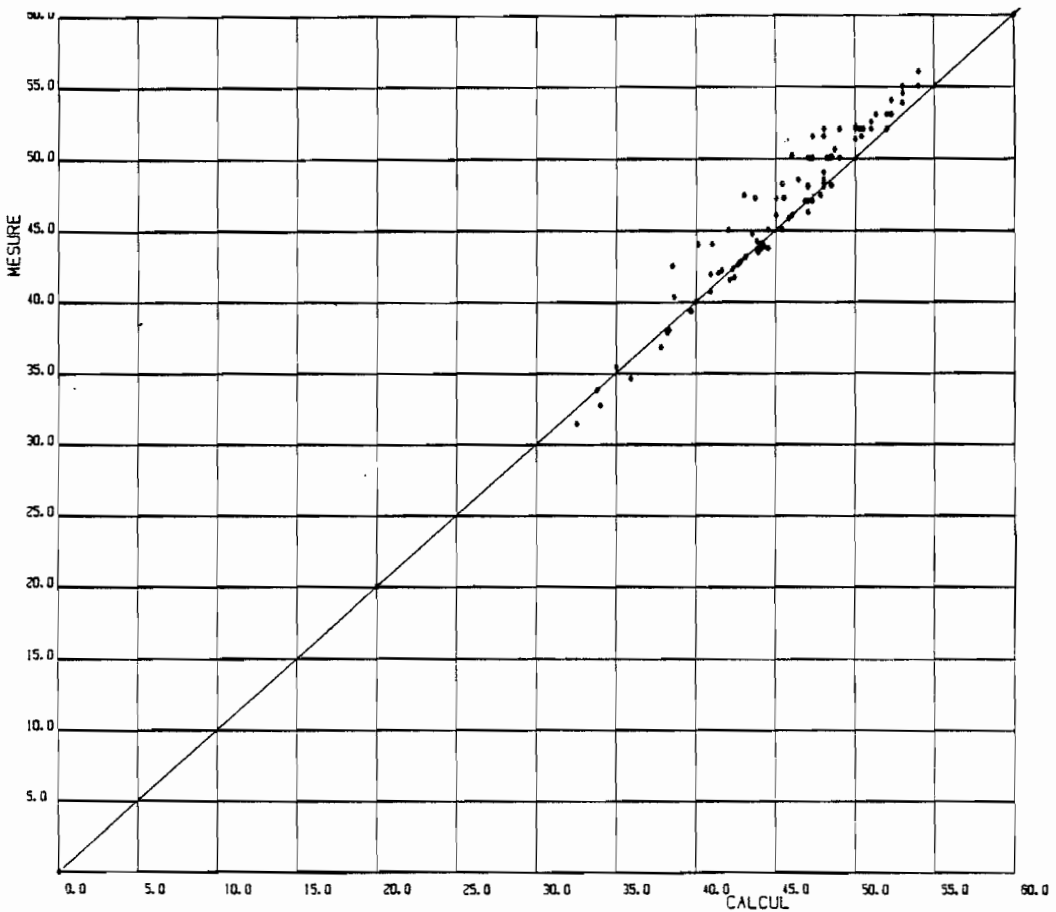


Figure 80 *Comparaison Modèle - Expérience* CAPTEUR 2

## 5.2 - PRODUCTIBILITE ANNUELLE DU CAPTEUR

Pour illustrer les possibilités de ce modèle, nous allons faire une application au projet d'une installation industrielle.

Ayant déterminé les courbes d'utilisabilité (Chap III 2.5 ), nous utiliserons maintenant les coefficients de ces courbes dans une méthode de calcul du type " droite de charge" [16], pour calculer l'énergie réellement disponible et la température moyenne du stockage .

Nous supposerons une installation avec une consommation constante le long de l' année, de 10 000 litres à 90 °C, à Carpentras .

Pour qu'il n'y ait pas des excédents d'énergie , la surface de captation doit être de 186 m<sup>2</sup> ce qui correspond à 100 % d'apport solaire au mois le plus favorable , qui est dans ce cas le mois d'Août.

Les capteurs, préalablement définis , seront montés E-W avec un azimuth nul et une inclinaison de 45 ° ( la latitude de Carpentras est de 44 ° ).

L'échangeur , où sera chauffée l'eau nécessaire à l'installation industrielle, permet un retour au système solaire à 60 °C.

### BILAN THERMIQUE

MOIS	T amb	T réseau	F Ins	HH	T sol	CONS	En NEC	En SOL	ECON
JAN	4.9	60	52	1873	77.3	10000	10814	6228	57.6
FEV	6.1	60	57	2779	82.1	10000	9767	7200	73.7
MAR	9.7	60	55	3739	84.0	10000	10814	8651	80.0
AVR	12.5	60	57	4909	87.5	10000	10465	9605	91.8
MAI	16.3	60	64	6087	88.5	10000	10814	10256	94.8
JUN	20.1	60	66	6564	83.4	10000	10465	8168	78.0
JUL	22.7	60	75	6826	90.0	10000	10814	10803	100.0
AOU	22.2	60	71	5821	90.0	10000	10814	10814	100.0
SEP	19.0	60	68	4553	90.0	10000	10465	10465	100.0
OCT	14.0	60	58	3047	83.7	10000	10814	8528	78.9
NOV	9.1	60	46	1903	76.6	10000	10465	5800	55.4
DEC	5.7	60	44	1515	73.2	10000	10814	4773	44.1
<b>ANNEE</b>							<b>127325</b>	<b>101289</b>	<b>79.6</b>

- T amb** [°C] - Température ambiante moyenne mensuelle
- T réseau** [°C] - Température du réseau moyenne mensuelle
- F ins** [%] - Fraction d'insolation
- HH** [Wh m<sup>-2</sup>j<sup>-1</sup>] - Energie journalière moyenne mensuelle
- T sol** [°C] - Température moyenne mensuelle du stockage solaire
- CONS** [l/jour] - Consommation journalière
- En NEC** [kWh/mois] - Besoins énergétiques mensuels
- En SOL** [kWh/mois] - Energie solaire disponible en une année moyenne
- ECON** [%] - Economie prévisible en une année moyenne

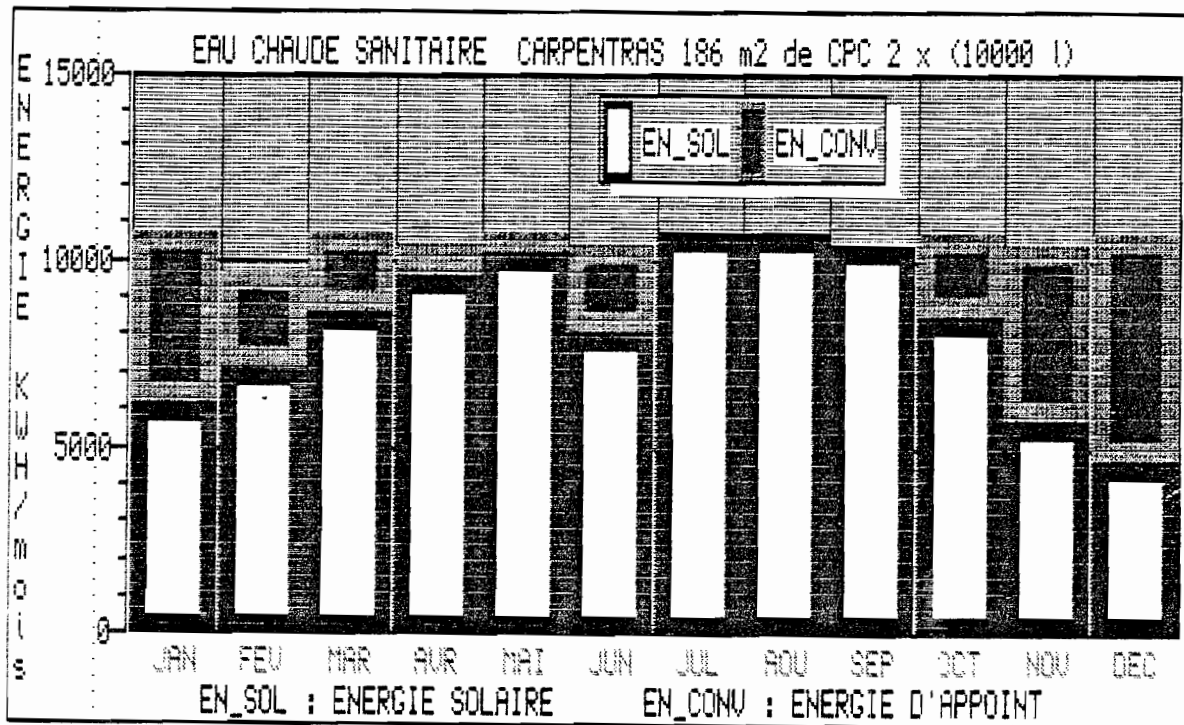


Figure 81 Bilan annuel d'une installation

## **IV – SUGGESTION DE PROCEDURE D' ESSAI**

### **0 – INTRODUCTION**

Les thèmes exposés précédemment et nos conclusions permettent une critique des normes existantes.

Dans ce chapitre nous commencerons par une analyse critique de la Norme AFNOR NF P50-501 et ensuite nous présenterons une proposition de procédure d'essai.

### **1 – ANALYSE CRITIQUE DE LA NORME NF P 50-501**

La Norme NF P50-501 est appliquée à la caractérisation de capteurs à liquide en régime quasi-stationnaire et son domaine d'application exclue certains types de capteurs :

**type 1** – Capteurs concentrateurs

**type 2** – Capteurs à stockage incorporé

**type 3** – Capteurs avec changement de phase

**type 4** – Capteurs à air

Selon cette norme, les capteurs à basse concentration peuvent être testés à condition que le fabricant accepte qu'on les caractérise comme si il s'agissait de capteurs plans.

A ce niveau on devrait considérer deux situations :

#### **1.1 – ENSOLEILLEMENT NATUREL**

Les capteurs des types 2, 3 et 4 doivent continuer à être exclus mais les capteurs concentrateurs peuvent être testés à condition de décomposer le test en deux parties :

##### **- Caractérisation thermique**

Avec le capteur pointé et en ne considérant que le flux accepté par le capteur, nous pouvons déterminer la courbe caractéristique du capteur.

### - Caractérisation optique

En faisant varier les angles d'incidence projetés  $l_{p1}$ ,  $l_{p2}$ , nous déterminons ainsi la **surface de rendement optique**

## 1.2 – ENSOLEILLEMENT ARTIFICIEL

En ensoleillement artificiel il est difficile de tester les capteurs à forte concentration, néanmoins il sera possible de tester des capteurs à faible concentration si deux conditions sont respectées :

- l'INTRANT doit être bien caractérisé
- Le champ de lampes doit couvrir uniformément le domaine d'acceptance du capteur.

