



**HAL**  
open science

# Contribution à l'aide à la conception par l'analyse morphologique. Application à des filières de conversion de l'énergie solaire

Patrick Labat

## ► To cite this version:

Patrick Labat. Contribution à l'aide à la conception par l'analyse morphologique. Application à des filières de conversion de l'énergie solaire. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1977. Français. NNT: . tel-00176773

**HAL Id: tel-00176773**

**<https://theses.hal.science/tel-00176773>**

Submitted on 4 Oct 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THESE

*présentée*

DEVANT L'UNIVERSITE PAUL SABATIER DE TOULOUSE (SCIENCES)

*en vue de l'obtention*

**du TITRE DE DOCTEUR DE 3<sup>e</sup> CYCLE**  
Spécialité : **Electronique, Electrotechnique, Automatique**  
Option : **Automatique**

*par*

Patrick LABAT

*Maître es Sciences*

---

## **CONTRIBUTION A L'AIDE A LA CONCEPTION PAR L'ANALYSE MORPHOLOGIQUE. APPLICATION A DES FILIERES DE CONVERSION DE L'ENERGIE SOLAIRE.**

Soutenu le 17 mai 1977 devant la Commission d'Examen :

MM. Y. SEVELY	Président
J.-L. ABATUT	} Examineurs
L. GERARDIN	
G. GIRALT	
G. VAUGE	

## AVANT-PROPOS

La recherche que voudrait concrétiser ce mémoire a été effectuée au sein du Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes dirigé par Monsieur le Professeur G. GRATELOUP et plus particulièrement dans l'opération Systèmes Energétiques - Energie Solaire dont le responsable scientifique est Monsieur J.L. ABATUT, Maître de Conférence à l'Université Paul Sabatier.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance au Directeur du L.A.A.S, Monsieur le Professeur G. GRATELOUP qui m'a permis de bénéficier de bonnes conditions de travail.

Je désire exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur le Professeur V. SEVELY qui a contribué pour une large part à ma formation d'automaticien. Je suis très sensible à l'intérêt qu'il porte à mon travail et à l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de thèse.

Je remercie bien vivement Monsieur J.L. ABATUT, Maître de Conférence à l'Université Paul Sabatier pour l'accueil qu'il m'a réservé dans l'opération SEES 1. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir largement conseillé tout au long de mon travail.

Que Monsieur G. GIRALT, Directeur de Recherche au C.N.R.S., soit ici remercié pour l'attention qu'il a toujours manifesté à mon travail. Son aide scientifique me fut précieuse tout au long de ma recherche.

A Monsieur L. GERARDIN, Directeur de Recherche à la Thomson C.S.F., j'exprime toute ma gratitude pour s'être intéressé à mon travail et pour sa participation à mon jury malgré ses nombreuses occupations.

Que Monsieur C. VAUGE, Attaché à la Direction du PIRDES-C.N.R.S. accepte mes remerciements pour avoir bien voulu examiner mon travail et participer à la commission d'examen.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Messieurs A. ACHAIBOU, P. CARRAUD et E. THIEBAUT de l'équipe SEES 1 dont l'aide et les remarques positives tant lors de mon étude que lors de la rédaction du manuscrit m'ont été d'un grand secours.

Je voudrais également remercier Messieurs M. GHALLAB et J. MONDOLONI, dont les connaissances informatiques en PL 1 me furent d'un apport considérable.

Je remercie également tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire en faisant une mention particulière à Madame S. HUGUET qui eut à me supporter durant tout le temps pendant lequel elle dactylographia ce mémoire et Messieurs R. ZITTEL, D. DAURAT et J. LORTAL du service imprimerie du L.A.A.S.

## INTRODUCTION

---

Tout d'abord, nous avons un ensemble de trois chapitres consacrés à l'énergie solaire et à ses applications photothermiques.

Un premier chapitre sera une introduction au rayonnement solaire puis au rayonnement thermique.

Le rayonnement solaire sera appréhendé de façon à nous permettre d'introduire le synoptique général des filières ; quant au rayonnement thermique il nous conduira jusqu'à l'explication de l'effet de serre, introduction immédiate au deuxième chapitre relatif au collecteur-plan. Celui-ci sera, ici, étudié d'une manière "classique" c'est à dire que nous essayerons d'en dégager les grandes propriétés aussi bien physiques, techniques, qu'économiques. Nous en viendrons ensuite, dans le chapitre III, à effectuer une approche des concentrateurs. En ce qui les concerne, nous nous contenterons d'en présenter les grandes lignes et d'en dégager les notions nécessaires à l'application traitée dans le chapitre V.

Toutes les considérations développées dans ces trois chapitres ne sont pratiquement que thermiques ou optiques. Aussi notre apport dans ces chapitres est-il limité dans l'ensemble à un travail de synthèse bien que l'opération SEES1 du LAAS puisse revendiquer, par exemple, certains points précis tel le synoptique présenté dans le chapitre I ou les notions relatives au concentrateurs à héliostats du chapitre III.

La seconde partie présente un aspect tout différent et entre dans le cadre de l'analyse de systèmes. La difficulté des problèmes de conception relatifs aux systèmes technologiques complexes est telle que diverses méthodologies d'aide à la conception ont été développées ; leurs applications se situent dans des domaines aussi éloignés que l'architecture et la propulsion de fusées qu'a étudiée Zwicky au moyen de l'Analyse Morphologique, méthode d'approche qu'il a lui-même développée. Ce type d'analyse exige, en premier lieu, que l'on décompose le système étudié en une série de sous-systèmes d'importance relative comparable de telle sorte que chaque solution

déjà connue se présente comme une combinaison particulière des réponses partielles aux différents sous-systèmes définis par l'analyse. La décomposition doit donc fournir un ensemble de classes, à chaque classe étant dévolu un rôle particulier dans le système global.

Pour chaque classe, il reste alors à trouver l'ensemble des éléments remplissant la fonction voulue. De ce fait, nous considérerons que le système peut être décrit "structurellement" en prenant un élément et un seul de chaque classe. Nous avons donc affaire à un problème de combinatoire qui gagnera en complexité dès que nous envisagerons le fait qu'il puisse exister des incompatibilités entre éléments de classes distinctes. Le problème de combinatoire ainsi posé, déjà traité de nombreuses fois, n'a pas semblé présenter de difficultés majeures. Par contre, nous nous sommes davantage intéressés aux incompatibilités et principalement à leur origine. Ceci nous a amené à étudier comment nous pourrions associer des caractéristiques de valuation aux éléments de façon à pouvoir influencer sur l'ensemble des incompatibilités associé au système. Nous avons donc repris les grandes lignes de l'analyse morphologique de Zwicky en essayant d'associer à chaque élément un ensemble d'arguments dont l'effet sera d'introduire à la fois des relations de compatibilité ou d'incompatibilité et des critères de sélection des solutions.

Une solution au problème de conception d'un système complexe va donc se présenter comme un ensemble d'éléments qui vérifient les relations de compatibilité structurelle et des critères prédicatifs propres aux divers paramètres de ces éléments.

Une telle solution, si elle existe, est rarement unique ; l'aide à la conception se ramènera donc à la génération automatique de l'ensemble complet ou partiel des solutions ordonnées suivant certains critères pour permettre au concepteur de faire un choix exhaustif dominant l'aspect combinatoire.

Comme cela a été dit plus haut, la méthode proposée est appliquée à la prospective dans le domaine de l'énergie solaire.

PREMIERE PARTIE

---

LES FILIÈRES PHOTOTHERMIQUES

DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

-:-





# CHAPITRE I

RAYONNEMENT SOLAIRE ET RAYONNEMENT THERMIQUE

## INTRODUCTION

De nouveaux facteurs d'appréciation comme celui de non-pollution des sources énergétiques et la garantie d'un approvisionnement durable ayant pris une grande importance, il s'est fait jour la nécessité d'instaurer une stratégie énergétique. [1]

Devant l'intérêt présenté par les énergies de substitution, des programmes interdisciplinaires se sont développés. En France, à l'instigation du PIRDES\*, la mise en oeuvre d'une large politique englobant tous les secteurs de l'énergie solaire est en cours depuis 1975.

Bien que la terre ne capte qu'un demi-milliardième de l'énergie envoyée par le soleil, cette quantité reçue représente une puissance de 180.000 milliards de kW ce qui, pour une surface terrestre voisine de  $5 \cdot 10^8 \text{ km}^2$ , donne environ  $360 \text{ W/m}^2$ . Cette puissance représente environ  $10^4$  fois la puissance consommée dans le monde. La totalité des réserves terrestres en combustibles fossiles et nucléaires fissiles ne représentant que le cinquième de ce que le soleil nous envoie par an. [2]

L'énergie solaire est une source renouvelable à l'échelle humaine mais c'est une énergie qui nous parvient sous forme très dispersée.

Parmi les divers types de conversion de l'énergie solaire qui sont actuellement envisagés, la conversion héliothermique tient une place importante. On envisage la captation avec ou sans concentration.

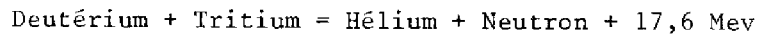
Le but que nous nous sommes assignés dans les chapitres 1, 2 et 3 sera tout d'abord de mettre en place et décrire les principes généraux de ces capteurs. Nous y associerons de plus quelques considérations technico-économiques.

\* PIRDES : Programme Interdisciplinaire de Recherche et Développement en Energie Solaire.

## 1.1. LE RAYONNEMENT SOLAIRE

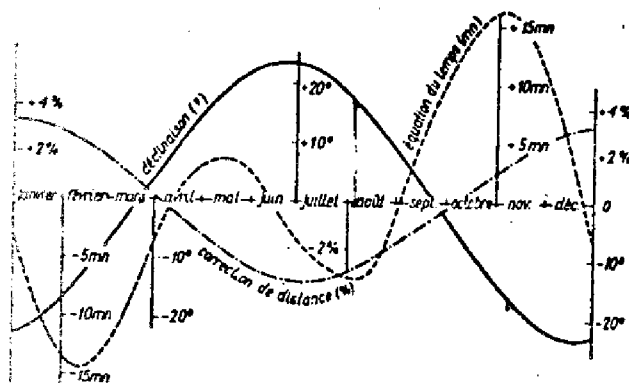
### 1.1.1. Généralités [3]

Il est généralement admis que le rayonnement solaire est produit par un phénomène thermonucléaire contrôlé de transformation de l'hydrogène en helium (de hélios = soleil) : les noyaux des atomes de deutérium et de tritium (isotopes de l'hydrogène) fusionnent en libérant de l'énergie. La réaction est schématiquement la suivante :



Le neutron émis permet l'entretien de la réaction.

A la limite de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire apporte, une valeur moyenne annuelle de  $1400 \text{ W/m}^2$  environ. La variation (selon la date) autour de cette valeur est de 3,5 %, due à la variation de la distance Terre-Soleil. La terre a, en plus, un mouvement de rotation autour de son axe polaire, que nous considérons comme de direction fixe dans l'espace malgré ses faibles mouvements de précession et nutation. Le plan équatorial fait un angle de  $23^{\circ}27'$  au moment des solstices, en passant par la valeur  $0^{\circ}$  définissant les 2 équinoxes de printemps et d'automne.



Variations annuelles de la déclinaison solaire, de la correction de distance Terre-Soleil (en %) et de l'équation du temps.\*

- Figure 1 -

\* Equation du temps : pour avoir le temps solaire vrai par une correction fonction de la date.

En première approche, on peut prendre comme formule pour donner une valeur approchée de la déclinaison.

$$\delta = 23,45 \quad \sin \frac{360 \cdot (284+n)}{365} \quad (1.)$$

n = nième jour de l'année.

### I.1.2. Rayonnements solaires direct et diffus

Abordant l'atmosphère aux très hautes altitudes par la rencontre d'atomes épars d'hélium ou d'hydrogène, puis par celle d'atomes ionisés multiples et de molécules de plus en plus nombreuses, le rayonnement solaire atteint la stratosphère, en n'ayant traversé qu'un dixième de la masse atmosphérique gazeuse totale, vers 15 km d'altitude. Il pénètre ensuite dans la troposphère et, après cet ultime parcours, finit par atteindre le sol après avoir été diffusé, diffracté, absorbé, réfracté ... par les gaz de température et de densité croissante avec le voisinage du sol.

Dès ici, nous pourrions donc introduire les notions de rayonnements solaires direct et diffus. Les composantes au sol du rayonnement solaire seront donc :

- Le rayonnement direct (à incidence normale)

Il s'agit là de l'éclairement énergétique d'une surface réceptrice normale aux rayons solaires par le seul rayonnement provenant directement du disque solaire.

- Le rayonnement diffus (sur une surface horizontale)

Constitué du rayonnement prélevé sur le rayonnement solaire direct par les molécules ou particules diffusantes, surtout dans les couches les plus proches du sol ; le rayonnement solaire diffus n'a pas d'orientation privilégiée et parvient donc au sol en provenance de toute la voûte céleste.

- Le rayonnement global (sur une surface horizontale)

Le rayonnement solaire global correspond à l'éclairement énergétique d'une surface horizontale, par les rayonnements solaires direct et diffus.

Parvenant au sol, le rayonnement solaire n'est qu'en partie absorbé ; les couleurs mêmes de la végétation, des fleurs, du sol, du sable ... matérialisant cette réflexion sélective et diffuse. La fraction du rayonnement absorbée varie assez considérablement avec la longueur d'onde.

Ce rayonnement réfléchi diffus repart vers l'atmosphère, qui le rediffuse de nouveau partiellement vers le sol.

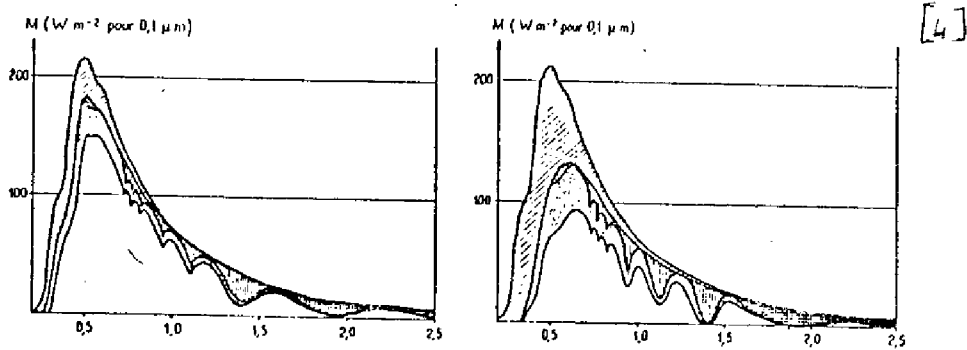


Figure 2 - Répartition spectrale du rayonnement solaire direct au sol par ciel clair et sec.

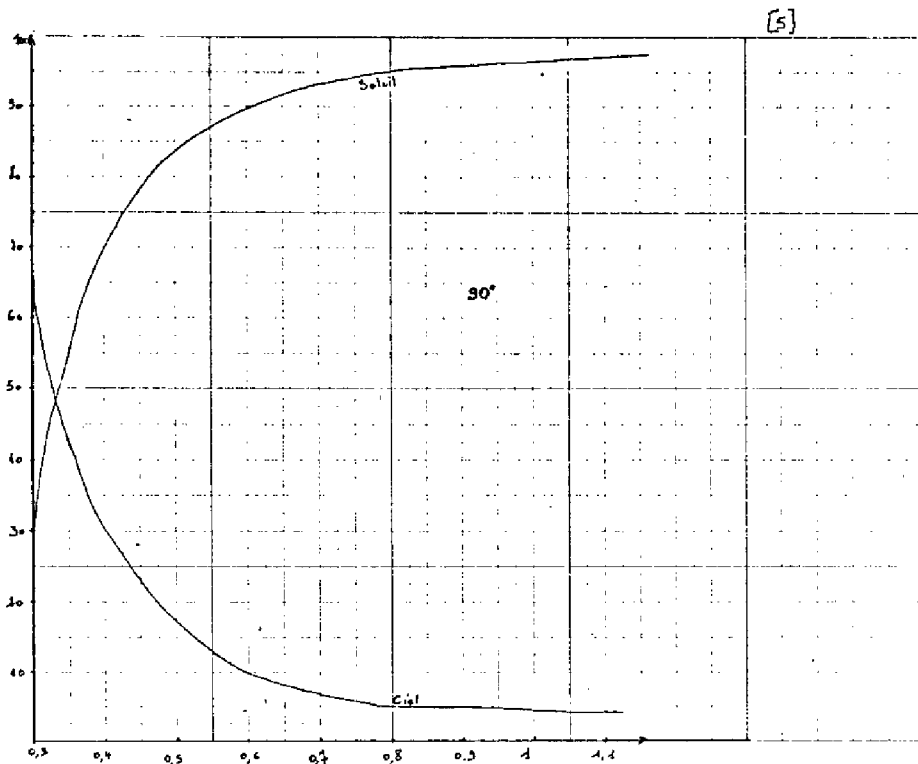
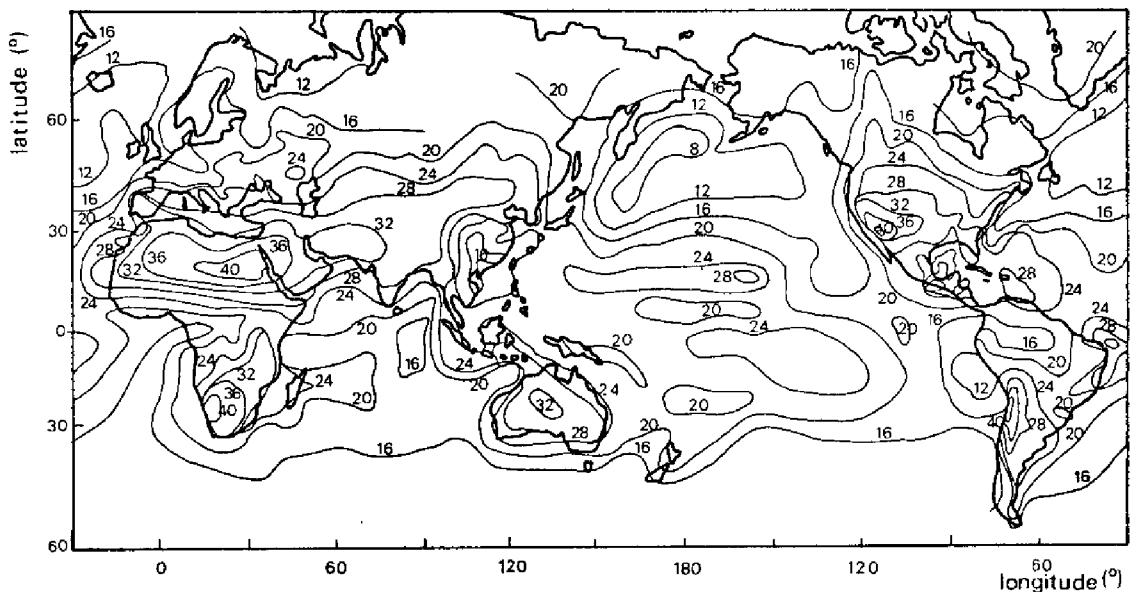


Figure 3 - Pourcentage selon l'attitude des rayonnements du soleil et du ciel dans le rayonnement total.