Nous pensons que la norme devrait définir le seuil de la basse concentration, par exemple correspondant aux capteurs qui peuvent être utilisés en position fixe car leur angle d'acceptance leur permet de "voir" toutes les lampes.

## 1.3 – MESURE DES RAYONNEMENTS

La critique suivante porte sur les mesures des rayonnements, notamment du rayonnement total (solaire + infra-rouge).

Il est important de connaître le flux de rayonnement infra-rouge et ni le pyrgeomètre ni le Pyrradiomètre ne donnent entière satisfaction.

La solution proposée ici passe par l'utilisation du concept de **température résultante d'environnement** celle-ci devant remplacer la température ambiante (voir Chap II 2).

## 1.4 – CRITERES DE STABILITE

Le critère de stabilité proposé pour le rayonnement solaire en ensoleillement naturel nous paraît trop compliqué sans apporter de précision supplémentaire par rapport à ne considérer qu'une heure et demi avant et après midi solaire et de considérer comme étant acceptables des variations inférieures à 2 % pendant la période d'essai et de 5 % pendant la période de conditionnement préalable.

Le suivi du soleil pendant le test permet d'élargir considérablement la période utilisable de la journée.

Le seuil supérieur de  $880 \text{ W/m}^2$ , pour les essais en ensoleillement naturel, rendent impossibles les essais en extérieur à partir de la mi-saison pour des sites ayant une limpidité atmosphérique élevée.

Par contre, pour l'ensoleillement artificiel, le seuil inférieur de  $760 \text{ W/m}^2$  est acceptable.

### **1.5 - FLUX INFRA-ROUGE**

Le seuil supérieur imposé de  $400 \text{ W/m}^2$ , pour le rayonnement infra-rouge, correspond à une température équivalente de ciel de **16.8 °C** ( considérant l'environnement comme un corps noir).

Ceci impliquerait une climatisation assez "énergique" du hall d'essais et ceci est impensable.

L'utilisation du concept de TRE nous permet de ne pas climatiser le hall.

### **1.6 - VITESSE DU VENT**

L'influence du vent doit être prise en considération, car il est évident que des valeurs expérimentales obtenues par vent de  $6 \text{ m/s}$  ne peuvent pas être mélangées avec des valeurs obtenues sans vent.

Nous ne pouvons donc pas être d'accord avec les seuils imposés par la norme pour les essais en ensoleillement naturel.

L'existence de dispositifs de selectivité en surface ou en volume et le renforcement du flux incident ( cas des concentrateurs ) rend les capteurs moins sensibles au vent, ceci étant le cas des CPCs .

## **2 - EXPRESSION DES RESULTATS**

Les essais en ensoleillement naturel des capteurs du type CPC peuvent être représentés en confondant TRE et température ambiante.

Par contre pour les essais en intérieur ou en extérieur de capteurs sans dispositifs de diminution de pertes ( ni selectivité en volume ou en surface , ni concentration ) il est indispensable de considérer non seulement la température résultante d'environnement mais aussi l'effet du vent.

## 2.1 – ENVIRONNEMENT STANDARD

Nous avons déjà vu qu'il était intéressant de considérer un environnement standard par rapport auquel on exprimera la courbe caractéristique du capteur.

Quoique en étant pas en accord total avec l'environnement proposé par la Commission des Communautés Européennes, dans le rapport 1982 EUR 8006 [33], nous pensons qu'il peut servir de repère commun à tous les laboratoires :

<b>Flux solaire</b> ( de 0.25 à 2.5 $\mu$ )	= 800 W/m <sup>2</sup>
<b>Pourcentage de rayonnement diffus</b>	= 0 %
<b>Température ambiante</b>	= 15 °C
<b>Température équivalente de ciel</b>	= 5 °C
<b>Vitesse du vent</b>	= 3 m/s

La vitesse du vent est importante et impossible à atteindre avec la plupart des simulateurs existants.

La raison d'être de cette vitesse correspond à une tentative de minimiser les effets du rayonnement infra-rouge , ce qui n'est que partiellement correct car :

- D'une part , nous l'avons déjà vu, quand la vitesse du vent augmente la température résultante d'environnement tend vers la température ambiante convective ce qui est correct.
- D' autre part, nous avons vu aussi que la vitesse du vent a une influence sur le coefficient de pertes du capteur ( pente de la courbe caractéristique ) tandis que l'infra-rouge ne joue pas sur le coefficient de pertes mais sur l'intersection à l'origine.

Aussi l' augmentation de la vitesse du vent faussera-t-elle les résultats.

Nous avons donc considéré une vitesse de 1 m/s ce qui est déjà raisonnable pour les simulateurs existants.

Le simulateur de vent a l'avantage de renouveler l' air sur la couverture transparente mais pour les essais que nous avons effectués au DER ( **D**epartamento de **E**nergias **R**enovaveis ) nous avons été obligés de mettre un déflecteur proche du bord d'attaque du capteur , afin d'éviter une zone de stagnation.

En utilisant le code de calcul TRE, nous avons calculé pour cet environnement standard :

<b>Rayonnement infra-rouge descendant</b>	= 339 Wm <sup>-2</sup>
<b>Température résultante d'environnement</b>	= 15.3 °C
<b>Température résultante d'environnement corrigée</b>	= 10.2 °C
<b>Emissivité apparente du ciel</b>	= 0.87

## 2.2 - MODELE OPTIQUE

Pour les capteurs à forte dépendance angulaire comme c'est le cas des concentrateurs stationnaires et les concentrateurs à demi-suivi, le rendement optique sera caractérisé par une **surface de rendement optique**,  $\eta_{opt}(l_p, l_{pt})$ , définie par ses coefficients  $B_{ij}$ .

Dans le cas des capteurs plans l'influence de l'angle d'incidence est d'ue seulement à la présence de la couverture transparente dont le comportement est décrit par DUFFIE & BECKMAN [26].

## 2.3 - MODELE THERMIQUE

Dans le cas des capteurs concentrateurs, le modèle thermique est représenté par la courbe caractéristique qui doit être obtenue par un essai pointé.

La courbe caractéristique est normalement du second ordre :

$$\eta = F' \eta_{l_{pt}=l_p=0} - A_1 T_{RED} - A_2 T_{RED}^2$$

Pour les capteurs plans sans couverture, la courbe caractéristique sera du type :

$$\eta = F' (\tau \alpha) - (K_1 + K_2 V_e) T_{RED}$$

## 2.4 - TABLEAU DE PRESENTATION DES RESULTATS

La feuille de présentation des résultats devra contenir des indications telles que le flux infra-rouge, la température équivalente de ciel, la vitesse du vent en plus des valeurs normalement indiquées.

A titre indicatif nous présentons, sur le tableau de la page suivante, les résultats de l'essai d'un capteur sélectif réalisé sur le banc artificiel du DER/ Lisbonne [37].

## TABLEAU DE PRESENTATION DES RESULTATS

Capteur : \_\_\_\_\_ LABORATOIRE : \_\_\_\_\_  
 Marque et référence : \_\_\_\_\_ DATE : \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
 Aire d'ouverture : \_\_\_\_\_ m<sup>2</sup> Ensoleillement : NATUREL \_\_\_\_\_  
 Fluide caloporteur : \_\_\_\_\_ ARTIFICIEL \_\_\_\_\_  
 OBSERVATIONS : \_\_\_\_\_

NP	T <sub>amb</sub> °C	T <sub>ciel</sub> °C	Φ <sub>Sol</sub> W/m <sup>2</sup>	Φ <sub>IR</sub> W/m <sup>2</sup>	T <sub>REC</sub> °C	V <sub>Vent</sub> m/s	T <sub>REDTA</sub> K m <sup>2</sup> /W	T <sub>REDTRE</sub> K m <sup>2</sup> /W	REND %
1	20.7	46.0	1011	587	31.8	1.1	0.0054	- 0.0056	69.8
2	20.8	46.0	1011	588	31.9	1.1	0.0053	- 0.0057	70.0
3	21.3	46.4	1011	590	32.4	1.1	0.0049	- 0.0061	70.4
4	21.6	46.7	1011	592	32.7	1.1	0.0046	- 0.0064	69.9
5	19.1	44.7	1011	578	30.1	1.2	0.0101	- 0.0008	68.7
6	19.7	45.2	1011	581	30.6	1.2	0.0095	- 0.0013	68.4
7	20.3	45.7	1011	585	31.2	1.2	0.0088	- 0.0020	67.4
8	20.6	45.9	1011	586	31.5	1.2	0.0085	- 0.0023	67.9
9	23.0	47.8	1011	600	33.8	1.2	0.0203	0.0096	64.4
10	23.1	47.8	1011	601	33.9	1.2	0.0202	0.0095	65.0
11	23.1	47.8	1011	601	33.9	1.2	0.0203	0.0096	64.4
12	24.1	48.6	1011	607	34.9	1.2	0.0195	0.0088	63.3
13	25.6	49.8	1011	616	36.3	1.2	0.0272	0.0166	60.5
14	25.8	50.0	1011	617	36.5	1.2	0.0270	0.0164	60.5
15	26.3	50.4	1011	620	37.0	1.2	0.0266	0.0160	60.6
16	26.3	50.4	1011	620	37.0	1.2	0.0265	0.0159	60.3
17	25.2	49.5	1011	613	35.9	1.2	0.0363	0.0257	54.9
18	25.3	49.6	1011	614	36.0	1.2	0.0363	0.0257	55.2
19	26.3	50.4	1011	620	37.0	1.2	0.0354	0.0248	55.6
20	26.6	50.6	1011	622	37.3	1.2	0.0351	0.0245	55.7
21	24.7	49.1	1011	610	35.4	1.2	0.0558	0.0452	45.6
22	24.4	48.9	1011	609	35.2	1.2	0.0554	0.0447	45.5
23	24.4	48.9	1011	609	35.2	1.2	0.0552	0.0445	44.9
24	24.5	48.9	1011	609	35.2	1.2	0.0550	0.0444	44.6