### I.1.3. Ensoleillement et irradiation [4]

L'ensoleillement  $S$  est caractérisé par la fraction de temps pendant laquelle le ciel est dégagé, on devrait dire où le rapport entre l'éclairement solaire direct et l'éclairement total (direct + diffus) dépasse une certaine fraction (par exemple 0,8). La figure suivante donne les courbes d'égal ensoleillement moyen annuel sur l'ensemble de la terre. Ces courbes sont cotées en centaines d'heures de soleil par an. Il suffit de se souvenir que le soleil en un lieu donné fournit un ensoleillement théorique de 4383 h/an pour se rendre compte que d'après cette carte le facteur d'ensoleillement varie entre plus de 0,9 (4000 h/an : Sahara, Californie, Chili, Pérou) et moins de 0,2 (Pacifique Nord). Une telle carte à échelle très réduite ne peut être que grossière en raison de l'influence importante des microclimats sur la nébulosité.

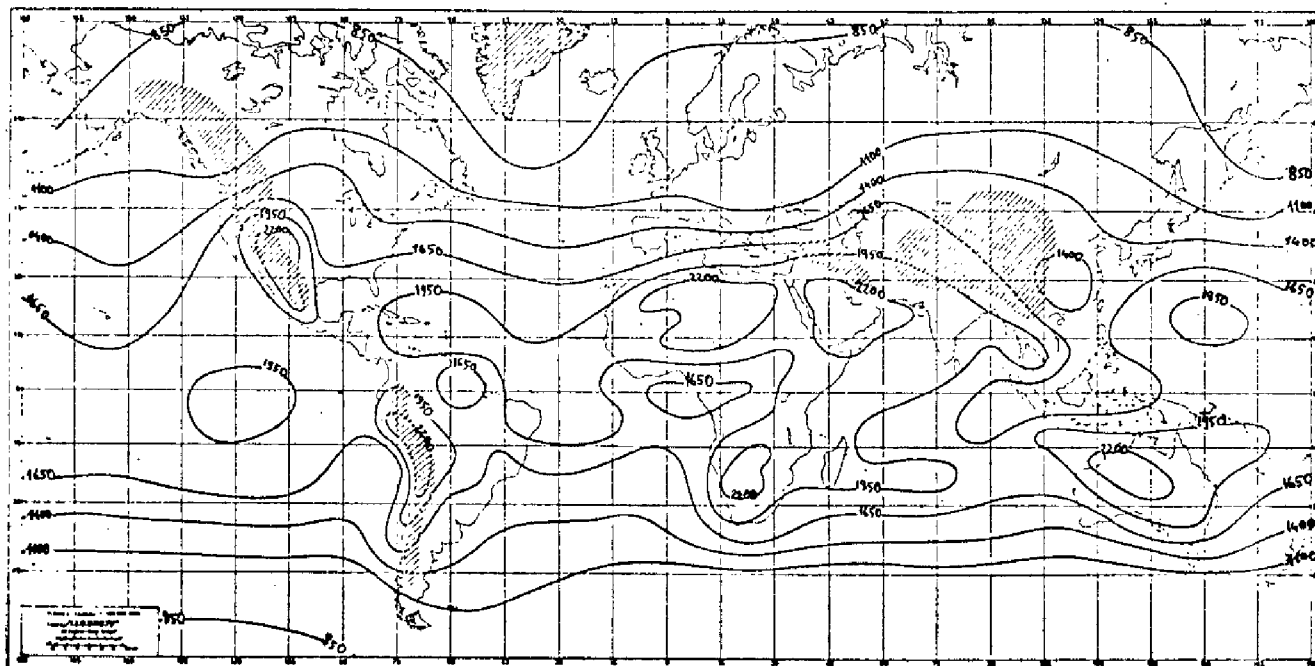


. Courbes d'égal ensoleillement annuel de la Terre.

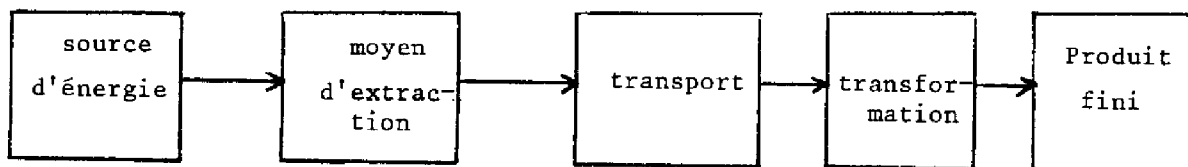
Les cotes portées sont des centaines d'heures. L'absence totale de nébulosité correspondrait à 4382 heures de soleil par an.

#### - Figure 4 -

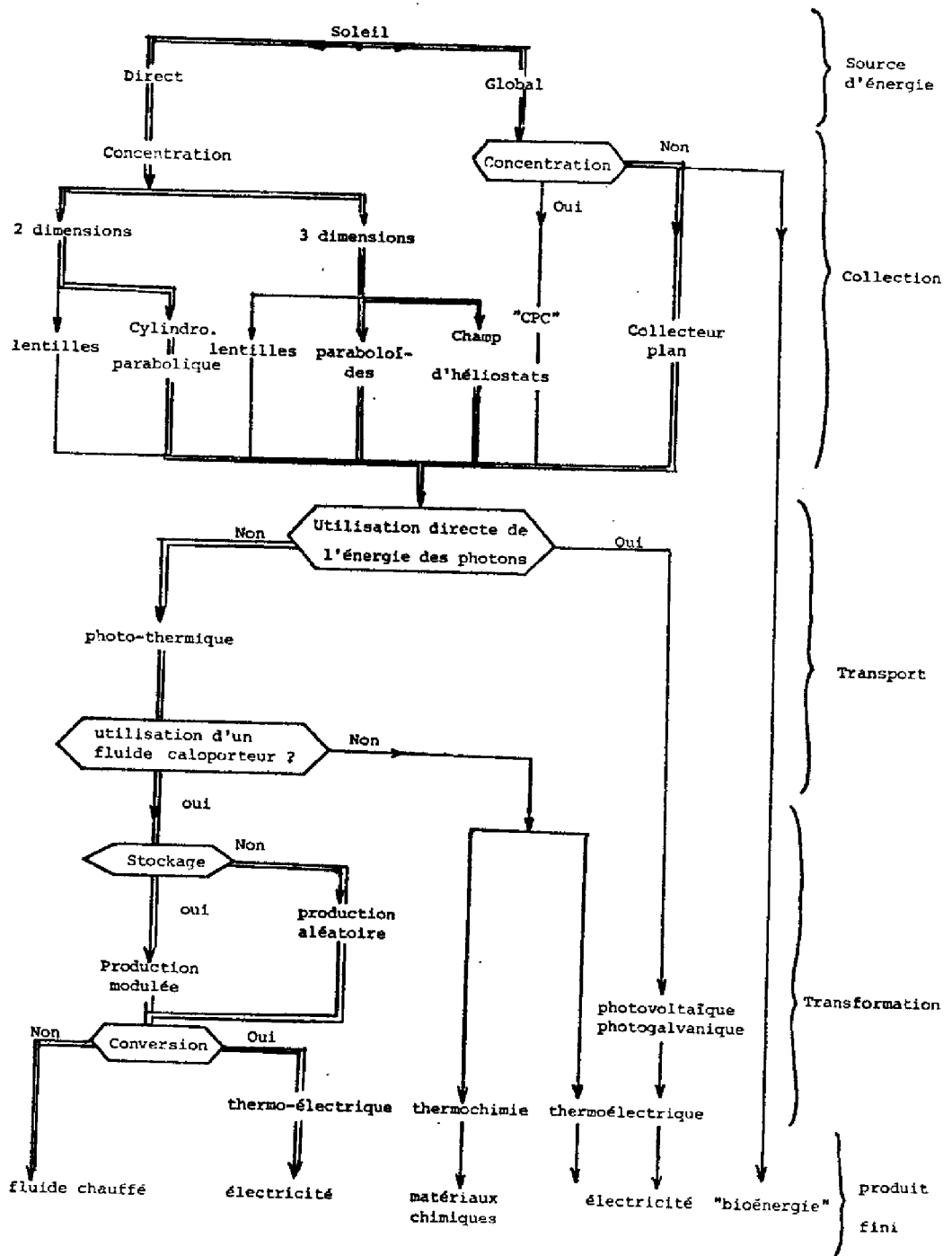
L'irradiation  $I$  est l'énergie totale reçue par unité de surface dans un intervalle de temps donné. Cette quantité peut être représentée sous forme d'énergie totale annuelle ou journalière moyenne ou de puissance moyenne.

SOMMES ANNUELLES DU RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL (kilojoules par cm<sup>2</sup> et par an)- Figure 5 -

Nous allons maintenant étudier les diverses méthodes employables pour capter et utiliser cette énergie du soleil. Avant de commencer cette étude, nous avons introduit un synoptique élaboré au sein de l'opération SEESI, dont l'objet est de présenter de façon synthétique les filières d'utilisation de l'énergie solaire. Ce synoptique a pu être obtenu en utilisant un schéma directeur commun à toutes les filières énergétiques et qui est le suivant :







- Figure 6 -

Comme, par la suite, nous étudierons les filières photothermiques d'utilisation de l'énergie solaire, nous ne nous intéresserons qu'aux problèmes de rayonnement thermique que nous allons introduire maintenant.

## I.2. LE RAYONNEMENT THERMIQUE

### I.2.1. Notions générales relatives au rayonnement thermique

#### I.2.1.1. Energie rayonnée sur l'ensemble des longueurs d'onde

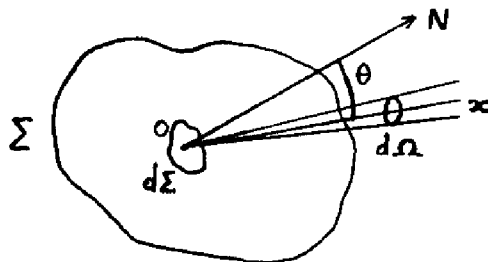
##### I.2.1.1.1. Flux énergétique $\phi$

Le flux énergétique  $\phi$  émis par une source  $\Sigma$  représente la puissance rayonnée par  $\Sigma$  dans tout l'espace qui l'entoure ( $4\pi$  stéradians) et sur toute l'échelle des longueurs d'onde  $\lambda$ . On précise parfois ce dernier point en parlant de flux énergétique total.  $\phi$  s'exprime en watt.

Nous considérerons également  $d^2 \phi$ , flux envoyé par l'élément de surface  $d\Sigma$ , dans le petit angle solide  $d\Omega$  et  $d\phi$ , flux envoyé dans tout l'espace où elle peut émettre (généralement  $2\pi$  sr) par la surface  $d\Sigma$ . La relation entre  $d^2 \phi$  et  $d\phi$  étant :

$$d\phi = \int_{2\pi \text{ sr}} d^2 \phi = \int_{\Omega} d^2 \phi \quad (2.)$$

##### I.2.1.1.2. Luminance énergétique $L$ (formule de Bouguer)



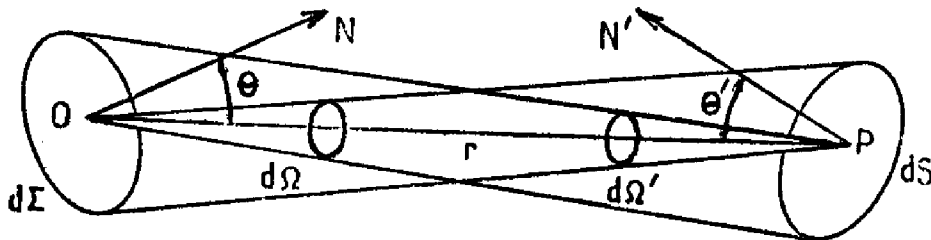
- Figure 7 -

Considérons un point  $O$  de la surface émettrice et l'élément  $d\Sigma$  centré sur  $O$  (figure 7). Soit une direction d'émission  $Ox$  faisant l'angle  $\theta$  avec la normale  $ON$  à  $d\Sigma$  et soit l'angle  $d\Omega$  d'axe  $Ox$ , pour des quantités  $d\Sigma$  et  $d\Omega$  suffisamment petites ; on peut poser :

$$d^2 \phi = L \cos \theta d\Sigma d\Omega \quad (3.)$$

$\cos \theta d\Sigma$  représente la projection de  $d\Sigma$  sur le plan normal à  $Ox$  : c'est, en quelque sorte, la surface utile de la source pour un observateur qui regarde suivant  $Ox$ . La luminance énergétique  $L$  dépend de la direction  $Ox$  et du point  $O$  considéré :  $L(Ox, O)$ . Dans certains cas particuliers,  $L$  peut être indépendant de  $Ox$  ou de  $O$  ; le rayonnement est alors respectivement "isotrope" ou "homogène".

La formule de Bouguer permet de définir à partir des données précédentes, le flux envoyé par un élément de surface  $d\Sigma$  de luminance  $L$  dans la direction  $OP$  sur l'élément de surface  $dS$  centré sur  $P$  (figure 8).



- Figure 8 -

$$d^2 \phi = \frac{L dS \cos \theta' d\Sigma \cos \theta}{r^2}$$

formule de Bouguer dans laquelle  $dS$ ,  $d\Sigma$ ,  $\cos \theta$ ,  $\cos \theta'$  jouent des rôles symétriques.

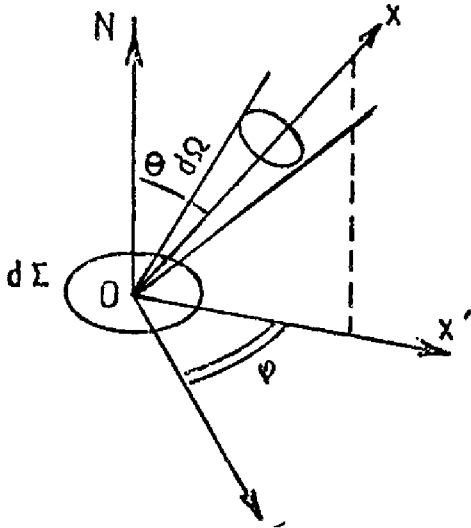
#### 1.2.1.1.3. Emittance énergétique $M$

Si on fait abstraction de la direction  $Ox$  dans laquelle la puissance est envoyée, on définit l'émittance énergétique au point  $O$  par :

$$M = \frac{d\phi \text{ émis par } d\Sigma, d\Omega}{d\Sigma}$$

où  $d\phi$  est le flux rayonné dans tout l'espace où la source  $d\Sigma$  peut émettre, c'est à dire dans les  $2\pi$  stéradians limités par le plan tangent à la source au point  $O$ .  $M$  dépend uniquement du point  $O$ .

Si on considère l'élément émetteur  $d\Sigma$  (figure 9), la relation entre l'émittance et la luminance s'écrit :



- Figure 9 -

$$M = \int_{2\pi sr} L \cos \theta \, d\Omega = \int_{\Omega} L \cos \theta \, d\Omega = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} L(\theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\varphi$$

± Cas particulier :

Lorsque l'émission est isotrope (seul le corps noir possédant en toute rigueur cette propriété),  $L$  est indépendant de  $\theta$  et de  $\varphi$  de sorte que :

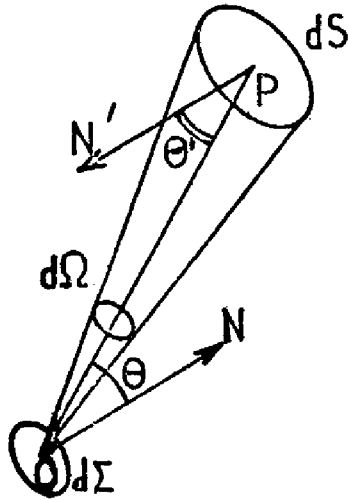
$$M = \pi L$$

#### 1.2.1.1.4. Eclairement énergétique E

Considérons autour du point P, un élément de surface  $dS$  du récepteur et désignons par  $d\phi_R$ , le flux total reçu par  $dS$  venant de tous les émetteurs qui l'entourent. On appelle éclairement énergétique E de la surface  $dS$  au point P, le quotient :

$$E = \frac{d\phi_R}{dS}$$

E dépend du point considéré sur le récepteur S et des différents émetteurs ; ce n'est pas une caractéristique de S alors que l'émittance M est une caractéristique de  $\Sigma$ .



En fonction de la luminance L de  $d\Sigma$

$$dE = L \cos \theta' \cdot d\Omega' = L \cos \theta' \frac{d\Sigma \cos \theta}{r^2}$$

- Figure 10 -

Normes	Symboles	Unités S.I.	Normes	Symboles	Unités S.I.
Flux	$\phi$	W	Emittance	M	$\text{Wm}^{-2}$
Luminance	L	$\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$	Eclairement	E	$\text{Wm}^{-2}$

#### 1.2.1.2. Répartition spectrale de l'énergie

Toutes les grandeurs précédentes se rapportent à un rayonnement global, quelle que soit la répartition spectrale.