## COURBES CARACTERISTIQUES

**COURBE 1** : Ensoleillement artificiel ( T = T<sub>a</sub> )  $\eta = 0.730 - 4.96 T_{RED}$

**COURBE 2** : Ensoleillement artificiel ( T = T<sub>RE</sub> )  $\eta = 0.676 - 4.93 T_{RED}$

**COURBE 3** : Environnement standard ( T = T<sub>astand</sub> )  $\eta = 0.647 - 4.96 T_{RED}$

**COURBE 4** : Ensoleillement naturel ( T = T<sub>a ext</sub> )  $\eta = 0.680 - 5.20 T_{RED}$

RENDIMENTO INSTANTANEO DO COLECTOR SELECTIVO

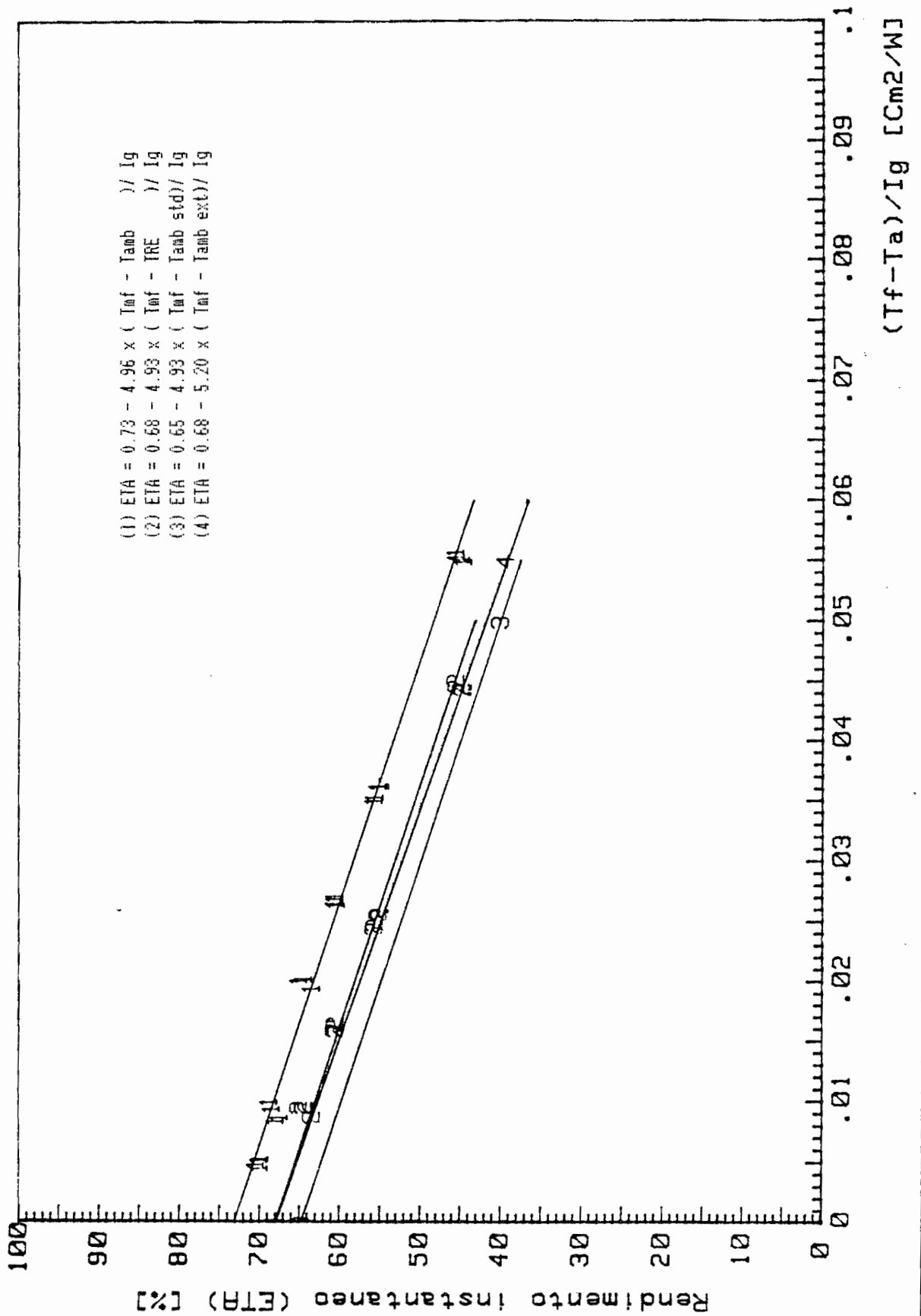


Figure 82 Courbes caractéristiques d'un capteur sélectif ( Extrait de [37] )

## V – CONCLUSIONS

Les bancs d'essai en ensoleillement artificiel ont deux problèmes principaux :

- le non parallélisme du flux "solaire", qui empêche le test de capteurs à faible angle d'acceptance et qui oblige à mieux caractériser l'INTRANT pour les capteurs concentrateurs stationnaires, en faisant par exemple une cartographie avec un pyranomètre d'acceptance tronquée ( PAT ).
- Les niveaux de flux infra-rouge sont très élevés car on atteint facilement entre 500 à 600  $W/m^2$ , contre 300  $W/m^2$  à l'extérieur.

Le problème des niveaux de flux infra-rouge peut être résolu et dans cette étude nous avons voulu montrer qu'il n'est pas possible de confondre les essais en ensoleillement naturel et artificiel mais qu'il est possible d'extrapoler les résultats de l'un à l'autre, par le concept de **température résultante d'environnement**.

Une fois résolu le problème de l'extrapolation des résultats d'un environnement à un autre, nous avons étudié la possibilité d'une caractérisation thermique commune des différents capteurs et nous avons constaté que ceci était possible pour différentes sortes de capteurs.

Notre but étant d'étudier les capteurs à faible concentration du type CPC, nous avons étudié seulement les capteurs à faible inertie, avec fluide caloporteur sans changement de phase.

La généralisation oblige à la caractérisation séparée des caractéristiques optiques et thermiques.

D'une façon générale un capteur solaire peut être caractérisé par:

- **Modèle thermique** - Courbe du 1<sup>er</sup> ou du 2<sup>nd</sup> ordre
- **Surface de rendement optique**

Nous avons vérifié les causes principales de la non reproductibilité et nous avons montré l'intérêt de la présentation de courbes caractéristiques normalisées pour un environnement standard.

Le sujet de la thèse étant la **modélisation et caractérisation des capteurs à faible concentration**, nous avons constaté que la réponse aux questions que nous nous sommes posés au fur et à mesure n'était pour la plupart des fois pas spécifique des CPC.

Bien que nous éloignant du sujet principal, nous avons pensé qu'il était tout de même important de développer ces questions.

Nous pensons avoir décrit, d'une façon raisonnable, la caractérisation des capteurs solaires, cependant il ne faut jamais oublier que ces capteurs seront intégrés dans un système plus complexe et que les modes d'association et l'interface avec le reste de l'installation auront sûrement un rôle important.

Notre préoccupation étant surtout la caractérisation des capteurs en régime quasi-stationnaire, nous n'avons pas abordé d'autres questions communes aux autres installations thermiques non solaires (par exemple le comportement dynamique des tuyauteries).

Nous ne pouvons pas espérer une baisse considérable du prix des équipements solaires ni des miracles au niveau de leurs performances, néanmoins nous pensons qu'il y aura un effort à faire au niveau du stockage, notamment par le biais des réactions chimiques réversibles (déjà maîtrisées pour des températures bien plus élevées).

Les applications thermiques à basse et moyenne température, de l'énergie solaire, sont économiquement rentables quoiqu'ayant des périodes de retour du capital trop longues.

Il faut continuer un effort de développement de ces technologies, car:

- **La crise actuelle du marché solaire ne peut être que temporaire.**
- **L'augmentation annuelle des réserves prouvées de Pétrole est depuis 1973 inférieure à la consommation mondiale et les nouveaux gisements requièrent de plus en plus d'énergie pour l'extraction.**
- **La demande de Pétrole comme matière première rendra luxueuse son utilisation comme combustible.**

**VI - BIBLIOGRAPHIE**

- [ 1 ] - **Capteurs solaires , mesure des performances thermiques**  
Norme AFNOR NF P50-501, **1977**
- [ 2 ] - **Method of testing for rating solar collectors, based on thermal performances**, Norme NBSIR 74-635, **1974**
- [ 3 ] - **Usability of solar collectors, based on thermal performances**  
Bundesverband Solarenergie BSE, **1978**
- [ 4 ] - **Method of testing to determine the thermal performances of solar collectors** , Norme ASHRAE 93-77 , **1977**
- [ 5 ] - **Norma de ensaio de colectores solares** Norme Portugaise NP 1803
- [ 6 ] - **Determination of the instantaneous efficiency of a solar collector by transient method**, E. ARANOVITCH et al , JRC- Ispra , **1976**
- [ 7 ] - **Results and analysis of the CEC round robin testing of three solar collectors**, A. DERRICK , Solar Energy Unit/ University College/ CARDIF , **1979**
- [ 8 ] - **Solar simulator and round robin series (Initial results)**  
J. E. MOON, Solar Collector Testing Group Meeting, Sophia Antipolis, Oct **1981**
- [ 9 ] - **Facility reproductibility tests (Initial results)**  
J. E. MOON, Solar Collector Testing Group Meeting, Sophia Antipolis, Oct **1981**
- [10] - **The influence of environmental parameters on flat plate solar collectors performance** , ASHLEY GREEN , Proceedings of the UK ISES Conference ISES, **1979**
- [11] - **Principles of cylindrical concentrators for solar energy**  
R. WINSTON & H. HINTERBERGER , Solar Energy N° 17 , page 255  
Pergamon Press , **1975**
- [12] - **CPC concentrators with maximum concentration**  
A.RABL , p. 1871  
Applied Optics 15 , **1976**

- [13] - **Optical and thermal design of non imaging concentrators**  
N. B. GOODMAN , A. RABL and R. WINSTON
  
- [14] - **The Optics of Nonimaging Concentrators**  
R. WINSTON , W.T. WELFORD , Academic Press , 1978
  
- [15] - **Derivation of method for predicting long term average energy delivery of solar collectors** , C. PEREIRA & A. RABL, Solar Energy N° 23/3 , page 223  
Pergamon Press 1979
  
- [16] - **Simple procedure for predicting long term average performance**  
C. PEREIRA & A. A. RABL , Solar Energy N° 23/3 , page 235  
Pergamon Press 1979
  
- [17] - **Truncation of nonimaging cusp concentrators**  
W.R. MacINTIRE , Solar Energy N° 23/4 , page 351  
Pergamon Press 1979
  
- [18] - **Optimisation of sationary nonimaging reflectors for tubular evacuated receivers aligned North-South** W.R. MacINTIRE , Solar Energy N° 24/2 , p169  
Pergamon Press 1979
  
- [19] - **An internal cusp reflectorfor an evacuated tubular heat pipe solar thermal collector** , ORTOBASI & W. M BUHEL , Solar Energy N° 25/1 , page 67  
Pergamon Press 1980
  
- [20] - **Thermal analysis of of CPC collectors** C.K.HSIEH , Solar Energy N° 27, p 19  
Pergamon Press 1981
  
- [21] - **Angular dependance of optical efficiency of evacuated tubular collectors**  
S.P. CHOW & G.L. HARDING , Solar Energy N° 34/6 page 489  
Pergamon Press 1985
  
- [22] - **Communication personnelle**  
M. CHANTANT code CHAOPT , 1983
  
- [23] - **Code DELFINE / Système CASTEM**

- [24] - **Light collection within framework of geometrical optics**  
R. WINSTON , Journal of the Optical Society of America N° 60 p 245  
OAS,1970
- [25] - **Comparison of solar concentrators**  
A. RABL , Argonne Report SOL 75-02 Solar Energy in press , 1975
- [26] - **Solar Energy Thermal Processes**  
DUFFIE & BECKMAN , WILEY , 1974
- [27] - **Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces** , C. Y. MA & M. IQBAL , Solar Energy 31  
Pergamon Press, 1983
- [28] - **Thermal Radiation Heat Transfert**  
SIEGELL & HOWELL , Mac Graw-Hill , 1972
- [29] - **Communication personnelle**  
P. GALLET , Département d'Héliophysique / MARSEILLE , 1981
- [30] - **Cours Supérieur de Chauffage , Ventilation et Conditionnement de l'air**  
Livre IV , Compléments divers , André MISSENARD  
Editions Eyrolles, 1964
- [31] - **Analyse physique et expérimentale des capteurs plans en régime statique**, DEVIN , Ecole d'été de Cargèse , 1977
- [32] - **Cahier de spécifications pour la réalisation d'un capteur d'ambiance**  
**RT 84 - 1261** , B. VERDIER , LTSA Cen de CADARACHE , 1984
- [33] - Rapport CEC 1982 EUR 8006 1982
- [34] - **Engineers's guide to solar energy**  
Y. HOWELL & J. BERENY ; SERI , 1979
- [35] - **Heat transmission**  
W.H. McADAMS , McGraw-Hill , 1954
- [36] - **Bilan thermique d'une maison solaire**  
Ph. CHOUARD , EYROLLES , 1979

- [37] - **Banco de ensaio de iluminação artificial**  
J. COSTA & A.A. GREEN , III Congresso Ibérico de Energia Solar , MADRID , **1987**
- [38] - **New reflector design wich avoids losses through gaps between tubular absorbers and reflectors**, W.R. MacINTIRE , Solar Energy 25/3, page 215  
Pergamon Press **1980**
- [39] - **Solar and wind induced external coefficients for solar collectors**,  
J.H. WATMUFF, W. CHARTERS and PROCTOR, Complex 2  
COMPLESS **1977**
- [40] - **Physique des Convertisseurs Héliothermiques**,  
P. GALLET, F. PAPINI, G. PERI  
EDISUD **1980**

**ANNEXES**

## CODE TRE

```

1000 REM *****
1001 REM *
1003 REM * CODE DE TEMPERATURE RESULTANTE D'ENVIRONNEMENT *
1004 REM *           87.02.06 *
1005 REM *****
1008 DEFDBL X,Y,S,B,V,R,Z,D,A
1010 REM ** PROGRAMA DE TEMPERATURA RESULTANTE DE AMBIENTE ** 87.02.06
1020 PROGRAMAS="TRE1":KEY 3,"LOAD"+CHR$(34)+"c:";KEY 4,"FILES"+CHR$(34)+"c:"+CHR
$(13):KEY 6,"SAVE"+CHR$(34)+"c:"+PROGRAMAS
1025 DIM G5(100),V5(100),V15(100),IRD(100),TV(100),VE(100),TRE(100),EPS(100),TRT
A(100),REND(100),TRTR(100),TRTAST(100)
1030 EV=.88
1040 AV=.88
1050 INPUT "Coef. Extincao (0.11 cm-1) = ";K
1060 RM=.95
1070 RV=.04
1080 INPUT "Espessura do vidro (0.045 cm) = ";L
1090 CT=EXP(-K*L)
1100 CV=1.2
1101 INPUT "Quantos pontos ";NP
1102 FOR I=1 TO NP
1105 PRINT "PONTO No ";I
1106 PRINT "====="
1110 REM INPUT "Fluxo Solar = ";G5(I)
1115 G5(I)=1011
1120 INPUT "Temp. Ambiente= ";V5(I)
1130 PRINT:INPUT "TRE=1 : IV=2 : Tceu=3 : Tamb=4";DADO :PRINT: ON DADO GOTO 1140
,1150,1160,1170
1140 INPUT "TRE = ";V15(I):GOTO 1220
1150 INPUT "I. Vermelho= ";IRD(I):TV(I)=(IRD(I)/5.67E-08)^.25-273:GOTO 1200
1160 INPUT "Temp. Ceu = ";TV(I):IRD(I)=5.67E-08*(TV(I)+273)^4:GOTO 1200
1170 INPUT "EXAUSTOR on=1 off=0 ";VENTIL:PRINT
1180 IF VENTIL=1 THEN IRD(I)=5.67E-08*(V5(I)+273)^4+115
1190 IF VENTIL=0 THEN IRD(I)=5.67E-08*(V5(I)+273)^4+165
1195 TV(I)=(IRD(I)/5.67E-08)^.25-273
1200 IF V5(I)>=TV(I) THEN V15(I)=TV(I)
1205 IF V5(I)>=TV(I) THEN GOTO 1240
1210 IF V5(I)<TV(I) THEN V15(I)=V5(I)+5:GOTO 1240
1220 INPUT "Unidades de TRE (OHM=O ou GRAU=G)";U$
1230 IF U$="O" OR U$="o" THEN V15(I)=(V15(I)-234.8)/.871
1240 INPUT "Velocidade do Vento=";VE(I)
1245 DT=1
1250 T1=V5(I)+273
1260 T=V15(I)+273
1270 A1=CT*(1-RV)*(1-RM)/(1-CT*CT*RV*RM)
1280 R1=RM*(1-RV)^2*CT*CT/(1-RM*RV*CT*CT)+RV
1290 A2=1-R1-A1
1300 IF T>T1 THEN 1330
1310 HV=1.25*(T1-T)^.25+3*VE(I)
1320 GOTO 1340
1330 HV=2.25*(T-T1)^.25+3*VE(I)
1340 W=G5(I)*(A2/2+A1)
1350 TP=T-(L*.01/CV)*W
1360 ID=(EV*5.67E-08*TP^4-A2/2*G5(I)-HV*(T1-TP)-W)/AV:IF DADO=1 THEN IRD(I)=ID
1370 PRINT INT(IRD(I)*100+.5)/100,INT(ID*100+.5)/100,INT(V15(I)*100+.5)/100:IF I
RD(I)=ID THEN GOTO 1410
1372 CRIT=ABS(IRD(I)-ID)/IRD(I):IF CRIT<=.0005 THEN GOTO 1410
1375 IF CRIT<=.005 AND CRIT>.0005 THEN DT=.01
1380 IF CRIT<=.05 AND CRIT>.005 THEN DT=.1
1390 IF IRD(I)>ID THEN V15(I)=V15(I)+DT
1395 IF IRD(I)>ID THEN GOTO 1260
1400 IF IRD(I)<ID THEN V15(I)=V15(I)-DT:GOTO 1260
1410 LA=T
1420 IF DADO<>1 THEN ID=IRD(I)
1430 TV(I)=(ID/5.67E-08)^.25-273
1440 REM ## CORRECCAO DE TRE ##

```

```

1450 TP=T1+20
1460 IN=10
1470 TP=TP-IN
1480 RE=EV*5.67E-08*TP^4+HV*TP-(HV*T1+AV*ID)
1490 IF RE>0 THEN GOTO 1470
1500 IF RE=0 THEN GOTO 1550
1510 TP=TP+IN
1520 IN=IN/10
1530 IF IN<.1 THEN GOTO 1550
1540 GOTO 1470
1550 T=TP
1575 IRD(I)=ID:V15(I)=LA-273:TRE(I)=T-273
1580 BEEP:BEEP:BEEP:PRINT
1590 PRINT TAB(15)"Fluxo Solar" = ";G5(I)
1600 PRINT TAB(15)"Temperatura Ambiente" = ";V5(I)
1610 PRINT TAB(15)"Velocidade do Vento" = ";VE(I)
1620 PRINT
1630 PRINT TAB(15)"Infra-Vermelho descendente" = ";INT(IRD(I)*100+.5)/100;" Wm-2"
1640 PRINT TAB(15)"Temperatura do Ceu" = ";INT(TV(I)*100+.5)/100;" grau"
1650 PRINT TAB(15)"Temp. Resultante Ambiente" = ";INT(V15(I)*100+.5)/100;" grau"
1660 PRINT TAB(15)"TRE corrigida" = ";INT(TRE(I)*100+.5)/100;" grau"
1665 EPS(I)=INT(IRD(I)/(5.67E-08*T1^4)*100+.5)/100
1670 PRINT TAB(15)"Emissividade do Ceu" = ";EPS(I)
1680 IF ((T>=V5(I)+273)*(T<=TV(I)+273))=1 THEN GOTO 1770
1690 IF ((T<=V5(I)+273)*(T>=TV(I)+273))=1 THEN GOTO 1770
1700 PRINT
1710 PRINT TAB(20)"*****"
1720 PRINT TAB(20)" RESULTADO FALSO"
1730 PRINT TAB(20)" TRE nao esta entre"
1740 PRINT TAB(20)" a T. amb e T. ceu"
1750 PRINT TAB(20)"*****"
1760 GOTO 1820
1770 PRINT
1780 PRINT TAB(20)"*****"
1790 PRINT TAB(20)" RESULTADO COERENTE"
1800 PRINT TAB(20)"*****"
1815 NEXT I
1816 INPUT "ENTER 'R' para recomencar";A$:CLS:IF A$="R" OR A$="r" THEN GOTO 1101
1820 REM * Impressao dos resultados *
1830 FOR I=1 TO NP
1840 PRINT I;:INPUT" T reduzida (em Ta)=";TRTA(I)
1850 PRINT I;:INPUT" Rendimento =";REND(I)
1860 NEXT I
1870 PRINT
1890 PRINT TAB(3)"I" TAB(8)"Ta" TAB(14)"Tc" TAB(20)"I.Verm" TAB(28)"Trec" TAB
B(34)"Epsc" TAB(40)"Vvento" TAB(48)"Tredta" TAB(56)"Tredtr" TAB(65)"Rend"
1900 PRINT "-----"
--"
1910 FOR I=1 TO NP
1920 TRTR(I)=(TRTA(I)*G5(I)+V5(I)-TRE(I))/G5(I)
1930 PRINT TAB(2) I;TAB(6)V5(I);TAB(12) INT(TV(I)*10+.5)/10;TAB(19) INT(IRD(I)*1
0+.5)/10 ;TAB(27) INT(TRE(I)*10+.5)/10;TAB(33) EPS(I);TAB(40) VE(I) TAB(48) INT(
TRTA(I)*10000+.5)/10000;TAB(55) INT(TRTR(I)*10000+.5)/10000;TAB(65) REND(I)
1940 NEXT I
1950 INPUT "IMPR=1 : RECOMECO=2 : SAIR=3 ";IMPR:ON IMPR GOTO 2000,1101,5340
2000 REM * IMPRESSAO *
2001 PRINT:INPUT "TITULO da CURVA ";COL$
2002 LPRINT TAB(10);COL$:LPRINT:LPRINT
2003 LPRINT TAB(10);"INFLUENCIA da RADIACAO INFRA-VERMELHA":LPRINT
2004 LPRINT TAB(10);" TEMPERATURA RESULTANTE de AMBIENTE":LPRINT:LPRINT
2005 LPRINT TAB(3)"I" TAB(8)"Ta" TAB(14)"Tc" TAB(20)"I.Verm" TAB(28)"Trec" T
AB(34)"Epsc" TAB(40)"Vvento" TAB(48)"Tredta" TAB(56)"Tredtr" TAB(65)"Rend"
2010 LPRINT "-----"
--"
2020 FOR I=1 TO NP
2030 LPRINT TAB(2) I;TAB(6)V5(I);TAB(12) INT(TV(I)*10+.5)/10;TAB(19) INT(IRD(I)*