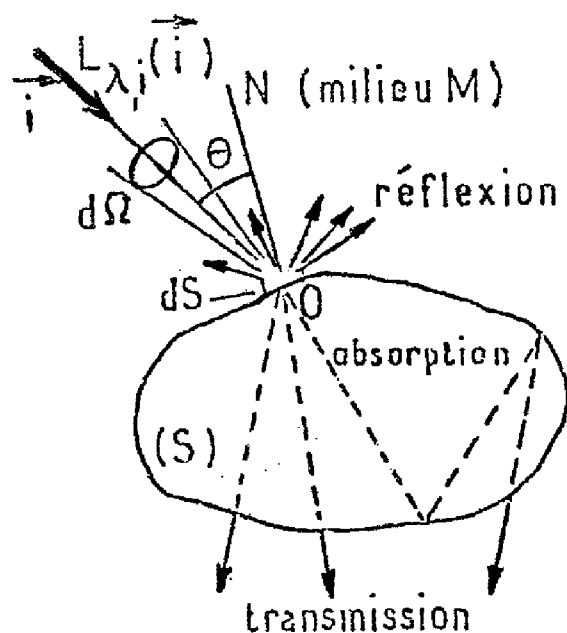
Or, il n'est pas indifférent d'avoir une source qui émette dans l'infrarouge, le visible ou l'ultraviolet. Il faut noter à ce sujet que les radiations sont caractérisées par leur fréquence  $\nu$ , laquelle demeure constante à travers réflexion, réfraction, etc... ; leur vitesse de phase c est liée à  $\nu$  et à  $\lambda$ , longueur d'onde :

$$c = \lambda \nu$$

### I.2.2. Processus d'absorption, de réflexion et de transmission

Nous n'allons pas reprendre tout le développement relatif au calcul de ces facteurs et nous référant à [3] et [15], nous contenterons-nous de donner quelques formules qui nous permettront d'appréhender certains phénomènes tel l'effet de serre.

#### Facteurs monochromatiques directionnels



- Figure 11 -

Nous définirons la réflectivité, transmittivité et absorptivité monochromatiques directionnelles :

$$r'_{\lambda}(\theta, \varphi, T) = \frac{d^2\phi_{\lambda,d}}{d^2\phi_{\lambda,i}} ; \quad \tau'_{\lambda}(\theta, \varphi, T) = \frac{d^2\phi_{\lambda,t}}{d^2\phi_{\lambda,i}} ; \quad \alpha'_{\lambda}(\theta, \varphi, T) = \frac{d^2\phi_{\lambda,a}}{d^2\phi_{\lambda,i}}$$

avec le symbolisme  $\left\{ \begin{array}{l} i = \text{incident} \\ a = \text{absorbé} \\ d = \text{diffracté} \\ t = \text{transmis} \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} ' : \text{signifie que l'incidence est} \\ \text{directionnelle} \\ \Delta : \text{que la réflexion est hémisphérique} \end{array} \right.$

et par suite de la conservation de l'énergie :

$$\rho'_{\lambda} + \tau'_{\lambda} + d'_{\lambda} = 1$$

### I.2.3. Cas particulier du corps noir

#### I.2.3.1. Définition

On appelle corps noir, un corps qui absorbe totalement tout le rayonnement qu'il reçoit, quelles que soient la longueur d'onde et l'incidence. Nous aurons donc :

$$d^2 \phi_{\lambda, a} = d^2 \phi_{\lambda, i} \quad ; \quad d^2 \phi_{\lambda, t} = d^2 \phi_{\lambda, d} = 0$$

et en considérant les flux totaux :

$$d^2 \phi_a = d^2 \phi_i \quad ; \quad d^2 \phi_t = d^2 \phi_d = 0$$

Autrement dit, le corps noir ne réfléchit (ou diffuse) aucun rayonnement. Il ne transmet rien ; c'est un corps opaque.

Un volume  $dV$  où se propage un rayonnement contient une énergie rayonnante  $dU$ . Si la vitesse de propagation de l'énergie rayonnante est égale à  $v_e$  ; l'énergie rayonnante pourra être calculée par :

$$U_v = \frac{4 \pi L_v}{v_e}$$

Pour le rayonnement du corps noir dans le vide, caractérisé par l'exposant 0, il vient :

$$U_v^0 = \frac{4 \pi L_v^0}{v_e} = \frac{4 \pi M_v^0}{v_e}$$

#### I.2.3.2. Loi de Planck

Les lois d'émission du corps noir s'établissent théoriquement à l'aide de raisonnements sur le rayonnement en équilibre à l'intérieur d'une

enceinte de forme quelconque, fermée, rigoureusement vide, isotherme, à parois opaques. Deux études peuvent être effectuées ; la première, thermodynamique, est fondée sur les lois de Kirchoff, Stefan Boltzmann, Wien ; la seconde utilise la statistique de Bose-Einstein qui rend compte de la nature quantique des photons ; elle conduit à l'expression de la luminance monochromatique du rayonnement noir dans le vide. Nous adopterons ce deuxième point de vue en donnant la loi de Planck pour la luminance monochromatique.

$$L_v^o = \frac{2 \, h \nu^3}{c_o^2 \left( \exp \left( \frac{h\nu}{kT} \right) - 1 \right)}$$

#### I.2.3.3. Loi de Stefan-Boltzmann

La luminance totale du corps noir est :  $L_o = \int_0^{\infty} L_{\lambda}^o \, d\lambda$

Par suite de l'isotropie du rayonnement :

$$M^o = \pi \cdot L^o = \sigma \cdot T^4$$

$$\left( \sigma = (5,670 + 0,003) 10^{-8} \text{ W. m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \right)$$

Selon Wien (  $\lambda T = c^k$  ), l'énergie rayonnée par un corps noir a une longueur d'onde qui varie en fonction de la température T.

Du fait que la température du corps noir sera plus élevée que la température de l'ambiante qui envoie le rayonnement, de ceci découle immédiatement que l'énergie rayonnée par ce corps noir sera dans une gamme de fréquence différente de celle du rayonnement incident.

Pour le corps noir soumis au rayonnement solaire :

$$30 \mu\text{m} > \lambda > 4 \mu\text{m}$$



#### I.2.4. Emissivité d'un corps

##### Emissivité monochromatique directionnelle - loi de Draper.

C'est le rapport de la luminance monochromatique  $L_{\lambda}(\theta, \varphi, T)$  du matériau d S considéré, dans la direction  $\Delta(\theta, \varphi)$  à celle du corps noir  $L_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T)$  à la même température et dans les mêmes conditions

$$\varepsilon'_{\lambda}(\theta, \varphi, T) = \frac{L_{\lambda}(\theta, \varphi, T)}{L_{\lambda}^{\circ}(T)}$$

La loi de Draper (ou 2ème loi de Kirchoff) montre que, pour chaque longueur d'onde, chaque direction  $\Delta(\theta, \varphi)$  et pour une température T donnée, les absorptivités et émissivités monochromatiques directionnelles d'un élément d S sont égales :

$$\alpha'_{\lambda}(\theta, \varphi, T) = \varepsilon'_{\lambda}(\theta, \varphi, T)$$

De même, l'émissivité monochromatique  $\varepsilon_{\lambda}$  est le rapport de l'émittance monochromatique  $M_{\lambda}(T)$  du matériau d S considéré à celle du corps noir  $M_{\lambda}^{\circ}(T)$  à la même température et dans les mêmes conditions (en particulier, émission vers le même milieu M).

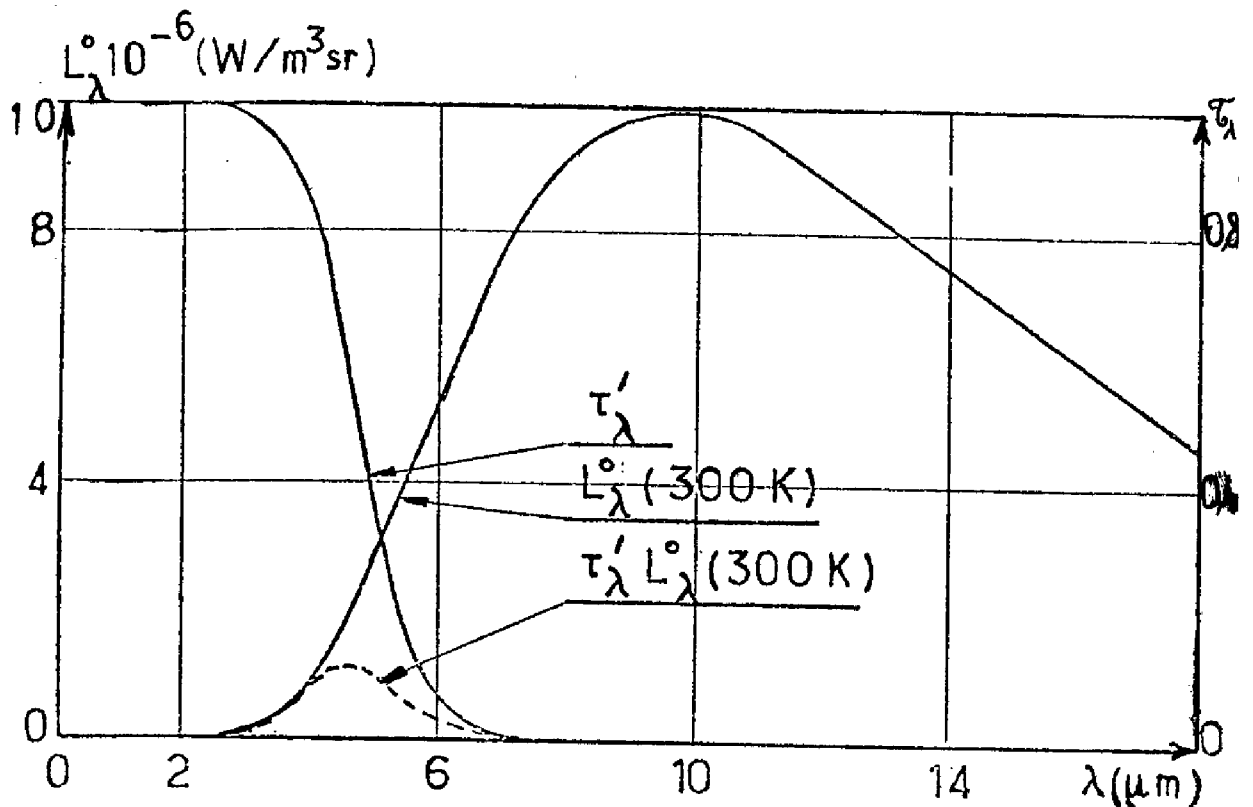
$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}(T) = \frac{M_{\lambda}(T)}{M_{\lambda}^{\circ}(T)}$$

#### I.2.5. Application - Effet de serre ; filières d'utilisation de l'énergie solaire

Sur les figures suivantes est représentée la courbe donnant  $\tau'_{\lambda}(\theta = 0)$  (incidence normale) en fonction de  $\lambda$  pour une lame de verre de 1 mm d'épaisseur. Cette lame est parfaitement transparente pour les longueurs d'onde inférieures à  $2,5 \mu\text{m}$  et complètement opaque pour les longueurs d'onde supérieures à  $7 \mu\text{m}$  ; donc elle transmet intégralement la lumière visible ( $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,8 \mu\text{m}$ ). Sur ces mêmes courbes sont indiquées, les courbes de répartition spectrale  $L_{\lambda}^{\circ}$  d'un corps noir dans le vide respectivement à  $300^{\circ}\text{K}$  et  $6000^{\circ}\text{K}$  ; (température approximative de la surface solaire).  $\tau'_{\lambda} L_{\lambda}^{\circ}$  représente la luminance totale transmise par le vitrage.

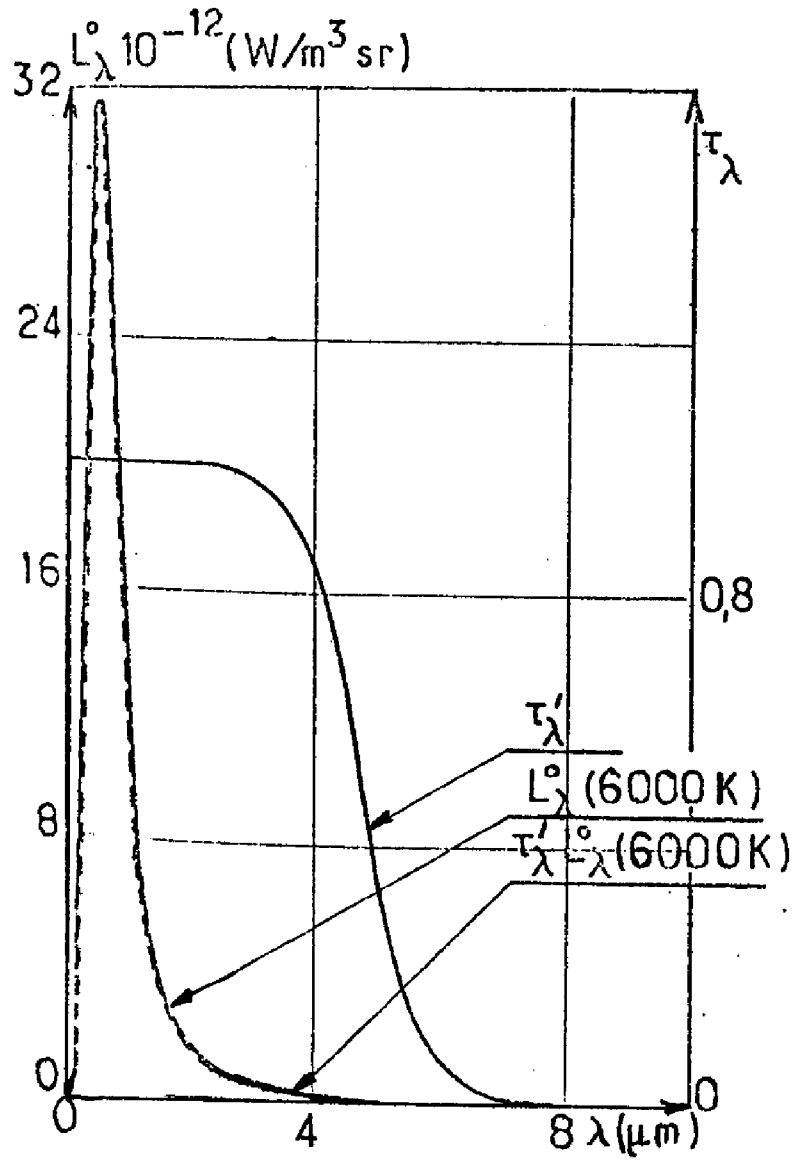
Comme cela apparaît sur les figures, elle est très différente pour  $T = 300^\circ \text{ K}$  et  $T = 6000^\circ \text{ K}$ .

Cet effet est utilisé dans les serres. Le verre est transparent pour le rayonnement issu du soleil qu'on peut considérer comme un corps noir à une température voisine de  $6000^\circ \text{ K}$ . Il est opaque au rayonnement au sol qui se comporte pratiquement comme un corps noir à  $300^\circ \text{ K}$ .



- Figure 12 -

De ce qui précède, nous voyons qu'un moyen de capter sans la concentrer l'énergie solaire incidente serait d'appliquer l'effet de serre. Nous verrons plus loin que ce moyen de captation, s'il à l'avantage de permettre la collection du rayonnement global, ne permettra pourtant pas d'atteindre de hautes températures. De fait, dès qu'il est nécessaire d'atteindre des températures supérieures à environ  $300^\circ \text{ C}$ , il va falloir effectuer une concentration du rayonnement solaire direct.

- Figure 13 -

Cette concentration pourra être effectuée :

- soit au moyen de surfaces réfléchissantes ;
- soit au moyen de lentilles.

## CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à présenter succinctement des notions générales relatives au rayonnement solaire et au rayonnement thermique ainsi que le synoptique des filières d'utilisation de l'énergie solaire.

Il est important de bien différencier les différents types de rayonnement car si le collecteur plan va pouvoir collecter le rayonnement global, pratiquement tous les systèmes à concentration ne pourront capter que le rayonnement direct. Ceci apparaît dans le synoptique précédemment établi.

L'introduction au rayonnement thermique permet, quant à elle, de définir physiquement les divers phénomènes inhérents à la captation du rayonnement solaire et, en particulier, l'effet de serre dont l'application immédiate est le collecteur plan.



BIBLIOGRAPHIECHAPITRE I

- 1 M. PALZ  
L'utilisation de l'énergie solaire : un nouveau départ.  
La revue française de l'électricité n° 254 - 3<sup>ème</sup> trimestre 1976.
- 2 J. PERCEBOIS  
Perspectives économiques de l'énergie solaire.  
Thèse complémentaire, soutenue le 12 Février 1975 à l'Université  
des Sciences Sociales de Grenoble
- 3 F. DESVIGNES  
Le rayonnement solaire.  
Acta Electronica volume 18 - n° 4 - p. 275-294 - 1975
- 4 Cahier de l'AFEDES\* n° 1.
- 5 P. LEMAIGRE-VIREUX  
Le rayonnement solaire.  
Revue française d'électricité n° 244 - p. 24-25 - 1976
- 6 HUETZ-AUBERT  
Groupement universitaire de thermique.  
Perpignan Septembre 1976 - école d'été - Transfert d'énergie par  
rayonnement thermique n° 1.

\* AFEDES : Association Française d'Etude et de Développement de l'Energie Solaire.



## CHAPITRE II

---

### LE COLLECTEUR PLAN





## INTRODUCTION

Il est apparu sur le synoptique général des filières de conversion de l'énergie solaire que le collecteur plan était le seul dispositif photothermique pour lequel n'intervient aucune concentration. Cette originalité nous a incité à le présenter séparément des autres dispositifs photothermiques envisagés par la suite dans le Chapitre III et tous relatifs à la concentration.

### II.1. RAPPEL D'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE - PRISE EN COMPTE DE L'ANGLE D'INCIDENCE

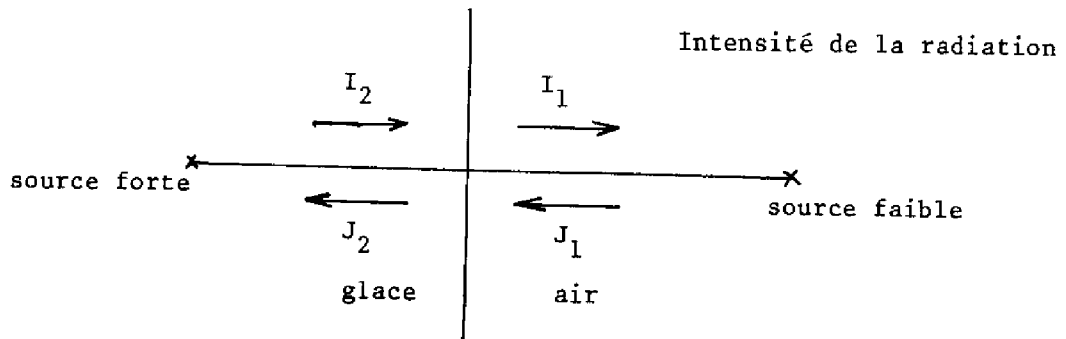
Nous avons, ci-dessous retranscrit une étude de la variation du coefficient de transmission  $\tau'$  en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement.

#### II.1.1. Transmittance et pertes par réflexion de plusieurs plaques d'un collecteur solaire : formules et tables pour $n = 1,5$ [2]

Cette méthode est basée sur l'utilisation d'une matrice dérivée des formules pour la transmission, et aussi la perte de réflexion d'une fenêtre à vitres multiples d'un collecteur de radiation solaire à plaque plate. La méthode générale est applicable à toutes quantités de plaques de verre parallèles, transparentes, absorbantes ou non-absorbantes. Des tableaux sont présentés pour des fenêtres comprenant 1, 2 ou 3 plaques de verre non-absorbant à indice 1,5. Ces tableaux s'appliquent à la radiation "directe" (à direction unique) incidente à tout angle spécifié au départ de la normale, et à la radiation à angle large ("diffuse") de toutes largeurs de cône spécifiées. Les formules les plus facilement obtenables en littérature récente ne sont pas tout à fait exactes, car la polarisation par réflexion n'a pas été traitée correctement. Les formules antérieures étaient correctes, mais n'étaient pas accompagnées par des tableaux détaillés.

1er Cas : Incidence normale, radiation unidirectionnelle :

- 1 interface :



- Figure 14 -

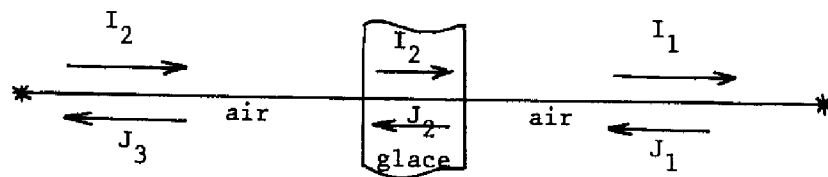
$$I_1 = \tau' I_2 + R' J_1$$

$$J_1 = R' I_2 + \tau' J_1$$

$$J_2 = \left(\frac{1}{\tau'}\right) \cdot \left[ R' I_1 + (\tau'^2 - R'^2) J_1 \right]$$

$$I_2 = \left(\frac{1}{\tau'}\right) \cdot \left[ I_1 - R' J_1 \right] \quad \begin{bmatrix} I_2 \\ J_2 \end{bmatrix} = \frac{[M]}{\tau'} \begin{bmatrix} I_1 \\ J_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

- 2 interfaces :



- Figure 15 -

$$\begin{bmatrix} I_3 \\ J_3 \end{bmatrix} = \frac{M}{\tau'} \begin{bmatrix} I_2 \\ J_2 \end{bmatrix} = \frac{M^2}{\tau'^2} \begin{bmatrix} I_1 \\ J_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

- 2 N interfaces :

$$V_{2n+1} = \begin{bmatrix} I_{2n+1} \\ J_{2n+1} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} M \\ \Gamma' \end{pmatrix}^{2n} \cdot V_1 \quad (3)$$

- Simplification dans le cas où  $J_1 = 0$  (sans réflexion)

$$I_3 = \left( \frac{m_{11}}{\Gamma'^2} \right) \cdot J_1 \quad \rightarrow \quad \text{transmittance} = \frac{I_1}{I_3} = \frac{\Gamma'^2}{m_{11}}$$

$$\text{Réflectance} = 1 - \text{Transmittance} = \frac{m_{11} - \Gamma'^2}{m_{11}}$$

- Dans le cas des 2 interfaces :

$$M^2 = \begin{bmatrix} 1 - R'^2 & -R' - R' (\Gamma'^2 - R'^2) \\ R' + R' (\Gamma'^2 - R'^2) & -R'^2 + (\Gamma'^2 - R'^2)^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{Comme } \Gamma' + R' = 1 \quad \rightarrow \quad M^2 = \begin{bmatrix} \frac{\Gamma' (1+R')}{m_{11}} & \frac{-2 R' \Gamma'}{m_{12}} \\ \frac{2 R' \Gamma'}{m_{21}} & \frac{1 - 4 R' + 3 R'^2}{m_{22}} \end{bmatrix}$$

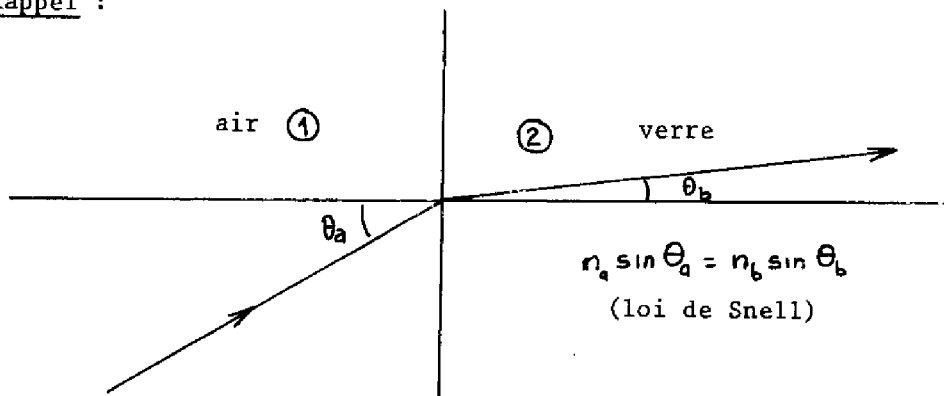
$$V_3 = \frac{1}{\Gamma'^2} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \cdot V_1 \quad (5)$$

Si  $J_1 = 0$

$$I_3 = \frac{1}{\Gamma'^2} m_{11} \cdot I_1 \quad \text{ou} \quad \frac{I_1}{I_3} = \frac{\Gamma'^2}{m_{11}} = \frac{\Gamma'^2}{\Gamma' (1+R')} = \frac{1 - R'}{1+R'} = T$$

$$\text{de même} \quad \frac{I_1}{I_{2n+1}} = \frac{1 - R'}{1 + (2n-1) R'} \quad (6)$$

Rappel :



- Figure 16 -

ici  $n_a = n_{\text{air}} = 1$  (indice de réfraction)

$n_b = n_{\text{verre}} = 1,5$

On aura donc pour  $n = 1,5 = \frac{n_b}{n_a}$   $R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2$  A incidence normale

nombre de plaques de verre	formule T	valeur de T (i=0) puisque rayon incident perpendiculaire à la glace.
1	$\frac{1-R'}{1+R'}$	0,923
2	$\frac{1-R'}{1+3R'}$	0,857
3	$\frac{1-R'}{1+5R'}$	0,8
N	$\frac{1-R'}{1+(2N-1)R}$	—

2ème Cas : Incidence oblique, radiation unidirectionnelle :

obtenu depuis les équations de Fresnel

$$\left\{ \begin{array}{l} R'_p = \frac{1}{2} \left( \frac{t_g^2 (i-i')}{K_g^2 (i+i')} \right) \quad (7) \\ R'_s = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2 (i-i')}{\sin^2 (i+i')} \right) \quad (8) \end{array} \right.$$

$R'_p$  pour la zone ①

$R'_s$  pour la direction de vibration perpendiculaire au plan d'incidence

$\theta = i = \text{angle d'incidence } (\theta_a)$

$\theta' = i' = \text{angle de réfraction } (\theta_b)$

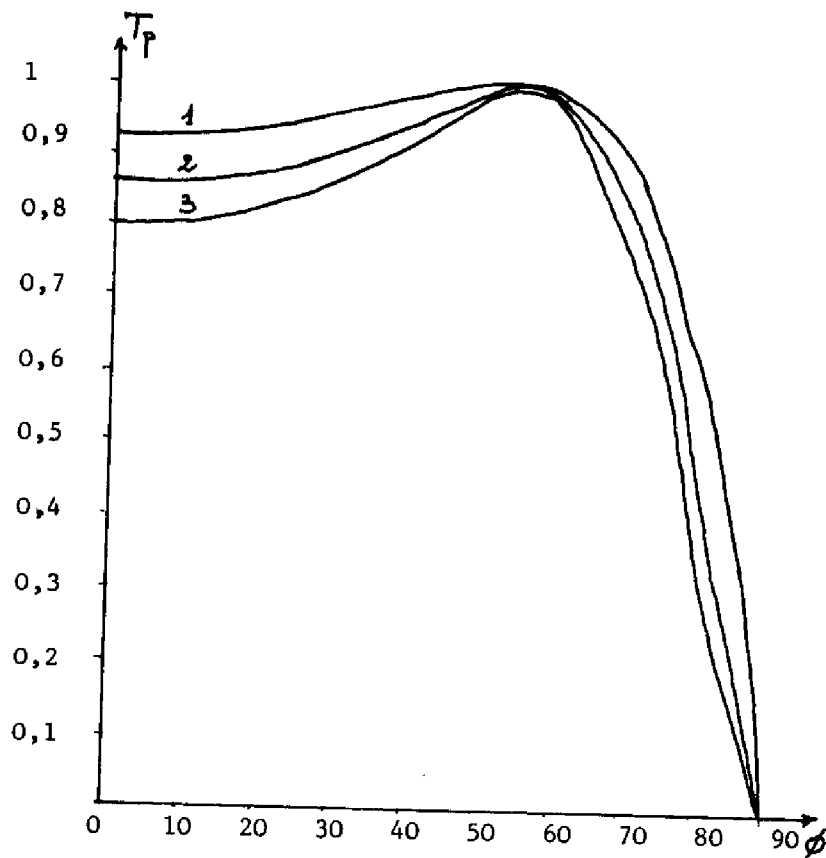
Si on a 
$$V_5 = \left(\frac{M}{\gamma'}\right)^4 \cdot V_1 \quad (9) \quad \frac{I_1}{I_5} = \frac{1 - R'_p}{1 + 3R'_p} \quad (10)$$

$$T = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - R'_p}{1 + 3R'_p} + \frac{1 - R'_s}{1 + 3R'_s} \right]$$

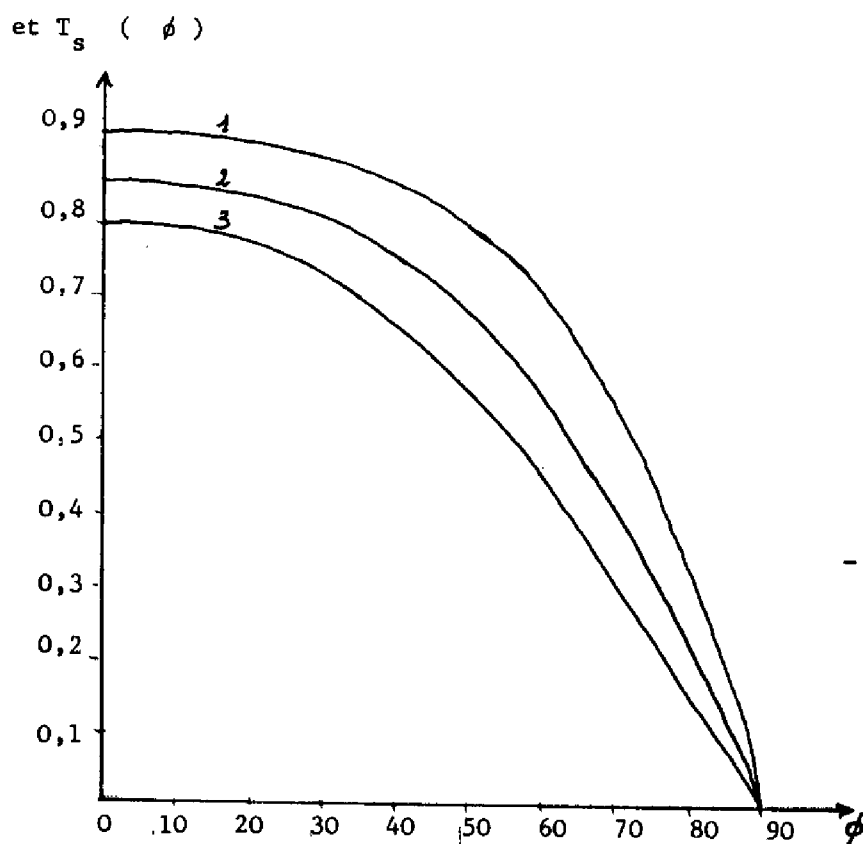
$$T = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - R'_p}{1 + (2N-1)R'_p} + \frac{1 - R'_s}{1 + (2N-1)R'_s} \right] \quad (11)$$

$R'_s$  pour la direction de vibration perpendiculaire au plan d'incidence.

Si nous traçons  $T_p$  ( $\phi$ )



- Figure 17 -

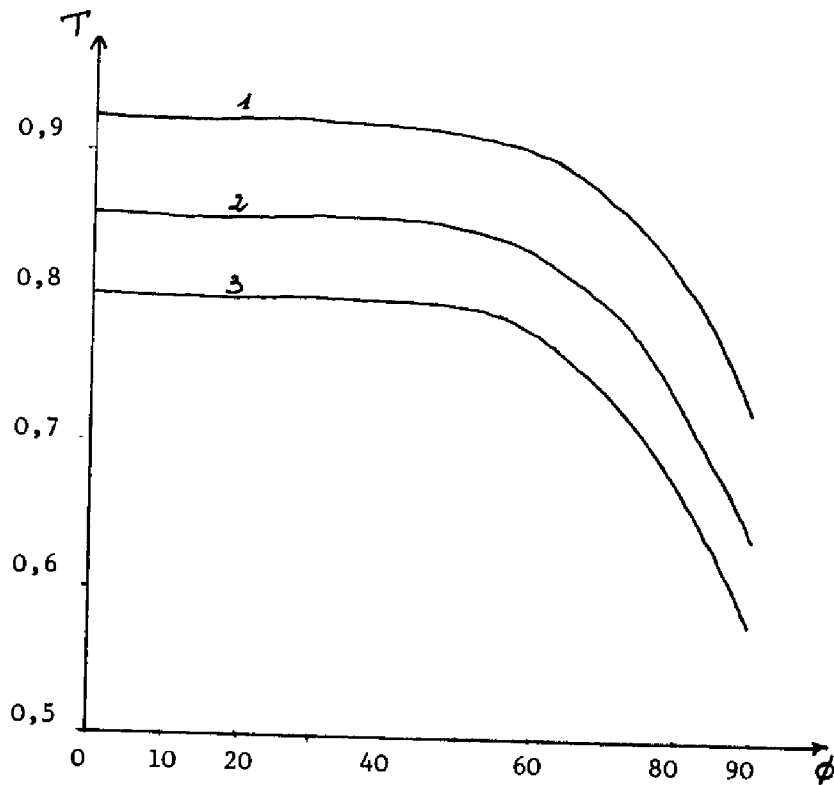


- Figure 18 -

$\phi$ (deg)	1 plaque	2	3
0	0,923	0,857	0,8
11	/	/	/
21	/	/	/
31	.922	.856	0,799
41	.920	.854	.798
51	.915	.848	.793
61	.902	.833	.779
71	0,874	0,797	.741
81	.816	.725	0,664
90	0,722	0,632	0,575

Radiation à grand angle  
(cône)

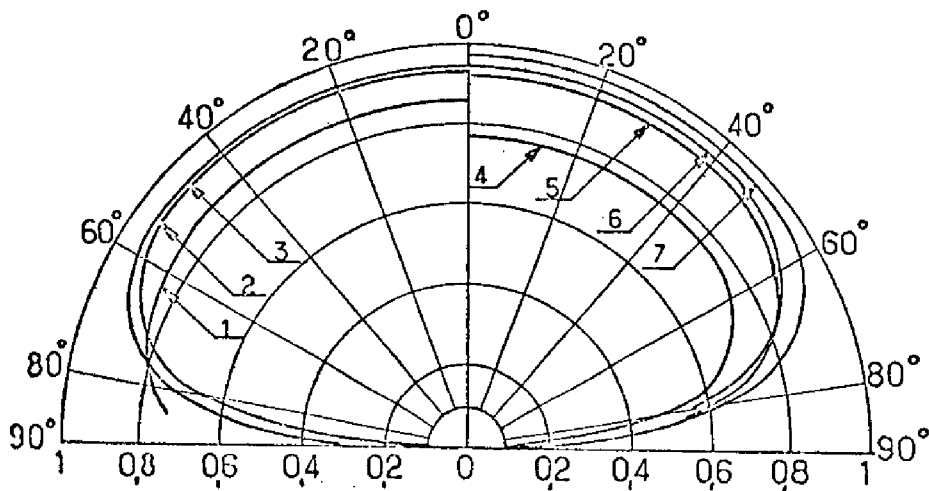
En réalité, on compte que  $0,925 > T > 0,915$  à cause des différences dans les surfaces de la structure. Des variations peuvent être produites par la poussière, l'exposition à des facteurs chimiques .... De même, on ne peut pas dire que le rayon incident n'est pas, même légèrement, polarisé.



- Figure 19 -

### II.1.2. Variation de l'émissivité en fonction de l'angle d'incidence [3]

Courbes pour divers matériaux.



- Figure 20 -

Indicatrices d'émissivité totale donnant  $\epsilon(i)$  pour chaque direction faisant l'angle  $i$  avec la normale et pour différentes substances (d'après / 3 /) : oxyde d'aluminium (1); papier (2), bois (3), oxyde de cuivre (4), argile (5), verre (6), glace (7).



### II.1.3. Recherche de l'inclinaison optimale du collecteur

Il est avantageux, compte tenu de la faible densité de puissance recueillie par un capteur solaire, de rechercher un coût surfacique minimum. Il convient donc d'obtenir un faible coût de structure. C'est pourquoi celle-ci sera fixe dans la majorité des réalisations actuelles.

Le problème de trouver une orientation optimale pour satisfaire la demande énergétique se pose donc. En azimuth, l'optimum est, en première approximation, l'orientation au sud.

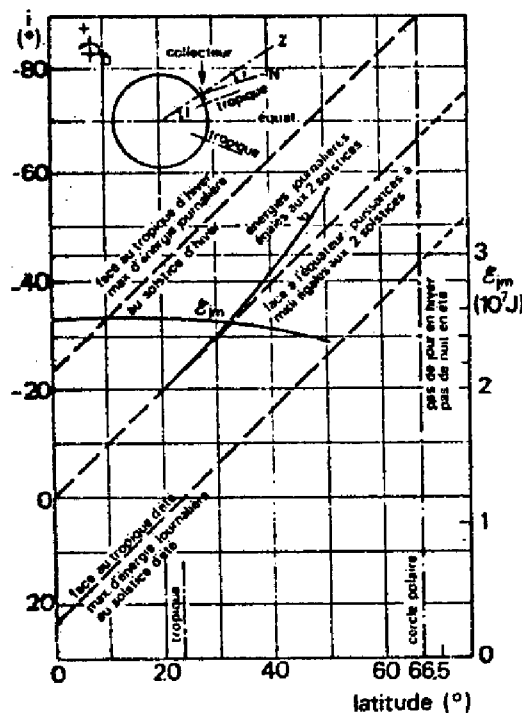
Selon l'utilisation nous trouvons 2 types de critère :

- maximum d'énergie recueillie sur l'année
- maximum de puissance recueillie durant la saison froide.