```

```

10+.5)/10 ;TAB(27) INT(TRE(I)*10+.5)/10;TAB(33) EPS(I);TAB(40) VE(I) TAB(48) INT
(TRTA(I)*10000+.5)/10000;TAB(55) INT(TRTR(I)*10000+.5)/10000;TAB(65) REND(I)
2040 NEXT I
5000 REM ** PROGRMA DE REGRESSAO **
5030 CLS
5040 REM SUB-ROTINA DE REGRESSAO
5050 LOCATE 10,15,1:PRINT "PROGRAMA de REGRESSAO POLINOMIAL"
5070 X$="Tred"
5080 Y$="Rend"
5100 REM # Entrada de dados #
5110 DIM X(100),Y(100)
5120 FOR I=1 TO NP
5140 X(I)=TRTR(I):Y(I)=REND(I)
5150 NEXT I
5160 INPUT " RETURN para continuar ";Q$
5170 CLS
5180 LOCATE 14,32,1:PRINT " MENU "
5190 PRINT
5200 PRINT " 0 = IMPRESSAO DOS PONTOS"
5210 PRINT " 1 = REGRESSAO LINEAR "
5220 PRINT " 2 = REGRESSAO PARABOLICA "
5230 PRINT " 3 = RECOMECAR "
5240 PRINT " 4 = FIM "
5250 PRINT
5260 PRINT " QUAL A OPCAO ? "
5270 INPUT T
5280 CLS
5290 IF T=0 THEN GOSUB 6370
5310 IF T=1 THEN GOSUB 5350
5320 IF T=2 THEN GOSUB 5860
5330 IF T=3 THEN GOTO 1101
5335 IF T=4 THEN GOTO 5340
5339 GOTO 5180
5340 END
5350 REM ## REGRESSAO LINEAR ##
5360 REM ## AJUSTE DE PONTOS A UMA RECTA DO TIPO Y=A + B * X ##
5370 REM ## X= VARIAVEL INDEPENDENTE ##
5380 REM ## Y= VARIAVEL DEPENDENTE ##
5390 REM ## N= NUMERO DE PONTOS ##
5400 REM ## A= ORDENADA NA ORIGEM ##
5410 REM ## B= DECLIVE DA RECTA ##
5420 REM ## S7= SIGMA A : DESVIO PADRAO DE A ##
5430 REM ## S8= SIGMA B : DESVIO PADRAO DE B ##
5440 REM ## R= COEFICIENTE DE CORRELACAO ##
5450 S2=0:S3=0:S4=0:S5=0:S6=0:S7=0:S8=0
5460 FOR I=1 TO NP
5470 S2=S2+X(I)
5480 S3=S3+Y(I)
5490 S4=S4+X(I)*X(I)
5500 S5=S5+X(I)*Y(I)
5510 S6=S6+Y(I)*Y(I)
5520 NEXT I
5530 REM ## CALCULO A,B,SIGMA A,SIGMA B e R ##
5540 D=NP*S4-S2*S2
5550 A=(S3*S4-S2*S5)/D
5560 B=(NP*S5-S2*S3)/D
5570 V=(S6+NP*A*A+S4*B*B-2*(A*S3+B*S5-A*B*S2))/(NP-2)
5580 S7=SQR(ABS(V*S4/D))
5590 S8=SQR(ABS(V*NP/D))
5600 R=(NP*S5-S2*S3)/SQR(D*(NP*S6-S3*S3))
5610 CLS
5620 LOCATE 2,20,1:PRINT "REGRESSAO LINEAR :"
5630 LOCATE 4,7,1:PRINT " COEFICIENTES DA RECTA Y=a+b*X "
5640 PRINT
5650 PRINT USING "a=####.####";A
5660 PRINT USING "b=####.####";B

```

```

5670 PRINT USING "sigma A=##.#### ";S7
5680 PRINT USING "sigma B=##.#### ";S8
5690 PRINT USING "r=##.#### ";R
5700 PRINT USING "sigma=#.####";SQR(V)
5710 PRINT USING "\ \ =(####.#### +/- ##.####) + (####.#### +/- ##.####) * \
\";Y$;A;S7;B;S8;X$
5720 LOCATE 15,10:PRINT "Impressao dos resultados : 1":INPUT IMPR:CLS
5730 IF IMPR<>1 THEN GOTO 5180
5740 LPRINT TAB(10)"DATA :";DATE$:LPRINT:LPRINT TAB(30) "REGRESSAO LINEAR :"
5750 LPRINT:LPRINT TAB(10)" COEFICIENTES DA RECTA Y=a+b*X "
5760 LPRINT
5770 LPRINT USING "          a=####.####";A
5780 LPRINT USING "          b=####.####";B
5790 LPRINT USING "          sigma A=##.#### ";S7
5800 LPRINT USING "          sigma B=##.#### ";S8
5810 LPRINT USING "          r=##.#### ";R
5820 LPRINT USING "          sigma=#.####";SQR(V)
5830 LPRINT:LPRINT USING "          \ \ =(####.#### +/- ##.####) + (####.####
+/- ##.####) * \ \";Y$;A;S7;B;S8;X$
5831 REM * Condicoes Standard *
5835 GOSUB 7000
5840 LPRINT:LPRINT
5850 RETURN
5860 REM # REGRESSAO PARABOLICA #
5870 Z1=0:Z2=0:Z3=0:Z4=0:Z5=0:Z6=0:Z7=0
5880 FOR I=1 TO NP
5890 Z1=Z1+Y(I)
5900 Z2=Z2+X(I)
5910 Z3=Z3+X(I)*X(I)
5920 Z4=Z4+X(I)*Y(I)
5930 Z5=Z5+Y(I)*X(I)*X(I)
5940 Z6=Z6+X(I)*X(I)*X(I)
5950 Z7=Z7+X(I)*X(I)*X(I)*X(I)
5960 NEXT I
5970 REM # CALCULO DE a1,a2,a3 #
5980 D0=(NP*(Z3*Z7-Z6*Z6))-(Z2*(Z2*Z7-Z3*Z6))+(Z3*(Z2*Z6-Z3*Z3))
5990 A1=((Z1*Z3*Z7)+(Z3*Z4*Z6)+(Z2*Z5*Z6)-(Z5*Z3*Z3)-(Z1*Z6*Z6)-(Z2*Z4*Z7))/D0
6000 A2=((NP*Z4*Z7)+(Z2*Z3*Z5)+(Z1*Z3*Z6)-(Z4*Z3*Z3)-(NP*Z5*Z6)-(Z1*Z2*Z7))/D0
6010 A3=(NP*Z3*Z5+Z1*Z2*Z6+Z2*Z3*Z4-Z1*Z3*Z3-NP*Z4*Z6-Z5*Z2*Z2)/D0
6020 REM # CALCULO DO COEFICIENTE DE CORRELACAO #
6030 Y9=Z1/NP
6040 R1=0:R2=0
6050 FOR I=1 TO NP
6060 Y8=A1+A2*X(I)+A3*X(I)*X(I)
6070 R1=R1+(Y8-Y9)*(Y8-Y9)
6080 R2=R2+(Y(I)-Y9)*(Y(I)-Y9)
6090 NEXT I
6100 R3=SQR(ABS(R1/R2))
6110 PRINT
6120 LOCATE 2,20,1:PRINT "REGRESSAO PARABOLICA :"
6130 PRINT
6140 LOCATE 4,7,1:PRINT "COEFICIENTES DA CURVA"
6150 PRINT
6160 PRINT USING "a1=####.####";A1
6170 PRINT USING "a2=####.####";A2
6180 PRINT USING "a3=####.####";A3
6190 PRINT USING "r=##.####";R3
6200 PRINT
6210 PRINT USING "\ \ =####.#### + ####.#### * \ \ + ####.#### * \ \ ^2";Y$;
A1;A2;X$;A3;X$
6220 LOCATE 15,10:PRINT "Impressao : 1":INPUT IMPR:CLS
6230 IF IMPR<>1 THEN GOTO 5180
6240 LPRINT
6250 LPRINT TAB(30) "REGRESSAO PARABOLICA :"
6260 LPRINT
6270 LPRINT TAB(10)"COEFICIENTES DA CURVA"