Pour le chauffage de l'habitat, le critère choisi est le second, légèrement pondéré par le premier, de façon à assurer un bon chauffage durant les demi-saisons.

L'inclinaison optimale est alors

$I_0 = \text{latitude du lieu} + 1/2$  (déclinaison optimale en fonction de la latitude).

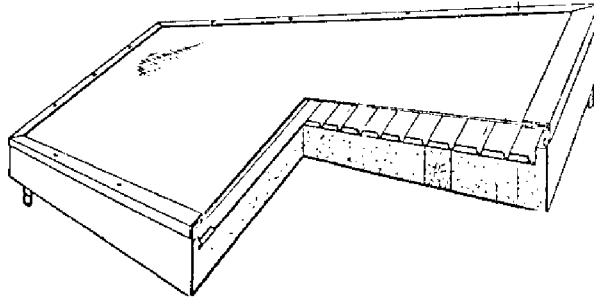


- Figure 21 -

Figure 21: Variation de l'inclinaison optimale du collecteur  $i_o$  et de l'irradiation journalière minimale  $E_{jm}$  en fonction de la latitude locale.

## II.2. RAPPELS DE THERMIQUE

En nous basant sur le modèle de la serre, si nous utilisons à la place du sol, un corps "noir", nous avons à notre disposition dans cet absorbeur une quantité d'énergie que nous pourrions utiliser par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur qui permettra de la transférer du lieu de collection au lieu d'utilisation.



- Figure 22 -

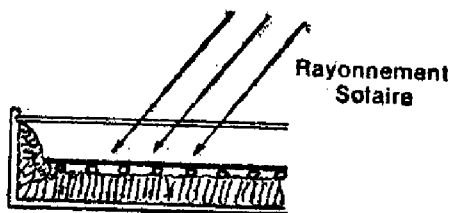
Lors d'une étude de ce type de collecteur, il faudra prendre en compte les phénomènes de rayonnement thermique mais aussi ceux de conduction et convection : [1]

La conduction - La conduction dans un solide homogène opaque est définie comme le transport de la chaleur d'un endroit à un autre, sous l'influence d'un gradient de température, sans déplacement appréciable de particules. La conduction implique le transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une molécule adjacente ; c'est le seul mécanisme d'écoulement calorifique dans un solide opaque. Pour certains solides transparents, tels le verre et le quartz, une partie de l'énergie est transmise par rayonnement aussi bien que par conduction. Avec des gaz et des liquides, la convection et le rayonnement peuvent s'ajouter à la conduction. Quand l'écoulement d'un fluide est laminaire, la chaleur se déplace par conduction perpendiculairement à la direction du mouvement.

La convection - La convection implique le transport de la chaleur par le mélange d'une partie d'un fluide avec une autre partie de ce dernier. Le mouvement du fluide peut être entièrement dû à la différence de densité résultant des différences de température - comme dans la convection naturelle - ou être produit par des moyens mécaniques - comme dans le cas de convection forcée. L'énergie est aussi transportée simultanément par conduction moléculaire et pour les milieux transparents, par rayonnement. Lorsqu'on mesure la conductibilité thermique des gaz et des liquides, on emploie fréquemment un courant de chaleur dirigé vers le bas pour éviter des transferts par convection ; dans le cas des gaz transparents, on doit déduire le rayonnement de la source vers le récepteur de chaleur.

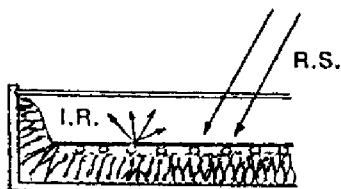
Nous allons maintenant faire apparaître les différents phénomènes thermiques intervenant lors de l'exposition du collecteur plan au rayonnement solaire.

### II.3. ETUDE QUALITATIVE DU COLLECTEUR PLAN À 1 VITRAGE



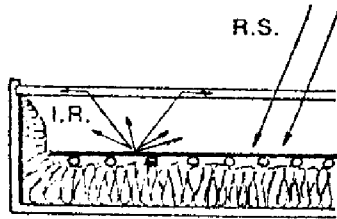
- Figure 23 -

La majeure partie du rayonnement solaire est transmise par le verre. Un faible pourcentage est réfléchi ou absorbé.



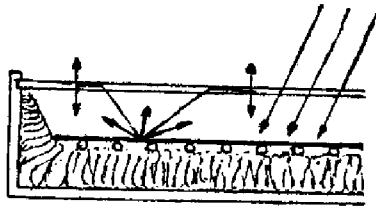
- Figure 24 -

L'absorbeur absorbe une grande proportion du rayonnement solaire et s'échauffe. Il émet de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge (I.R.)



- Figure 25 -

Le vitrage absorbe la quasi totalité du rayonnement émis par le corps absorbant et s'échauffe.



- Figure 26 -

Le vitrage, à son tour émet de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge. En supposant la température du verre uniforme, ce dernier émettra une puissance égale vers l'atmosphère que vers l'absorbant.

Nous n'avons voulu ici qu'explicitement les phénomènes, par la suite, nous utiliserons une formulation en termes d'énergie :

Energie absorbée par corps noir = Energie incidente absorbée + Energie envoyée par corps noir vers vitrage récupérée par corps noir + pertes arrières + pertes par effet de bord (négligées)

$$E_p = \alpha \tau q_s - \left[ q_T - q' + q_B + q_E \right] \quad (12)$$

Si cette formule générale a le mérite d'être claire, il nous faudra néanmoins lors d'une étude physique fine du collecteur ou même lors d'une étude comparative de collecteurs à technologies différentes appliquer la formulation prenant en compte  $\lambda, A, \Omega, v$ .

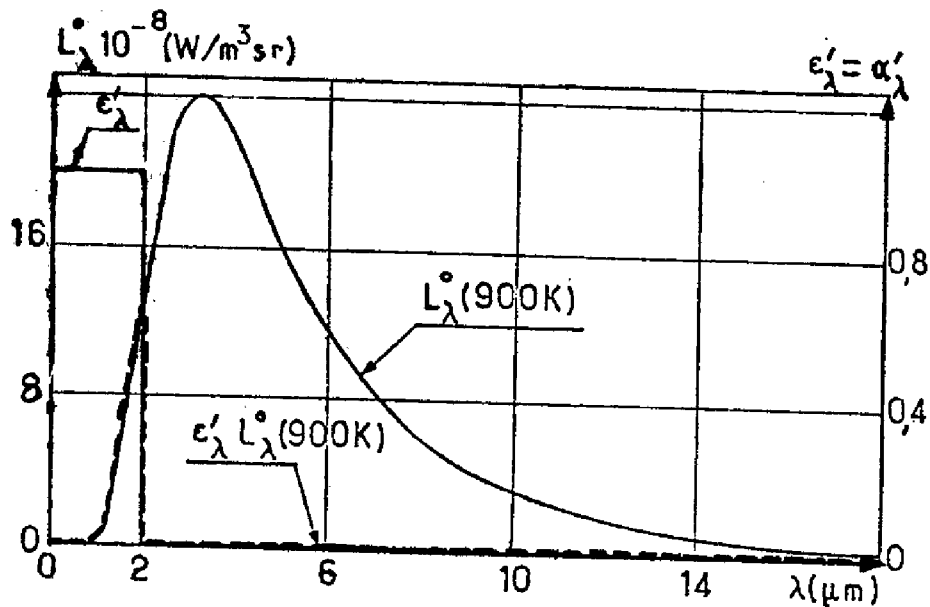
## II.4. AMÉLIORATION DU RENDEMENTS DES CAPTEURS

L'augmentation du rendement de collection va bien évidemment passer par une diminution des pertes énergétiques.

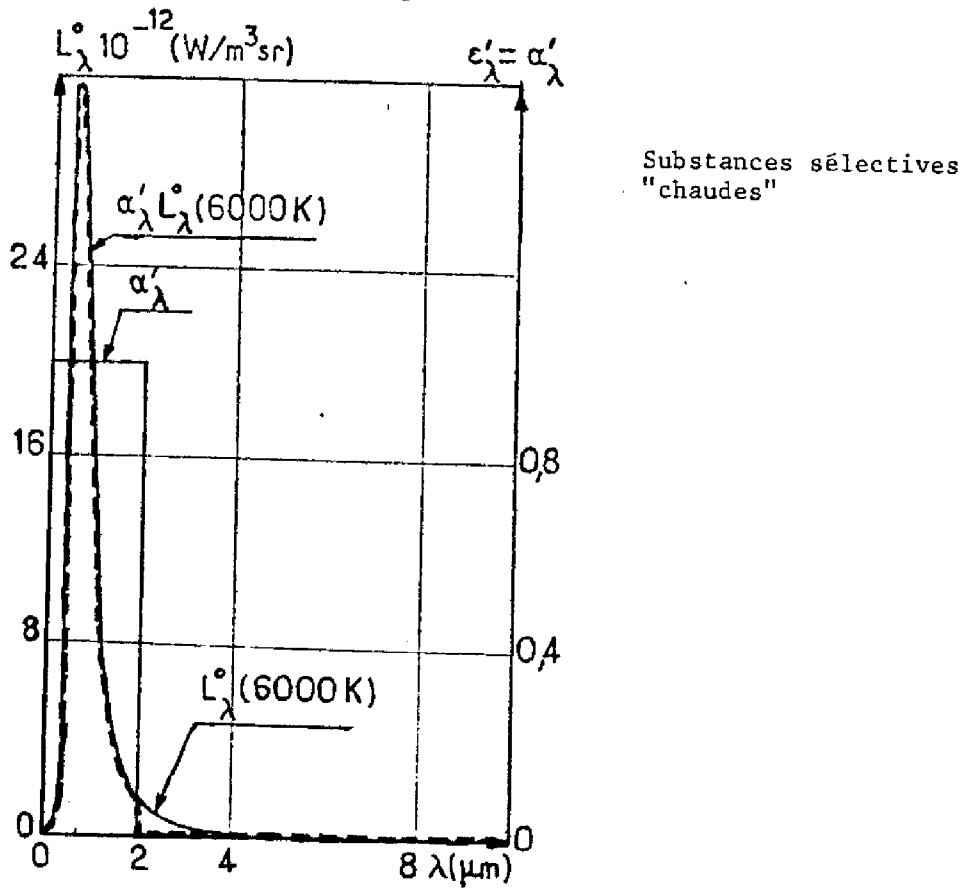
### II.4.1. Diminution des pertes par rayonnement thermique

Celle-ci pourra passer par l'utilisation :

- De plusieurs vitrages superposés qui permettront de re-rayonner sur l'absorbeur une plus grande partie de l'énergie émise par ce dernier. On est toutefois limité par les effets de l'absorption dans le verre.
- De vitrages sélectifs qui auront la propriété de réfléchir l'énergie rayonnée par le corps noir.
- De surfaces collectrices sélectives telles que leur facteur d'absorption soit pratiquement égal à 1 pour le rayonnement solaire ; leur émissivité étant la plus faible possible dans le domaine de l'infrarouge.



- Figure 27 -



- Figure 28 -

#### II.4.2. Diminution des pertes par conduction et convection

Celle-ci pourra passer par l'utilisation :

- de plusieurs vitrages qui permettront de limiter les pertes par convection vers l'extérieur. En général, on se limite à deux vitrages pour ne pas diminuer de façon trop importante le coefficient de transmission ;
- D'un isolant arrière (derrière l'absorbeur) pour limiter les pertes par conduction vers l'extérieur.

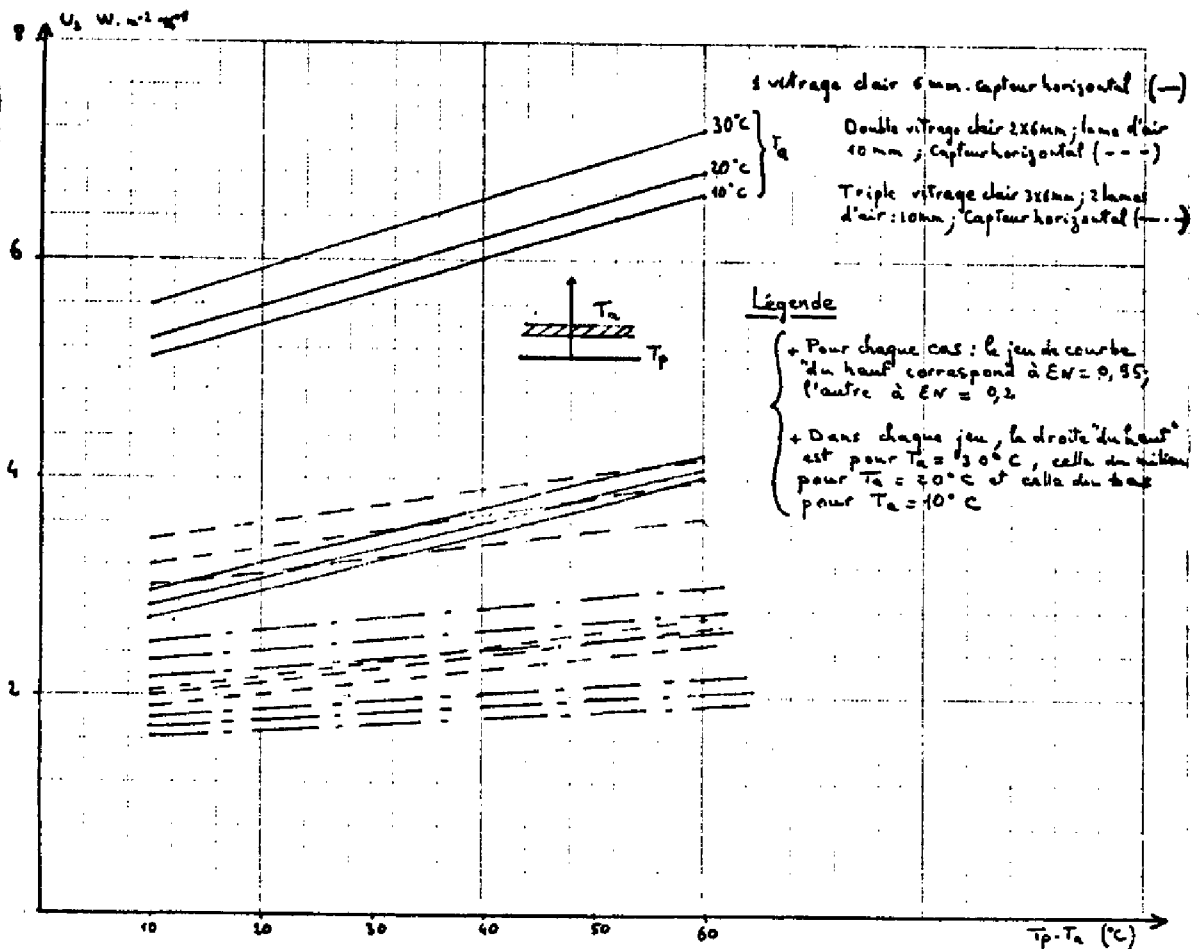
#### II.4.3. Coefficient global des pertes énergétiques : $U_L$

Nous décomposerons ce coefficient en deux termes :

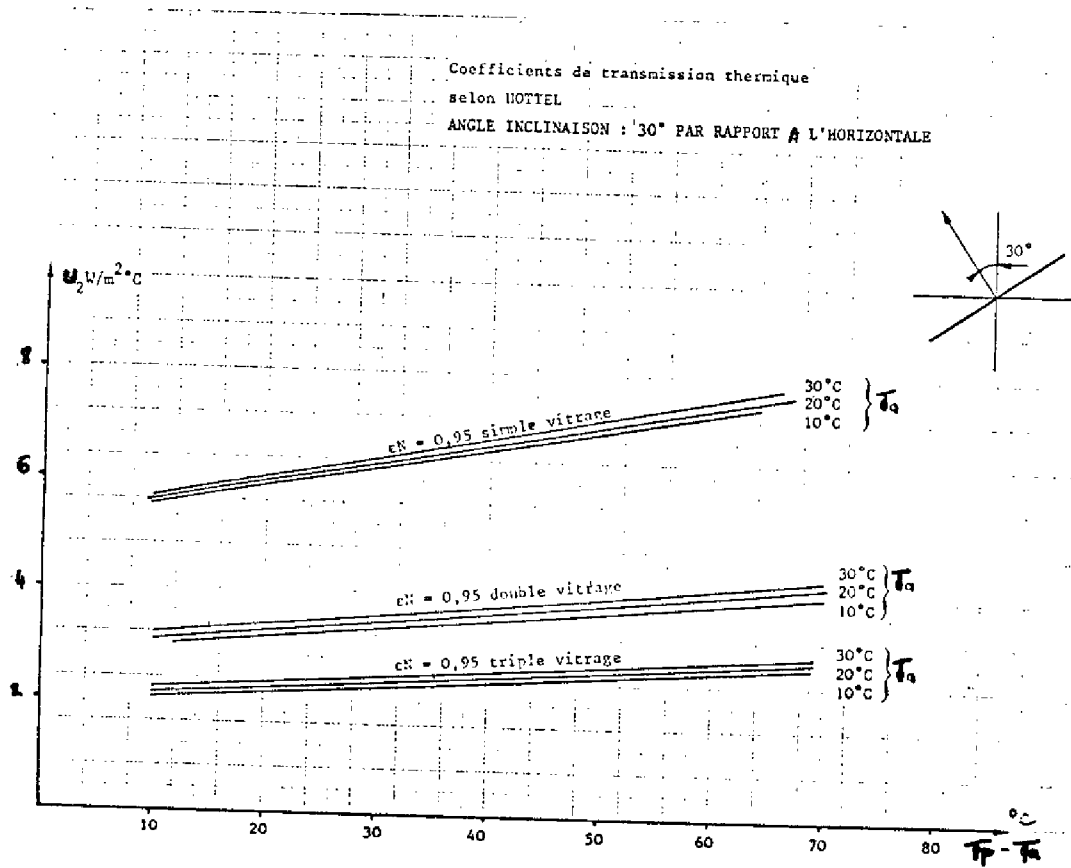
-  $U_1$  : Coefficient de transmission thermique global en partie inférieure (conduction à travers l'isolant + échanges superficiels par convection et rayonnement à l'extérieur).

-  $U_2$  : Coefficient de transmission thermique global en partie supérieure (conduction au travers de la lame d'air et du double vitrage (par exemple) + échanges superficiels par convection et rayonnement intérieur et extérieur).

Nous ne donnerons pas ici le détail du calcul de ces coefficients, nous bornant à donner comme référence le document [4] dans lequel au moyen des règles DTU on arrive aux figures données comme illustration :



- Figure 29 -



- Figure 30 -

## II.5. UTILISATION

Jusqu'ici le collecteur-plan n'apparaît que comme un "piège à énergie thermique". Son côté utilitaire sera l'utilisation de cette énergie thermique collectée pour diverses applications domestiques. Il faut donc récupérer d'une manière ou d'une autre cette énergie. On pense alors qu'il faudra prévoir lors de l'élaboration du collecteur la circulation d'un fluide caloporteur qui, "froid", à l'entrée du collecteur en sortira chauffé.

### II.5.1. Utilisation d'un fluide caloporteur

Le développement suivant effectué au sujet du collecteur-plan reste valable en ce qui concerne les collecteurs à concentration.



Comme nous voulons maintenant étudier les phénomènes thermiques liés à la récupération de cette énergie collectée par un fluide en mouvement, il nous faudra effectuer une étude plus détaillée de l'ensemble des phénomènes.

Il nous faudra donc considérer plus précisément les lois physiques régissant les échanges thermiques par rayonnement, convection et conduction mais, il nous faudra également, du fait de l'existence évidente d'un gradient de température dans le corps noir et du fait de l'existence de tuyaux positionnés en des endroits déterminés pour la circulation du fluide, associer au collecteur plan un repère orthonormé  $(x, y)$  et introduire ainsi des notions de localisation et de non uniformité des phénomènes thermiques.

Il apparaîtra lors de cette étude l'intérêt lié à l'utilisation de certains termes tels que :

- $\left. \begin{array}{l} F \\ F' \\ F_c \\ F_r \end{array} \right\}$  , facteurs prenant en compte les caractéristiques géométriques du collecteur plan.
- $U_1$  , conductance globale des pertes énergétiques ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ).

### II.5.2. Equations régissant le transfert au fluide [5] , [6]

On définit la conductance globale des pertes énergétiques du collecteur sans regarder le transfert au fluide.

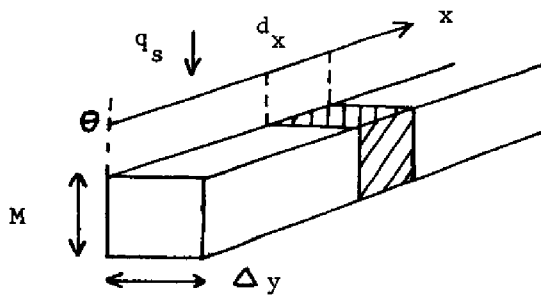
$$\left( \begin{array}{l} \text{pour corps noir} \\ + \text{glaces.} \end{array} \right) U_L = \frac{Q_T + Q_B + Q_E}{A (T_{pmoy} - T_A)} \quad (13) \quad \begin{array}{l} \text{fait intervenir les phénomènes} \\ \text{de convection et conduction.} \end{array}$$

avec  $Q_T = Q_R +$  pertes de convection = Energie perdue par radiation et du fond noir et convection par l'absorbeur vers vitrage.

$Q_B$  = Energie perdue par mauvaise isolation (par-dessous)

$Q_E = Q'_R$  = Energie perdue par effet de bord.

1)  $T_p(x)$  et  $q_u(x)$  pour un corps noir directement exposé au soleil



Longueur du collecteur  
= L

- Figure 31 -

$A_f$  = Aire de la section =  $M \Delta y$

On a également :  $q_u = q_u(x)$

Au point x, on a :

$$q_{u-x} = q_s - \epsilon R' - U_L (T_p - T_a) \quad (14)$$

Densité de puissance absorbée par corps en un point x ( $W. m^{-2}$ )	pertes par radiation	$T_p$ t° plaque (°F) pertes par conduction et convec- tion	$T_a$ T° atmosphère
--	-------------------------	--	------------------------

Avec

$R' =$  Energie moyenne rayonnée =  $T_a^4 \cdot \sigma$  -  $A'$   
 ( $W. m^{-2}$ ) Energie rayonnée Intensité de la radiation atmosphérique sur une surface horizontale.

$\epsilon =$  Coefficient d'émissivité du corps.

$U_L = \epsilon h_r + h_a$

D'après les calculs que nous avons développés dans l'annexe 1, nous aurons :

$$T_p(x) = T_t \left( \frac{chbx}{chbL} \right) + \left( T_a + \frac{q_s - \epsilon R'}{U_L} \right) \left( 1 - \frac{chbx}{chbL} \right) \quad (15)$$

De même, la quantité moyenne de puissance récupérée par le corps sera :

$$q_u = \frac{thbL}{bL} \left[ q_s - \sum R' - U_L (T_t - T_a) \right] \quad (16)$$

Nous définirons donc l'efficacité de collection du corps par :

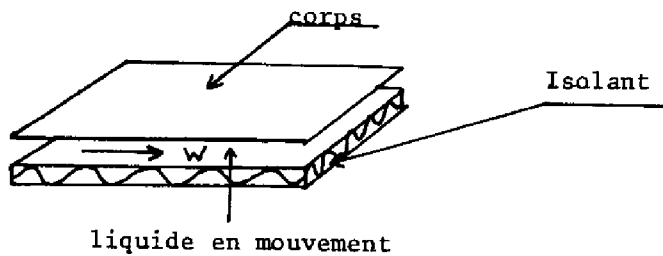
$$F = \frac{thbL}{bL} \quad (17)$$

## 2) Le fluide circule sous le corps

Le fluide est donc à la température ( $T_w$ ) qui est une fonction de  $x$  :  $T_w(x)$

On peut de nouveau écrire :  $q_{u-x} = q_s - \sum R' - U_L (T_p - T_a)$

Mais le nouveau  $U_L = \sum h_r + h_a + U_B$  (Pertes par le dessous du collecteur, introduit la notion d'isolation.)



- Figure 32 -

$q_{u-x} = h_c (T_p - T_w)$  = Quantité de puissance / unité de surface prise par le liquide circulant entre le corps et l'isolant.

$h_c$  = Coef. de convection corps liquide  
( $W. m^{-2}. K^{-1}$ )

En éliminant  $T_p$  des 2 expressions précédentes, on arrive à :

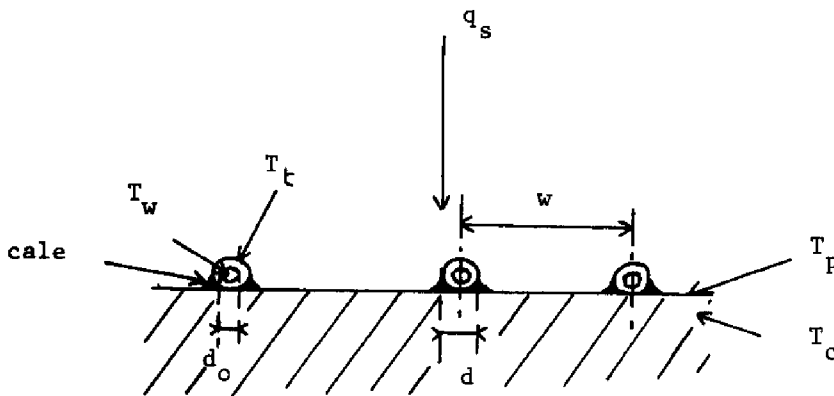
$$q_{u.x} = \frac{h_c}{h_c + U_L} \left[ q_s - \sum R' - U_L (T_w - T_a) \right] \quad (18)$$

$$q_{um} = \frac{1}{L} \int_0^L q_{u,x} dx = \frac{h_c}{h_c + U_L} \left[ q_s - \varepsilon R' - U_L \left( \int_0^L \frac{T_w}{L} dx - T_a \right) \right]$$

$$q_{um} = \frac{h_c}{h_c + U_L} \left[ q_s - \varepsilon R' - U_L (T_w \text{ moyen} - T_a) \right] \quad (19)$$

$$F' = \text{Facteur d'efficacité de collecteur global} = \frac{h_c}{h_c + U_L} \quad (20)$$

3) Cas où on utilise des tubes posés sur le corps pour faire circuler le fluide :



- Figure 33 -

Les tubes étant exposés à la radiation incidente captent une certaine quantité de chaleur. La quantité de chaleur transmise au fluide sera donc la somme de la puissance recueillie par le corps et cédée au fluide,  $q_{u\text{-plaque}}$ , et de la quantité de puissance recueillie par les tubes et cédée au fluide  $q_{u\text{-tube}}$ .

$$q_{u\text{-tube}} = \frac{d}{w} q_s - \varepsilon R' - U_L (T_t - T_a) \quad (21)$$

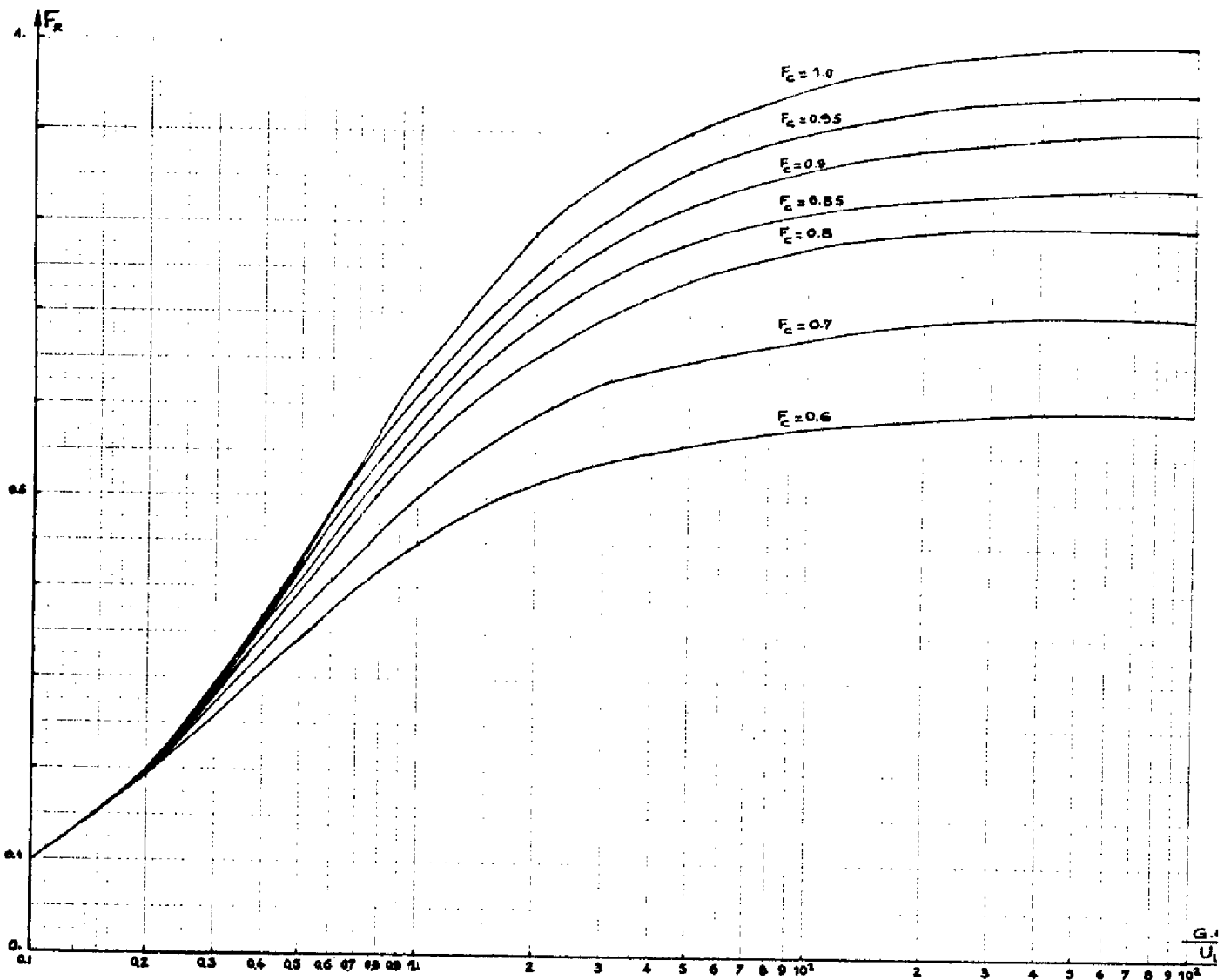
$$q_{u\text{-plaque}} = \left(1 - \frac{d}{w}\right) F' (q_s - \varepsilon R' - U_L (T_c - T_a)) \quad (22)$$

En nous reportant à l'annexe 2, nous voyons que nous pouvons définir comme nouveaux facteurs d'efficacité  $F_c$  mais surtout  $F_R$  qui est égal à :

$$F_R = \frac{G C}{U_L} \left( 1 - e^{-\frac{F_c U_L}{G C}} \right) \quad (23)$$

$F_R$  sera tel que nous pourrions alors exprimer  $q_{um}$  sous la forme :

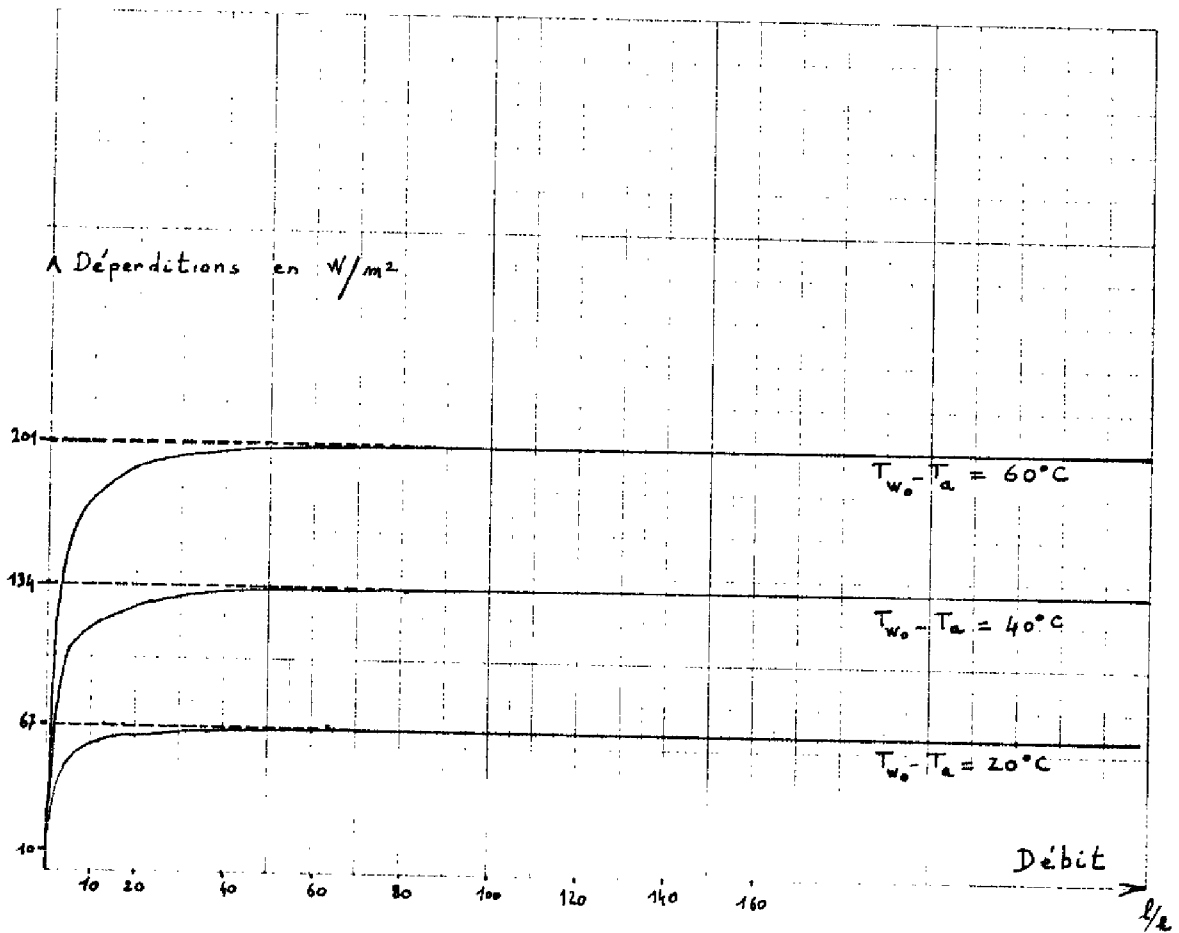
$$q_{um} = F_R \left[ q_s - \varepsilon R' - U_L (T_{wo} - T_a) \right] \quad (24)$$



- Figure 34 -

Depuis l'équation de  $q_{um}$ , nous pouvons tracer la courbe des déperditions ( $w/m^2$ ) dues aux phénomènes de convection et conduction pour différentes valeurs de  $(T_{wo} - T_a)$  ;

$$D = F_R U_L (T_{wo} - T_a) \quad (25)$$

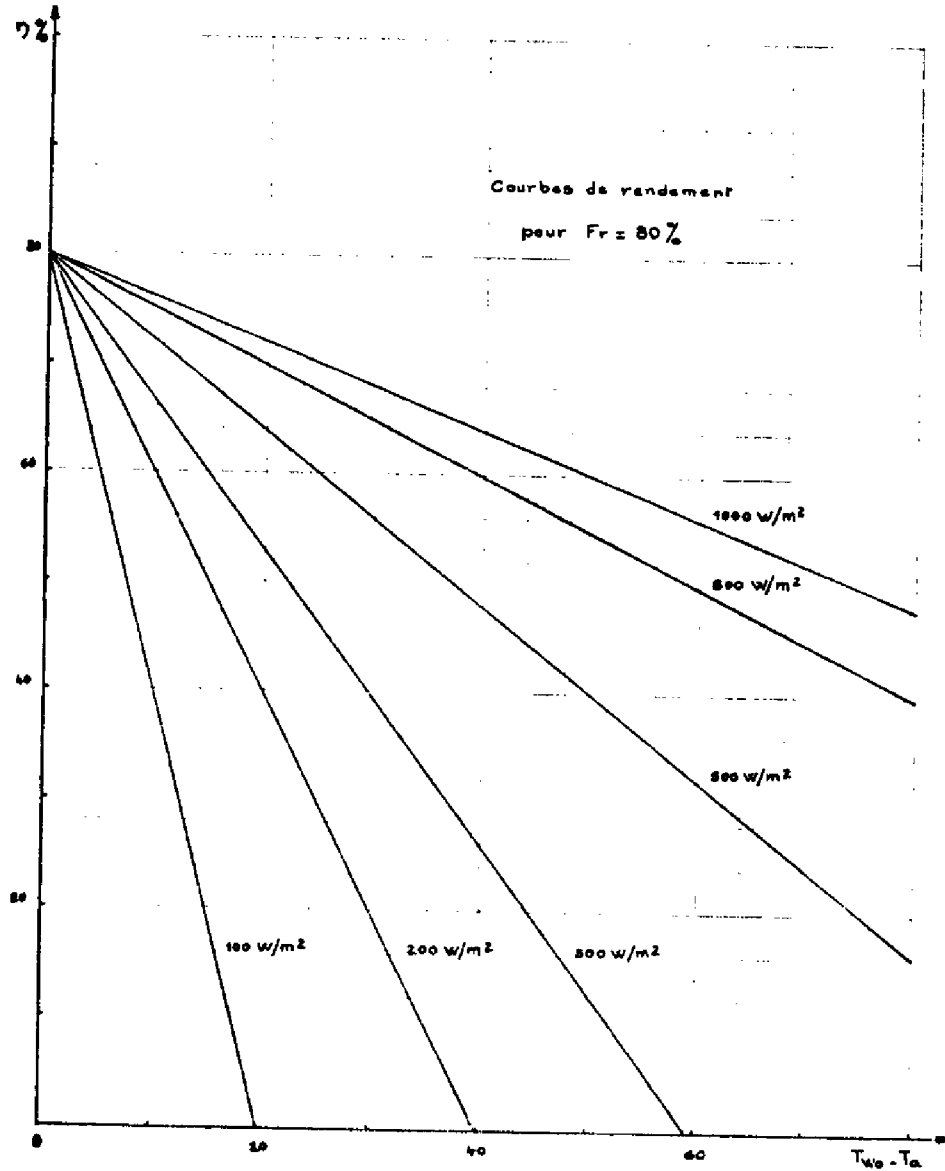


- Figure 35 -

Pour terminer par une illustration cette approche du collecteur plan, nous allons présenter à titre indicatif des courbes donnant le rendement énergétique du capteur en fonction de  $(T_{wo} - T_a)$  pour différentes valeurs du rayonnement solaire incident.