```

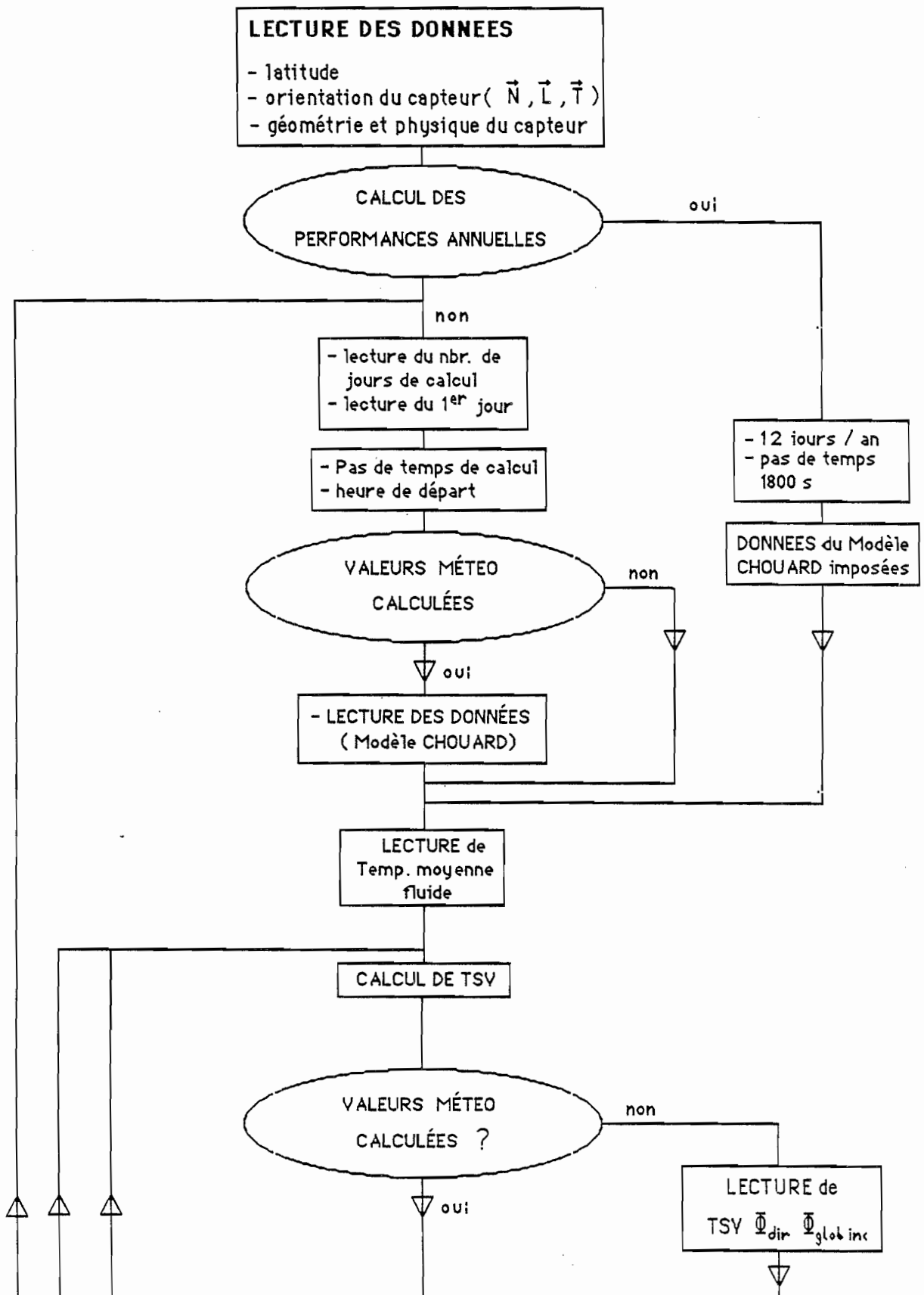
```

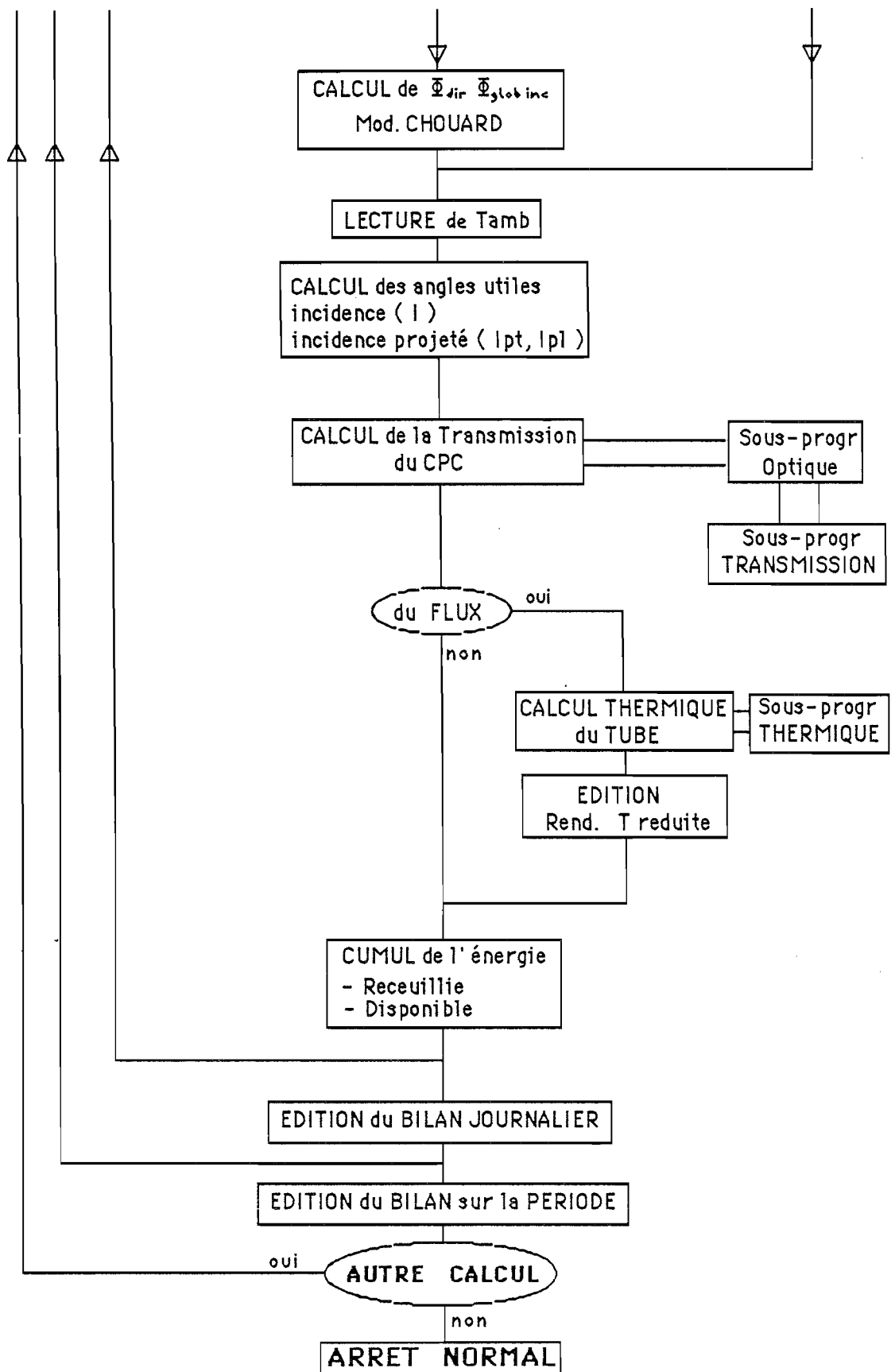
6280 LPRINT:LPRINT USING "          a1=####.####";A1
6290 LPRINT USING "          a2=####.####";A2
6300 LPRINT USING "          a3=####.####";A3
6310 LPRINT USING "          r=##.####";R3
6320 LPRINT
6330 LPRINT USING "          \ \ = ####.#### + (####.####) * \ \ +(####.####) *
\ \ ^2";Y$;A1;A2;X$;A3;X$
6335 GOSUB 7500
6340 LPRINT:LPRINT
6350 RETURN
6360 END
6370 REM ** Impressao dos Pontos ***
6380 LPRINT TAB(10) "DATA : ";DATE$:LPRINT
6390 LPRINT TAB(10) "PONTOS EXPERIMENTAIS":LPRINT:LPRINT TAB(10)"TITULO: ";COL
$:LPRINT
6400 FOR I=1 TO NP
6410 LPRINT TAB(12) I TAB(25) X$ ;" = ";INT(10000*X(I)+.5)/10000 TAB(40) Y$;" =
";Y(I)
6420 NEXT I
6430 LPRINT:LPRINT
6440 RETURN
7000 REM * sub-rotina de Regressao Linear em Ambiente Standard *
7010 TRTAST(1)=.3:TRTAST(2)=.7
7020 ETA1=A+B*.306:ETA2=A+B*.706
7030 B1=(ETA1-ETA2)/(TRTAST(1)-TRTAST(2))
7040 A1=ETA1-B1*TRTAST(1)
7050 PRINT:PRINT
7060 PRINT "## MODELO LINEAR em condicoes STANDARD ##"
7070 PRINT:PRINT
7080 PRINT USING "\ \ = #.#### ####.#### * \ \ ";Y$;A1;B1;X$
7090 LOCATE 15,10:PRINT "Impressao dos resultados : 1":INPUT IMPR:CLS
7100 IF IMPR<>1 THEN RETURN
7110 LPRINT:LPRINT TAB(10) "## MODELO LINEAR em condicoes STANDARD ##"
7120 LPRINT:LPRINT
7130 LPRINT TAB(10);:LPRINT USING "\ \ = #.#### ####.#### * \ \ ";Y$;A1;B1;
X$
7140 RETURN
7500 REM * sub-rotina de Regressao Parabolica em Ambiente Standard *
7510 TRTAST(1)=.3:TRTAST(2)=.5:TRTAST(3)=.7
7520 ETA1=A1+A2*.306+A3*.306*.306:ETA2=A1+A2*.506+A3*.506*.506:ETA3=A1+A2*.706+A
3*.706*.706
7530 DETA=TRTAST(2)*TRTAST(3)^2+TRTAST(1)*TRTAST(2)^2+TRTAST(1)^2*TRTAST(3)-TRTA
ST(1)*TRTAST(3)^2-TRTAST(1)^2*TRTAST(2)-TRTAST(2)^2*TRTAST(3)
7540 DETA1=ETA1*TRTAST(2)*TRTAST(3)^2+ETA3*TRTAST(1)*TRTAST(2)^2+ETA2*TRTAST(1)^
2*TRTAST(3)-ETA2*TRTAST(1)*TRTAST(3)^2-ETA3*TRTAST(1)^2*TRTAST(2)-ETA1*TRTAST(2)
^2*TRTAST(3)
7550 DETA2=ETA2*TRTAST(3)^2+ETA1*TRTAST(2)^2+TRTAST(1)^2*ETA3-ETA1*TRTAST(3)^2-T
RTAST(1)^2*ETA2-TRTAST(2)^2*ETA3
7560 DETA3=TRTAST(2)*ETA3+TRTAST(1)*ETA2+ETA1*TRTAST(3)-TRTAST(1)*ETA3-ETA1*TRTA
ST(2)-ETA2*TRTAST(3)
7570 A11=DETA1/DETA:A22=DETA2/DETA:A33=DETA3/DETA
7580 PRINT "## MODELO PARABOLICO em condicoes STANDARD ##"
7590 PRINT:PRINT
7600 PRINT USING "\ \ =#.#### +( ###.####) * \ \ +( ####.#### )* \ \ ^2";Y$;
A11;A22;X$;A33;X$
7620 PRINT "Impressao : 1":INPUT IMPR:CLS
7630 IF IMPR<>1 THEN RETURN
7640 LPRINT
7650 LPRINT TAB(10) "## MODELO PARABOLICO em condicoes STANDARD ##"
7660 LPRINT:LPRINT
7670 LPRINT TAB(10);:LPRINT USING "\ \ =#.#### +( ###.####) * \ \ +( ####.###
#)* \ \ ^2";Y$;A11;A22;X$;A33;X$
7680 RETURN

```

## CODE CPC

## ORGANIGRAMME DE CALCUL DES PERFORMANCES D' UN CAPTEUR





```

0: "-----":
1: "PROGRAMME DE CALCUL DES PERFORMANCES D'UN CAPTEUR QUELCONQUE":
2: "":
3: "":
4: "":
5: "    programme CPC :calcule les performances d un cpc":
6: "":
7: "":
8: "-----":
9: ent "EDITION DES RESULTATS SUR IMPRIMANTE?",r18
10: if r18=1;701>Q
11: if r18=0;16>Q
12: prtsc Q
13: prt "PROGRAMME DE CALCUL DES PERFORMANCES D UN CPC"
14: prt "-----"
15: dim I[12],C[2,12],K[2,12],G[20,2]
16: "    G:tableau des transmissions optiques    20 pts max    ":
17: 31>I[1];28>I[2];31>I[3];30>I[4];31>I[5];30>I[6];31>I[7]
18: 31>I[8];30>I[9];31>I[10];30>I[11];31>I[12]
19: "    JOURNEES de moyenne declinaison":
20: 17>K[2,1];15>K[2,2];16>K[2,3];15>K[2,4];15>K[2,5];11>K[2,6];17>K[2,7]
21: 16>K[2,8];16>K[2,9];16>K[2,10];15>K[2,11];11>K[2,12]
22: "-----":
23: "DONNEES DE TEMPERATURE DE CARPENTRAS":
24: "-----":
25: 8.8>C[1,1];10.6>C[1,2];14.9>C[1,3];18>C[1,4];21.9>C[1,5];26>C[1,6]
26: 29>C[1,7];28.4>C[1,8];24.6>C[1,9];18.8>C[1,10];13.3>C[1,11];9.3>C[1,12]
27: 1>C[2,1];1.5>C[2,2];4.5>C[2,3];7.1>C[2,4];10.6>C[2,5];14.1>C[2,6]
28: 16.5>C[2,7];16>C[2,8];13.5>C[2,9];9.2>C[2,10];4.9>C[2,11];2>C[2,12]
29: "-----":
30: fmt /,20x,"PROGRAMME CAPT VERSION DU 14/11/1984",/,20x,30"-";wrt Q
31: dim N[3],L[3],S[10],A[35],T[3],H[3],D[3]
32: dim W[3],Z[3],E[6],B[19]
33: enp "LATITUDE DU LIEU",S[7]
34: 0>B[17]
35: dsp "DONNEES D'ORIENTATION DU CAPTEUR";wait 1000
36: enp "AZIMUTH N",r1,"HAUTEUR/HORIZONTALE",r2
37: cos(r1)*cos(r2)>N[1];cos(r2)*sin(r1)>N[2];sin(r2)>N[3]
38: dsp "VECTEUR L(sens longitudinal);wait 1000
39:
40: fmt /,10x,"ORIENTATION DU CAPTEUR",/,10x,22"-";wrt Q
41: fmt 15x,"COMPOSANTES DE N",/,13x,f6.2,/,13x,f6.2,/,13x,f6.2
42: wrt Q,N[1],N[2],N[3]
43: fmt 15x,"COMPOSANTES DE L",/,13x,f6.2,/,13x,f6.2,/,13x,f6.2
44: enp "AZIMUTH(L)",r3,"H/HORIZONTALE(L)",r4
45: cos(r4)*cos(r3)>L[1];cos(r4)*sin(r3)>L[2];sin(r4)>L[3]
46: wrt Q,L[1],L[2],L[3]
47: "CALCUL DES COORDONNEES DU VECTEUR T(TRANSVERSAL":
48: N[2]*L[3]-N[3]*L[2]>T[1];N[3]*L[1]-N[1]*L[3]>T[2]
49: N[1]*L[2]-N[2]*L[1]>T[3]
50:
51: if B[17]=1;gto "0"
52: "-----":
53: "    DONNEES DU CAPTEUR":
54: "-----":
55: "    TYPE DE CAPTEUR    cas du cpc":
56: "-----":
57: enp "DIAM DES TUBES ABSORBEURS",A[2],"coeff absorption absorbeur",A[9]
58: enp "TRANS de l enveloppe",A[10]
59: enp "LONGUEUR DES TUBES",A[8],"nbre de tubes",A[7]
*28912

```

```

60: enp "largeur d une auge",A[5],"LONGUEUR d une auge",A[3]
61: A[7]*A[5]*A[3]>A[1]
62: "      donnees des auges":
63: "-----":
64: enp "R0(miroirs)",A[23],"distance  axe absorbeur ouverture",A[4]
65: enp "ANGLE D ACCEPTANCE",A[28],"couverture ou pas",A[24]
66: if A[24]=0;gto "ms1"
67: enp "EPAISSEUR couverture(mm)",A[25],"ind couver=",A[26]
68: enp "coeff d extinction(cm-1)",A[27]
69: "ms1":
70: fmt 20x,"DONNEES THERMIQUES",/,20x,18"-",/;wrt Q
71: "      donnees thermiques du capteur":
72: "-----":
73: enp "DEXT(tube ext)",A[12],"EPAIS(tube int)",A[13],"EPAI(tube ext)",A[14]
74: enp "EMISS(t int)",A[15],"EMISS(tube ext)",A[16]
75: enp "COND THER(tube int)",A[17],"COND THER(tube ext)",A[18]
76: enp "Hfluide-Tint",A[19],"Htext-tamb",A[20]
77: .72>A[21];ent "K pertes(liaisons)",A[22]
78: dim Y[4],V[4]
79: "ms2":ent "VOULEZ VOUS LES IMP INTER?",V
80: "
81: "
82: "      IMPRESSION DES DONNEES DU CAPTEUR
83: "
84: fmt 20x,"CAPTEUR  cpc A TUBE SOUS VIDE",/,20x,30"-";wrt Q
85: fmt 3x,"NBRE TUBES=",f6.0,/,3x,"L TUBE=",f6.2;wrt Q,A[7],A[8]
86: fmt 3x,"Sar=",f8.2,/,3x,"D tube=",f8.3,/,3x,"E  =",f8.3,/,3x,"H  =",f8.3
87: wrt Q,A[1],A[2],A[3],A[4]
88: fmt 3x,"ACCEPTANCE=",f8.2;wrt Q,A[28]
89: fmt 3x,"TRANS ENV=",f8.2,/,3x,"ALFA=",f8.2;wrt Q,A[10],A[9]
90: fmt 20x,"DONNEES THERMIQUES";wrt Q
91: fmt 5x,"EMISSIVITE (tube int)=",f6.2,/,5x,"EMISSIVITE(tube ext)=",f6.2
92: wrt Q,A[15],A[16]
93: fmt 5x,"H f-tube int=",f6.2,/,5x,"H text Tamb=",f6.2,/,5x,"K liais",f6.2
94: wrt Q,A[19],A[20],A[22]
95: "
96: "      conditions de calcul
97: "
98: fmt 5x,60"-";wrt Q
99: ent "calcul des perf annuelles?",A
100: if A=1;12>r6;1800>D[1];24>D[3];6>D[2];.93>S[9];.21>S[10];gto "CONT"
101: "D":
102: ent "NBRE DE JOURS DE CALCUL",r6
103: "DONNEES DU CALCUL":
104: dsp "DONNEES DU 1ER JOUR";wait 1000
105: ent "N0du mois",r7,"N0 du jour/mois",r8
106: ent "NBRE D'INT/JOUR",D[3]
107: ent "VALEURS METEO CALCULEES?",M
108: 3600>D[1]
109: if M=0;gto "CONT"
110: ent "PAS DE TEMPS DE CALCUL(sec)=",D[1],"H DE DEPART(TSV)=",D[2]
111: ent "COEFF A(mod CHOUARD",S[9],"COEFF B(mod CHOUARD",S[10]
112: fmt 5x,"DONNEES DU CAPTEUR",/,5x,18"-";wrt Q
113: "
114: "      reprise avec une temperature differante
115: "
116: "CONT":
117: r8>H[2];ent "TMOY(fluide)",A[6]
118: fmt /,5x,"Tmoy(fluide)=",f6.2;wrt Q,A[6]
119: 0>B[10];0>B[11]
*12572

```

```

120: "
121:
122: " -----
123:
124:
125: for I=1 to r6
126: if A#1;gto "m11"
127: gsb "PERFANNUELLE"
128: gto "m12"
129: "m11":r7>H[1];H[2]+I-1>H[2]
130: if H[2]>I[H[1]];1>H[2];r7+1>H[1]
131: "m12":fmt /,4x,"MOIS n0",f4.0," JOUR n0",f4.0;wrt Q,H[1],H[2]
132: fmt 4x,30"-";wrt Q
133: fmt 5x,"T(TSV)",3x,"INC",5x," E ",7x,"F",7x,"DIR",5x,"DIF",z;wrt Q
134: fmt 5x,"GLOB",3x,"TAMB";wrt Q
135: fmt 2x,78"-";wrt Q
136: 0>B[6];0>B[7]
137: for P=1 to D[3]
138: D[2]+(2P-1)/2*D[1]/3600>H[3]
139: if M=0;ent "HEURE TSV",H[3],"F DIR",E[1],"GLOBI",E[2],"TAMB=",E[4]
140: gsb "ENER"
141: " CALCUL DES ANGLES UTILES":
142: c11 'PS'(S[1],S[2],S[3],N[1],N[2],N[3],r11)
143: acs(r11)>S[4]
144: " angle E(PROJECTION DE S/(N,T),N) ":
145: c11 'PS'(S[1],S[2],S[3],L[1],L[2],L[3],r11)
146: S[1]-r11*L[1]>W[1];S[2]-r11*L[2]>W[2];S[3]-r11*L[3]>W[3]
147: c11 'PS'(W[1],W[2],W[3],N[1],N[2],N[3],r11)
148: acs(r11)>S[5]
149: " ANGLE F proj de S(n,1),n":
150: c11 'PS'(S[1],S[2],S[3],T[1],T[2],T[3],r11)
151: S[1]-r11*T[1]>Z[1];S[2]-r11*T[2]>Z[2];S[3]-r11*T[3]>Z[3]
152: c11 'PS'(Z[1],Z[2],Z[3],N[1],N[2],N[3],r11)
153: acs(r11)>S[6]
154: if H[3]<12;-S[6]>S[6]
155: atn(S[3]/S[1])>B[18];atn(S[2]/S[1])>B[19]
156: fmt 3x,"B[18]=",f8.2,3x,"B[19]=",f8.2,;/wrt Q,B[18],B[19]
157: fmt 2x,f8.2,2x,f6.2,2x,f6.2,2x,f6.2,2x,f8.2,2x,f8.2,2x,f8.2,5x,f8.2
158: wrt Q,H[3],S[4],S[5],S[6],E[1],E[3],E[2],E[4]
159: gsb "OPTIQUE"
160: " CALCUL THERMIQUE DES CPC AVEC TUBES SOUS VIDE":
161: E[2]>B[1]
162: if E[2]=0;gto "ter"
163: gsb "THERMIQUE"
164: A[7]*(*A[2]*A[8])>S
165: "thr":fmt 20x,"REND=",f8.3,"TRED=",f8.3;wrt Q,r41,(A[6]-E[4])/E[2]
166: fmt 80"-",/;wrt Q
167: gto "ter"
168: gsb "TRANSM"
169: "c2":r18*T*E[1]*cos(S[4])*r17>r20
170: E[1]*A[1]*cos(S[4])>r21
171: r20*D[1]/3600+B[6]>B[6];r21*D[1]/3600+B[7]>B[7]
172: E[1]+E[3]>r25
173: if S[4]>=90;0>r27
174: if S[4]<90;E[1]/cos(S[4])>r27
175: fmt 3x,f6.2,3x,f6.2,3x,f6.2,3x,f6.2,3x,f6.2,3x,f6.2,3x,f6.2
176: wrt Q,H[3],S[4],S[5],S[6],r27,E[3],r25
177: "ter":
178: if r41<0;0>r41;fmt " le capteur ne travaille pas";wrt Q
179: A[1]*B[1]*r41*D[1]/3600+B[6]>B[6];A[1]*B[1]*D[1]/3600+B[7]>B[7]
*15660