En négligeant les pertes par rayonnement, on aura :

$$\eta = \frac{F_R (q_s - U_L (T_{wo} - T_a))}{q_s} = F_R - F_R \frac{U_L}{q_s} (T_{wo} - T_a) \quad (26)$$



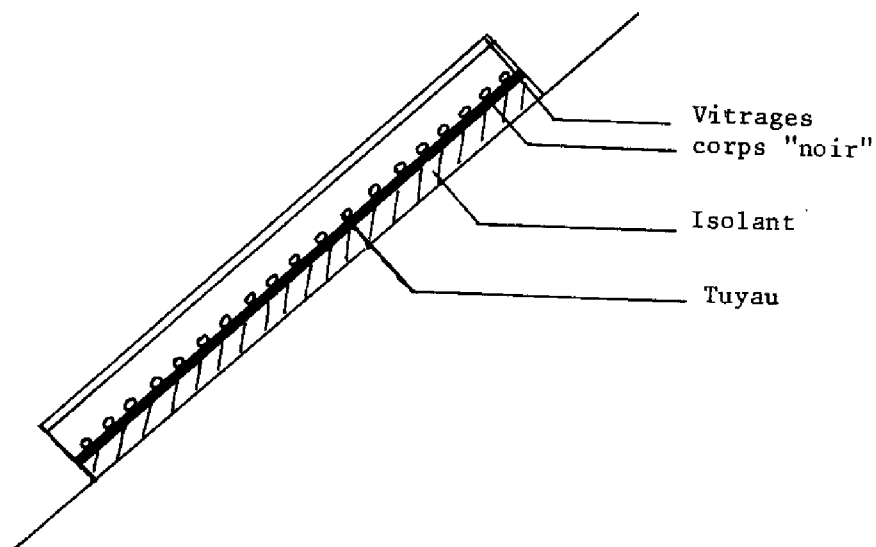
- Figure 36 -

Le rendement du capteur étant décroissant avec  $\Delta T = (T_{wo} - T_a)$ , nous voyons donc qu'il sera peu intéressant du fait de rendements faibles d'associer un capteur avec un cycle thermodynamique. C'est pour cette raison

que certains systèmes, tel celui utilisant du Fréon et fonctionnant pour un faible gradient de température, ne pourront donner qu'un rendement global faible.

## II.6. PARAMÈTRES SPÉCIFIQUES DU COLLECTEUR PLAN [7]

D'un point de vue technologique, le collecteur plan apparaît donc constitué de quatre parties : les vitrages, les conduits, l'absorbeur et un système d'isolation arrière pour limiter les pertes.



- Figure 37 -

A chacune de ces parties, nous pourrions associer des paramètres de base, l'ensemble de ces paramètres permettant de spécifier le capteur.

### Paramètres spécifiques du capteur

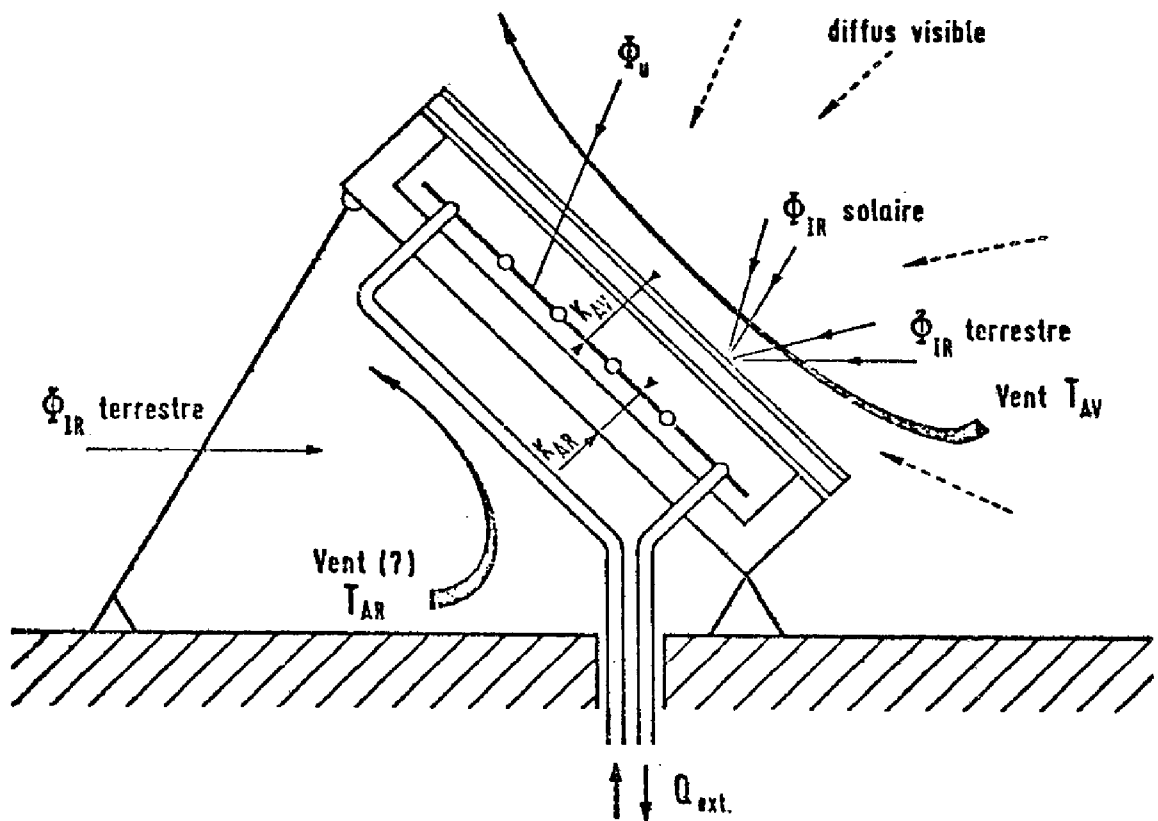
- Nombre de vitres
- Indice et épaisseur du verre
- Emissivité des vitres
- Epaisseur des lames d'air



- Pression dans le capteur
- Coefficient d'absorption de l'absorbeur ( $\alpha$ )
- Coefficient d'émissivité de l'absorbeur ( $\varepsilon$ )
- Rendement d'irrigation (F)
- Conductance pertes arrières ( $K_{ar}$ )

Maintenant que le capteur est caractérisé par un ensemble de paramètres, il va falloir que nous prenions en compte tout d'abord l'environnement du capteur qui aura une influence importante sur ces performances puis son utilisation :

En ce qui concerne son environnement, si de manière générale nous avons un capteur tel que :



- Figure 38 - Capteur dans son environnement.

Nous introduirons pour caractériser l'environnement les paramètres suivants :

Paramètres spécifiques de l'environnement

- Flux incident ( $\lambda < 2,7 \mu\text{m}$ ) ( $\phi_u$ )
- Flux incident ( $\lambda > 2,7 \mu\text{m}$ ) ( $\phi_{1R}$ )
- Vitesse du vent (V)
- Température avant (Tav)
- Température arrière (Tar)
- Angle d'incidence du rayonnement solaire.

Selon l'utilisation envisagée, notre collecteur devra répondre à certaines spécifications supplémentaires ; ces paramètres spécifiques d'utilisation pouvant être :

Paramètres spécifiques de l'utilisation

- Inclinaison du capteur
- Débit du caloporteur
- Température d'entrée du caloporteur.

Dans l'annexe 3 sont présentées des courbes de caractéristique physique et d'utilisation thermodynamique de capteurs plans spéciaux pour lesquels sont envisagés une variation du nombre de vitres, un revêtement sélectif et une vitre sélective.

Des équations précédemment établies, il apparaît que le collecteur peut être modélisé sous une forme matricielle telle :

$$\begin{bmatrix} q_{um} \\ T_{w_{x=L}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q_s \\ (T_{wo} - T_a) \\ 1 \end{bmatrix}$$

avec

$$M = \begin{bmatrix} F_R & -F_R U_L & -R' \\ \frac{\alpha \tau F_R}{GC} ; \exp \frac{F' U_L}{GC} & & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Les températures atteintes par le collecteur plan en limitent l'usage à des applications basse température, parmi lesquelles nous citerons :

- chauffage de l'eau sanitaire
- chauffage de l'habitat
- climatisation
- pompes solaires

## II.7. APPLICATIONS

### II.7.1. Installation interne

Dans les pages précédentes ont été faites successivement une étude optique et thermique du collecteur puis une étude sur le transfert de la quantité de chaleur transmise à un fluide.

Il faut maintenant s'intéresser à l'utilisation de ce fluide caloporteur et aux usages domestiques que l'on peut tirer de son apport de chaleur.

Avant toute chose, il faut définir le modèle physique étudié.

Celui-ci est constitué :

- D' 1 collecteur dans lequel on fait circuler un fluide
- D' 1 réservoir de stockage isotherme dans lequel s'effectue l'échange thermique entre le liquide circulant dans le collecteur et celui qui sert aux usages internes proprement dit.

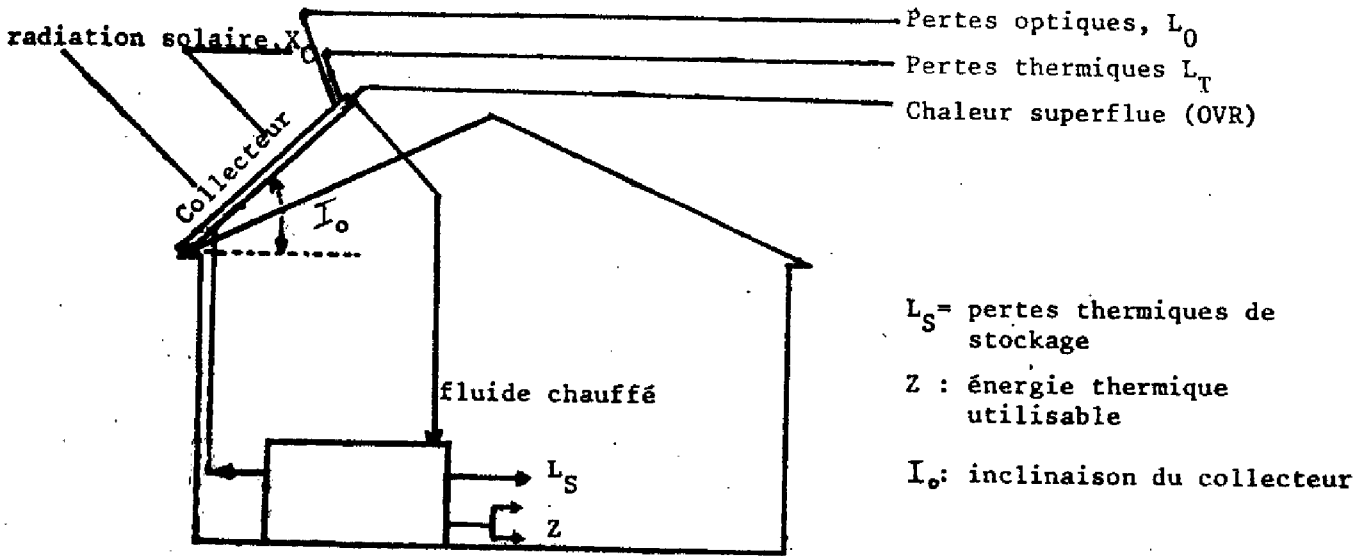
Schémas 2 et 3  
page 49.

- D' 1 2ème échangeur thermique directement à l'air dans lequel circule le 2ème liquide (radiateur de chauffage central). Circuit fermé.
- D' 1 bassin permettant de stocker le liquide "interne" chauffé circuit ouvert. (utilisation pour eau chaude)

Equilibre thermique entre collecteur et réservoir :

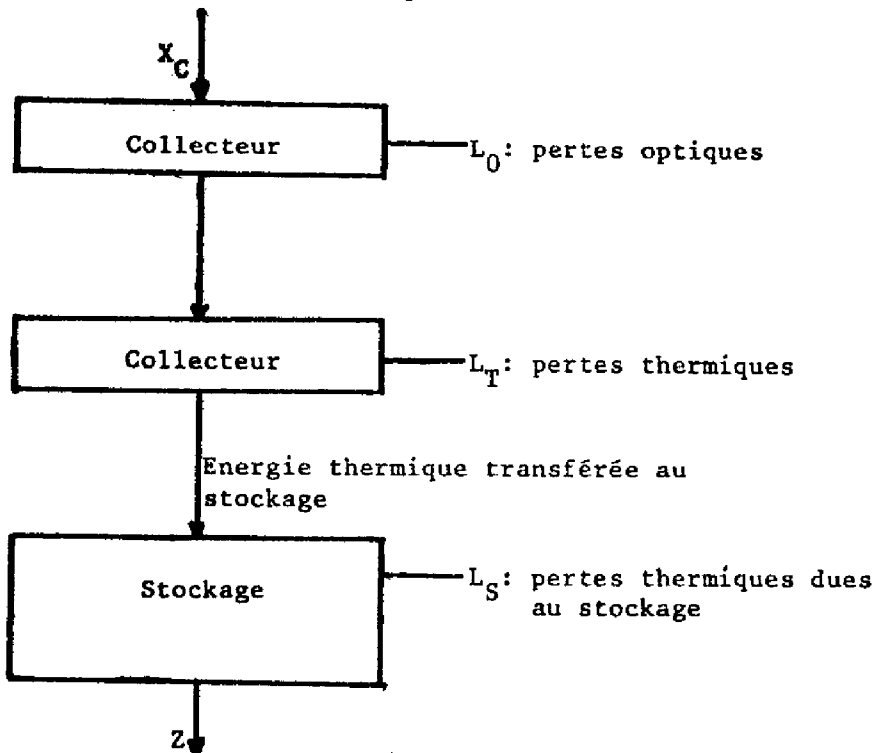
La puissance absorbée par le collecteur  $q_u$

est égale à la somme {  
 - de la puissance stockée dans le réservoir  
 - des pertes à travers le récipient et les tubes  
 de la circulation.



- Figure 39 -

Sous forme de schéma-bloc, nous pourrions représenter les pertes successives depuis la collection jusqu'à l'utilisation de la chaleur "solaire" dans l'habitat par :



- Figure 40 -

Par la suite, nous travaillerons sur les schémas de principe suivants : [ 8 ]

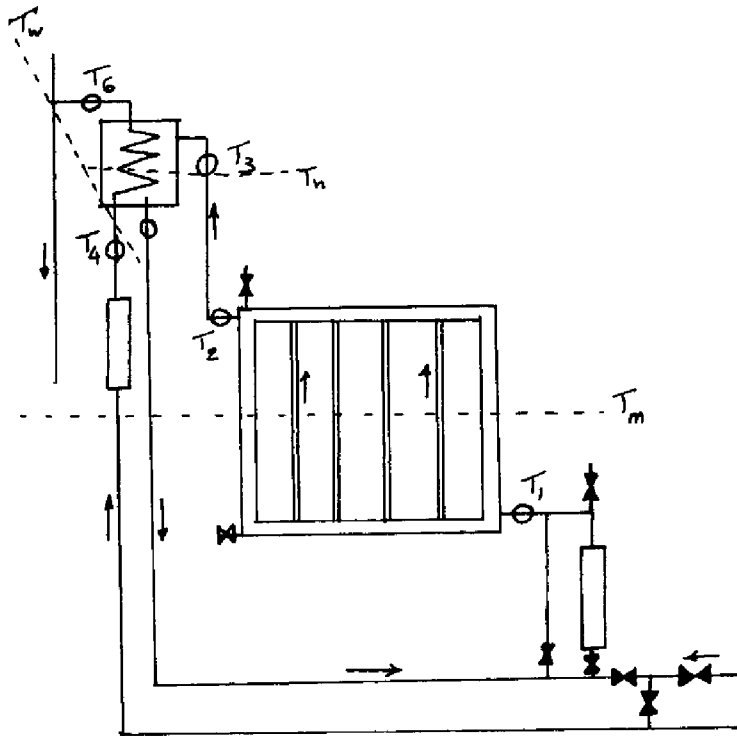


Schéma 1

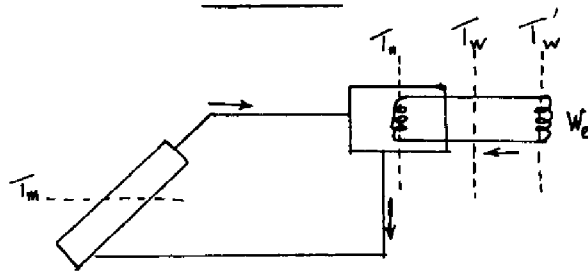


Schéma 2

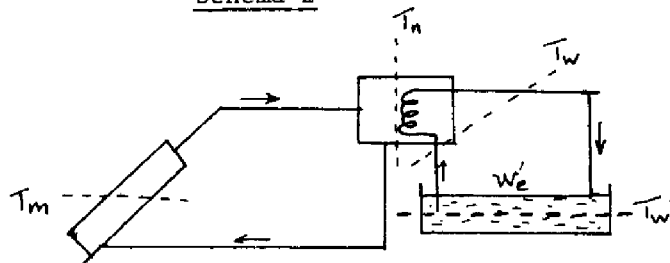


Schéma 3

$$q_{um} = G C_p (T_3 - T_5) + W_e \left( \frac{dT_e}{dt} \right) + W_p \left( \frac{dT_f}{dt} \right) + U_p (T_p - T_a) \quad (28)$$

Avec :

$q_{um}$  = Puissance transférée au fluide kcal/s. (moyenne spatiale)

$G$  = Débit de l'eau dans le réservoir (kg/s).