```

```

180: "ter1":next P
181: fmt /,5x,"ENER DIR JOURN UTILE=(wh)",f8.2," E DIR DISP(wh/m2)=",f8.2,/
182: wrt Q,B[6],B[7]/2.04
183: beep
184: beep
185: beep
186: ent "ENTER pour continuer",r200
187: B[6]+B[10]>B[10];B[7]+B[11]>B[11]
188: if A=1;B[6]*I[I]+B[10]>B[10];B[7]*I[I]+B[11]>B[11]
189: next I
190:
191: "-----":
192: fmt 3x,"ENER EXTR(kwh)=",f10.2,3x,"ENER INC(kwh)=",f10.2
193: wrt Q,B[10]/1000,B[11]/1000
194: fmt /,20x,40"*",/;wrt Q
195: ent "YA T IL UN AUTRE CALCUL",J
196: if J=0;gto 200
197: ent "voulez vous changer l orientation du capteur?",B[17]
198: if B[17]=0;gto "D"
199: gto 35
200: fmt 20x,20"--";wrt Q
201: fmt 20x,"ARRET NORMAL";wrt Q
202: end
203:
204:
205:
206: "-----":
207: "ENER":
208: "
209: "      modele chouard " :
210: 23.45*cos(30*H[1]+H[2]-202)>r10;1+.034*cos(30*(H[1]-1)+H[2])>r11
211: 15*(H[3]-12)>r12;cos(r10)*cos(r12)*sin(S[7])-cos(S[7])*sin(r10)>S[1]
212: cos(r10)*sin(r12)>S[2]
213: cos(S[7])*cos(r12)*cos(r10)+sin(S[7])*sin(r10)>S[3]
214: N[1]*S[1]+N[2]*S[2]+N[3]*S[3]>r16;acs(r16)>S[8]
215: if M=0;E[2]-E[1]*r16>E[3];ret
216: if S[3]<=0;0>E[1]>E[3];gto "t10"
217: if S[8]>=90;0>E[1];0>E[3];gto "t10"
218: 1353*r11*S[9]*exp(-S[10]/S[3])>E[1]
219: prt "E[1]=",E[1]
220: 1353*r11*S[3]*(.271-.2939*S[9]*exp(-S[10]/S[3]))>r18
221: r17/r16*S[3]>X
222: (1+cos(90-r2))/2*r18+.2*(1-cos(90-r2))/2*(X+r18)>E[3]
223: "t10":E[1]*r16+E[3]>E[2]
224: "-----":
225: "      modele de temperature " :
226: "-----":
227: .5*(C[1,H[1]]-C[2,H[1]])>r11;.5*(C[1,H[1]]+C[2,H[1]])>r12
228: r11*cos(15*(H[3]-14.5))+r12>E[4]
229: ret
230:
231:
232:
233: "THERMIQUE":
234: "-----":
235: "CALCUL THERMIQUE D UN CAPTEUR A TUBE SS VIDE":
236: 5.67e-8>S;273.15>K
237: 0>r66;0>r68
238: "1ere ITERATION":
239: A[6]+K>Y[1]>Y[2]
*4018

```

```

240: E[4]+K}Y[3]}Y[4]
241: "iter":0}r68
242: (Y[2]^2+Y[3]^2)*(Y[2]+Y[3])*S*(A[2]*A[8])r50
243: r50/(1/A[15]+1/A[16]-1)}r50;1/r50}r50
244: 2(A[18]*A[8]/ln(A[12]/(A[12]-2A[14])))r51;1/r51}r51
245: (S*(Y[4]+E[4])*(Y[4]^2+E[4]^2)/(1/A[21]+1/A[16]-1)+A[20])*A[12]A[8]}r52
246: 1/r52}r52
247: 2(A[17]A[8]/ln(A[21]/(A[21]-2A[13])))r53;1/r53}r53
248: 1/A[19]/{(A[21]-2A[13])/A[8]}r54
249: r50+r51+r52}r60;r53+r54}r61
250: (E[6]/A[7]+(A[6]+K)/r61+(E[4]+K)/r60)/(1/r61+1/r60)}V[2]
251: (V[2]-E[4]-K)/r60}r62;-r62*r50+V[2]}V[3];-r51*r62+V[3]}V[4]
252: .00001}r67
253: for J=2 to 4;(V[J]-Y[J])/(V[J]+Y[J])/r65}r65
254: if abs(r65)>=r67;1}r68
255: next J
256: if r68=1;r66+1}r66;for J=2 to 4;V[J]}Y[J];next J;gto "iter"
257: if M=100;gto "ther1"
258: fmt 23x,f6.2,3x,f6.2,3x,f6.2,3x,f6.2
259: wrt Q,Y[1]-K,Y[2]-K,Y[3]-K,Y[4]-K
260: fmt 43x,"F'=",f8.3;wrt Q,1/(1+r61/r60)
261: fmt 20x,"55"*",/;wrt Q
262: "ther1":E[6]/(1+r61/r60)+(A[7]/(r60+r61)+A[22])*(E[4]-A[6])}r65
263: r65/E[2]/A[1]}r41
264: ret
265:
266: "-----":
267: "PS":
268: p1*p4+p2*p5+p3*p6}p8
269: p1^2+p2^2+p3^2}p10;\p10}p11
270: p4^2+p5^2+p6^2}p12;\p12}p13
271: p8/p11/p13}p7
272: ret
273: "-----":
274:
275: "TRANSM":
276: fmt 20x,"55"*";wrt Q
277: if abs(S[5])>=A[28];0}T;ret
278: if A[28]#30;gto "TR1"
279: 0}G[1,1];.64}G[1,2];10}G[2,1];.65}G[2,2];20}G[3,1];.724}G[3,2]
280: 30}G[7,1];.455}G[7,2]
281: 25}G[4,1];.744}G[4,2];28}G[5,1];.738}G[5,2];29}G[6,1];.72}G[6,2]
282: for J=1 to 6
283: abs(S[5])-G[J,1]}r40;abs(S[5])-G[J+1,1]}r41
284: if r40*r41<=0;gto "ts1"
285: next J
286: "ts1":
287: (G[J+1,2]-G[J,2])/(G[J+1,1]-G[J,1])}r40
288: r40*(abs(S[5])-G[J,1])+G[J,2]}T
289: " VARIATION DE T EN FONCTION DU RO DES MIROIRS":
290: " ON SUPPOSE UNE VARIATION LINEAIRE " :
291: A[23]*T/.85}T
292: " calcul des effets longitudinaux":
293: "-----":
294: if abs(S[6])-30<0;c11 'inter'(S[6],-5e-4,1,B[16])
295: (abs(S[6])-30)*(abs(S[6])-45)}B[14]
296: if B[14]<0;c11 'inter'(S[6],-2.333e-3,1.055,B[16])
297: prt "B[16]=",B[16]
298: T*B[16]}T
299: ret
*12415

```

```

300: "TR1":
301: A[23]}T
302: fmt 5x,"TRANSMISSION (miroirs)=",f8.2;wrt Q,T
303: ret .
304: "-----";
305: "PERFANNUELLE":
306: I}H[1];K[2,I]}H[2]
307: prt H[1],H[2]
308: 100}M
309: ret
310:
311:
312:
313: "-----";
314: "OPTIQUE":
315: "  CALCUL  DE L ENERGIE ARRIVANT AU NIVEAU  D UN TUBE ABSORBEUR":
316: "-----";
317: "CALCUL DU DIRECT":
318: gsb "TRANSM"
319: "      calcul de la couverture":
320: if A[24]=0;1)r17;gto "o1"
321: if S[4]>=90;0)r17;gto "o1"
322: c11 'TRS'(S[4],A[26],A[25],A[27],r17)
323: "o1":
324: "  calcul des effets  de bout":
325: if S[6]=90;0)r18;gto "o2"
326: (A[3]-A[4]*tan(abs(S[6])))/A[3]}r18
327: "o2":T*r18*r17*A[9]}r20
328: fmt 25x,"r17=",f8.2,"r18=",f8.2,"T=",f8.2;wrt Q,r17,r18,T
329: r20*E[1]*A[1]*cos(S[4]}r20
330: "      CALCUL  DU DIFFUS":
331: .85)r17
332: 1)r16
333: if A[28]=30;.584/.85*A[23]}r16
334: sin(A[28])*E[3]*A[1]*r17*r16*A[9]}r18;prt "E[3]=",E[3]
335: r20+r18}E[6]
336: fmt 25x,"E DIR=(w)",f8.2,"E dif(w)",f8.2,3x,"E tot(w)",f8.2
337: wrt Q,r20,r18,E[6]
338: ret
339: "-----";
340: "TRS":
341: asn(sin(p1)/p2)}p10;p10-p1}p11;p10+p1}p12
342: .5*((sin(p11)/sin(p12))^2+(tan(p11)/tan(p12))^2)}p13
343: exp(-p3*p4/10/cos(p1)}p14;prt p3,p4,p1,p14
344: (1-p13)^2*p14/(1-(p13*p14)^2)}p5
345: prt p2,p10,p11,p12,p13,p4,p1,p14,p5
346: ret
347: "-----";
348: "inter":
349: p2*abs(p1)+p3}p4
350: ret
*21152

```