$C_p$  = Chaleur spécifique de l'eau (kcal/kg °C).

$W_e$  = Capacité calorifique du collecteur (eau et parties métalliques) (kcal/°C).

$T_e$  = Température moyenne des parties métalliques du collecteur (°C).

$W_p$  = Capacité calorifique de l'ensemble des tubes de sortie et de retour du collecteur (kcal/°C).

$T_f$  = Température moyenne de l'ensemble des tubes de sortie et de retour du collecteur (°C).

$U_p$  = Coefficient de transfert de chaleur des tubes de sortie et de retour du collecteur (kcal/s°C).

$T_p$  = Température moyenne de l'ensemble de l'eau des tubes de la sortie et de retour du collecteur (°C).

$GC_p (T_3 - T_5)$  = Quantité de puissance pénétrant dans le réservoir (kcal/s).

$W_e \left( \frac{dT_e}{dt} \right)$  = Pertes calorifiques au niveau du collecteur /s ( " ).

$W_p \left( \frac{dT_f}{dt} \right)$  = " " " " de la tuyauterie /s. ( " ).

$U_p (T_p - T_a)$  = Pertes par conduction et convection pour les tubes /s. (k cal/s).

A son tour, cette quantité de puissance qui pénètre dans le récipient peut être exprimée en fonction des pertes de chaleur du récipient grâce à la relation d'équilibre thermique :

$$GC_p (T_3 - T_5) = U_T (T_4 - T_a) + gC_p (T_6 - T_4) + W_t \left( \frac{dT_t}{dt} \right) + W_e \left( \frac{dT_w}{dt} \right) + W_w \left( \frac{dT_4}{dt} \right)$$

(29)

Avec :

$U_T$  = Coefficient de transfert de chaleur du récipient (kcal/°C).

$T_4$  = Température moyenne de l'eau du récipient (°C).

$g$  = Débit de l'eau dans l'échangeur (kg/s).

$W_T$  = Capacité calorifique des parties métalliques du récipient (kcal/°C).

$T_c$  = Température moyenne des parties métalliques du récipient (°C).

$W_w$  = Capacité calorifique de l'eau du récipient (kcal/°C).

$T_w$  = Température moyenne de l'eau de l'échangeur et des parties métalliques de l'échangeur.

$U_T(T_4 - T_a)$  = Pertes par conduction et convection dans le récipient (kcal/s).

$gC_p(T_6 - T_4)$  = Puissance prise par le fluide "interne". ( " ).

$W_T \left( \frac{dT}{dt} \right)_T$  = Pertes au niveau des parties métalliques du fluide "interne" (kcal/s).

$W_w \left( \frac{dT}{dt} \right)_4$  = " " " du fluide "interne" (kcal/s).

$W_e \left( \frac{dT}{dt} \right)_w$  = " " " de la tuyauterie "interne" (kcal/s).

La puissance calorifique transférée par l'échangeur est donc :

$$gC_p (T_6 - T_4) + W_e \frac{dT_w}{dt} = U_K \cdot \Delta T \quad (30)$$

$U_K$  = Coefficient de transfert de chaleur eau-échangeur du récipient en

(kcal/s°C)

$\Delta T$  = Différence de  $t^\circ$  logarithmique.

En première approximation, on admet que :

$$T_c = T_m$$

(  $t$  moyenne de l'eau du collecteur =  $T_m$  )

$$+ T_t = T_m$$

$$+ T_f = T_p$$

$$\Delta T = \phi (T_m - T_w)$$

Ceci étant justifié par la configuration de l'échangeur où  $\phi$  est un facteur à calculer.

Si, en plus, on considère que :

$$W_T + W_w + W_c + W_p = W_o = \sum \text{capacités thermiques.}$$

$$F' A_c U + U_p + U_t = U_o \quad \text{avec } F_a = F' A_c$$

$A_c$  = Aire collecteur

$U$  = Coefficient global de transfert de chaleur du collecteur  $k \text{ cal/m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ .

On arrive après quelques calculs à :

$$W_o \frac{dT_m}{dt} + U_K \phi (T_m - T_w) + U_o (T_m - T_a) \quad (31)$$

$$= F_a \left[ \alpha \tau + \tau (1 - \tau) (1 - \alpha) \right] q_s \neq F_a \cdot \alpha \cdot \tau \cdot q_s \quad (32)$$

$$W_e \frac{dT_w}{dt} - U_K \phi (T_m - T_w) + gC_p (T_6 - T_4) = 0 \quad (33)$$

A la suite, nous distinguerons 2 cas : Ceux représentés sur les schémas 1 et 2 de la figure 45.

1) On introduit dans  $T'_w = T^\circ$  moyenne de l'eau de l'échangeur "interne", et des parties métalliques de celui-ci ( $^\circ\text{C}$ ).

$$\text{On suppose que } T'_w = \frac{T_6 + T_4}{2}$$

Si on opère comme précédemment (équations d'équilibre thermique), on arrive à :

$$W'_e \frac{dT'_w}{dt} + W_e \frac{dT_w}{dt} - U_K \phi (T_m - T_w) + U'_e (T'_w - T_a) = 0 \quad (34)$$



$W'_e$  = Capacité calorique de l'eau et des parties métalliques de l'échangeur "interne" (pertes échangeur "interne").

$W_e \frac{dT_w}{dt}$  = pertes tuyauterie "interne".

$U_K \phi (T_m - T_w)$  = Quantité de chaleur amenée par l'échangeur

$U'_e$  = Coefficient de transfert de chaleur du 2e échangeur

$U'_e (T'_w - T_a)$  = Pertes par conduction et convection au niveau du 2ème échangeur.

puisque  $T_w = T'_w$  et  $\frac{dT_w}{dt} = \frac{dT'_w}{dt}$

$$(W_e + W'_e) \cdot \frac{dT_w}{dt} - U_K \phi (T_m - T_w) + U'_e (T_w - T_a) = 0 \quad (35)$$

2) Les conditions extrêmes du 2e cas sont :

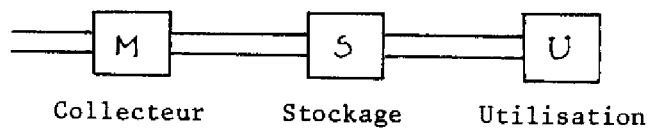
a) La capacité du bassin est grande  $\Rightarrow W'_e \rightarrow M$  (grand)  
et en même temps  $\frac{dT'_w}{dt} \rightarrow \Sigma$  (petit)

b) La capacité du bassin est petite  $\Rightarrow W'_e \rightarrow e$  (petit)  
et  $\frac{dT'_w}{dt} \rightarrow M$  (grand)

Si  $T'_w = T_w$ , on retrouve l'équation du 1/.

La résolution (relativement longue) de cette équation différentielle dans certains cas particuliers ( $T_a(t)$  peut être choisie de formes différentes,  $q_s(t)$  aussi ...) permet d'obtenir  $T_m$  et  $T_w$ . 9

On pourrait également envisager ici un formalisme matriciel tel celui qui a été développé précédemment :



- Figure 42 -

La matrice S pouvant être de la forme :

$$T_5 = \begin{bmatrix} 1 \\ GC \end{bmatrix} \cdot \left( W_e \frac{dT_e}{dt} + W_p \frac{dT_f}{dt} + U_p (T_p - T_a) \right) \cdot \begin{bmatrix} q_{um} \\ T_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

### II.7.2. Introduction des notions de coût et de système auxiliaire

Nous venons de développer l'application la plus souvent envisagée lorsqu'on désire utiliser l'effet de serre au niveau de l'habitat. Ceci revient à installer sur une maison de type courant une batterie de capteurs plans avec un système de stockage de l'énergie thermique, un système de redistribution de la chaleur et une source d'énergie auxiliaire.

On peut alors comparer les coûts et les performances d'un tel système de chauffage à ceux d'un système ne fonctionnant qu'avec une énergie traditionnelle dans les mêmes conditions.

On pourrait également préconiser une "architecture solaire" qui ferait du bâtiment lui-même un capteur d'énergie solaire.

Si nous nous intéressons au système précédemment étudié, nous pourrions dire que, traditionnellement, on considère le bâtiment à chauffer comme une donnée, la conception du système de chauffage venant après la conception du bâtiment, dans l'optique architecturale qui prévaut actuellement.

On pourrait par la méthode des degrés-jour, déduire les quantités de chaleur nécessaires chaque année pour maintenir la température intérieure désirée. [10]

Si nous avons :

+ G = Puissance (en W) des déperditions thermiques du bâtiment pour  $1 \text{ m}^3$  et par °C de gradient entre la température extérieure et la température intérieure désirée.

+ V = Volume du bâtiment

+ D = Nombre de degrés-jour pour toute l'année : Somme sur l'année des différences journalières entre la température intérieure désirée et la température extérieure (lorsque cette différence est positive, car nous ne prenons pas en compte ici le problème de la climatisation des locaux).

+ h = Durée journalière de chauffage.

+  $Q_{HT}$  = La quantité de chaleur nécessaire pour compenser les déperditions thermiques sur une période de chauffage est égale à :

$$Q_{HT} = h G V D$$

Pour avoir une idée précise du coût global de l'installation, il faudra prendre en compte le fait que les dépenses futures ne revêtent pas la même valeur que les dépenses immédiates (investissements). Ce phénomène est décrit par la méthode de l'actualisation qui a affecté les dépenses futures d'un coefficient minorant (Annexe 4).

En faisant la somme des investissements et des dépenses annuelles actualisées, on aura donc le coût global actualisé  $C_{ga}$  du système pour un service donné (fourniture d'une certaine quantité de chaleur) sur toute sa durée de vie :

$$C_{ga} = I + \sum_{n=1}^t \frac{1}{(1+i)^n} (C_{En} + C_{Fn}) \quad (37)$$

avec  $C_{En}$  = frais d'entretien à l'année n (en francs constants)

$C_{Fn}$  = frais de fonctionnement à l'année n (en francs constants)

Si on suppose que ces frais sont constants chaque année :

$$C_{ga} = I + (C_E + C_F) \sum_{n=1}^t \frac{1}{(1+i)^n} \quad (38)$$

#### Choix du taux d'actualisation :

Le problème que nous allons poser maintenant est celui du choix du taux d'actualisation, en particulier lorsque le décideur est un décideur privé (le propriétaire de la maison en l'occurrence). Or le choix de ce taux n'est pas neutre face au choix des technologies. En effet, le choix d'un taux élevé aura tendance à "effacer" rapidement les dépenses futures et les solutions à investissement faible et frais de fonctionnement élevé (mais "futurs") seront alors favorisées.

Inversement, un taux faible gardera leur relief aux dépenses futures et avantagera les solutions à fort investissement et à frais de fonctionnement faible. Nous nous bornerons ici à exposer deux positions extrêmes.

- La première position consisterait à se placer dans une optique nationale en adoptant les critères nationaux pour le choix et l'évaluation des investissements. Le taux d'actualisation utilisé par les entreprises publiques en France est d'environ 10 %.

- La seconde optique consisterait à rechercher le taux d'actualisation réel de la catégorie de décideurs qui nous intéresse (ici notamment les particuliers faisant construire une maison). Ce taux pourrait alors être reflété par le coût d'opportunité du capital pour un décideur "type". Des études menées dans ce sens aux Etats-Unis par R.T. Ruegg montre que le taux d'actualisation  $r$  serait alors beaucoup plus bas, de l'ordre de 1 à 2 %.

Dans le cas de constructions classiques avec capteurs solaires, nous allons nous trouver devant un problème d'arbitrage entre un investissement (l'installation de capteurs) et des économies futures d'énergie et va donc se poser le problème du niveau optimum de l'investissement.

#### II.7.2.1. Détermination des différentes fonctions de coût [11]

Pour cela on va utiliser le schéma 3.

- Pour le 1) : l'échangeur interne n'est jamais qu'un radiateur du type chauffage central. Ce radiateur pourra aussi bien être utilisé pour le système à collecteur que pour le système auxiliaire. De celà, on peut déduire le coût du système "interne" de chauffage qui peut être inclus dans le coût global de construction de l'habitat puisqu'étant commun aux 2 systèmes.

- Il en est de même pour le 2) où le chauffe-eau est commun aux 2 systèmes.

Dans la suite de cette partie, on ne considérera donc que les coûts "propres" au système à collecteur et ceux associés au système de chauffage auxiliaire.

1) Coûts associés au système à collecteur :

- $C_{21}$  : Coût de construction et d'installation du collecteur (f)
  - $C_{22}$  : Coût du récipient. (f)
  - $C_{23}$  : Coût d'achat de la pompe externe (f)
  - $C_{24}$  : Coût de la tuyauterie du système externe (f)
  - $C_{25}$  : Coût de maintenance du système à collecteur (f)
- main-d'oeuvre et remplacement  $\left\{ \begin{array}{l} - \text{des pièces défectueuses} \\ - \text{fluide} \end{array} \right.$

2) Coûts liés au système auxiliaire :

- $C_{31}$  : Coût du fuel utilisé pour le système auxiliaire (f/th)
  - $C_{31}$  : Coût de construction et d'installation du système auxiliaire (f)
  - $C_{32}$  : Coût de maintenance du système auxiliaire (f)
- (voir au-dessus)

3) Simplifications :

Le but à atteindre est une optimisation du système ; c'est à dire que l'on va chercher pour une maison donnée ( $\Rightarrow$  cubage des pièces = cte), quelle sera l'aire du collecteur qui amènera au coût d'utilisation minimal.

$$C_u = \text{Coût d'utilisation} = \text{Coût de } \begin{cases} \text{Construction} \\ \text{Installation} \end{cases} + \text{Coût de fonctionnement.}$$

Nous ferons les hypothèses suivantes :

$C_{22}$  (récipient),  $C_{23}$  (pompe),  $C_{24}$  (tuyauterie) sont indépendants de A,  $C_{21}$  (construction et installation) et  $C_{25}$  (maintenance) sont proportionnels à A

$$C_{21} + C_{25} = (C_{21} + C_{25}) A$$

#### II.7.2.2. Recherche de l'investissement optimal pour le chauffage solaire. [11]

Ce système a pour but de diminuer le coût d'utilisation ; c'est à dire, qu'il faut faire un compromis entre l'aire du collecteur utilisé

(donc de son coût) et l'économie d'énergie qu'il permet sur le système auxiliaire. Dans une ère proche, on va utiliser un système à collecteur sans réservoir de stockage ; c'est à dire que l'on utilisera ce système au maximum pendant la période de collection mais que durant son non-fonctionnement, seul le système auxiliaire devra fournir la quantité de chaleur demandée (ex. : durant la nuit). On pourra donc monter un système "classique" comme si le système à collecteur n'existait pas puis le rajouter pour voir l'économie d'énergie faite par son inclusion.

Par unité de temps, on a donc :

$$C_u (A,t) = (C_{21}(t) + C_{25}(t) ) A + C_1 (t) (q_{HT}(t) - q_{HS}(t) ) f (q_{Hmax}) \quad (39)$$

$$C_1 (t) (q_{HT} (t) - q_{HS} (t) ) = \text{Coût de fuel utilisé.}$$

$$f (q_{H \max}) = \text{Coût} \begin{cases} \text{d'installation} \\ \text{de maintenance} \end{cases} \text{ du système auxiliaire}$$

$$q_{HT} (t) = \text{Quantité de chaleur demandée / unité de temps}$$

$$q_{HS} (t) = \text{" " " apportée par le système à collecteur / unité de temps.}$$

$$q_{HA} (t) = \text{Quantité de chaleur que doit fournir le système auxiliaire / unité de temps, pour que le système global fournisse } q_{HT} (t).$$

On aura donc :

$$q_{HA \max} = \text{Max}_{\text{sur intervalle du calcul : } T_o} (q_{HT} - q_{HS} ) \quad (40)$$

On voit tout de suite l'intérêt d'inclure un système de stockage de la chaleur apportée par le système à collecteur.

A ce niveau, le stockage sera considéré comme une boîte "noire" dont on peut à des moments choisis tirer une quantité de chaleur qui permettra d'obtenir pour  $q_{HS} (t)$  une courbe moins "accidentée" ; c'est à dire que le stockage permet, en ère proche, d'avoir pratiquement :

$$q_{HS} (t) = \text{Cte}$$

Ceci entraîne donc forcément une diminution dans les "dimensions" du système auxiliaire puisque maintenant, on a :

$$q'_{HA \max/T_0} < q_{HA \max/T_0}$$

par exemple durant la nuit, on n'a plus  $q_{Hs}(t) = 0 \Rightarrow q_{HT}(t) = q_{HA}(t)$  ;

$$\text{on a } q_{Hs}(t) = K \Rightarrow q_{HA}(t) = q_{HT}(t) - K$$

Bien entendu, lors de l'étude plus précise de ce système de stockage devra être posé le problème de savoir si les coûts qui lui sont associés sont inférieurs à ceux du système auxiliaire qu'il a remplacé.

On aura donc, par unité de temps :

$$C_u(A, t) = \left[ C_{21}(t) + C_{25}(t) \right] A + C_1(t) \left[ q_{HT}(t) - q_{Hs} \right] + f(q'_{HA \max}) + g(A) \quad (41)$$

$g(A)$  = Coûts du système de stockage.

$$\left. \begin{array}{l} f' = \text{Construction} \\ f'' = \text{Maintenance} \end{array} \right\} f = f' + f''$$

Nous allons d'autre part définir l'intervalle de calcul  $T$  comme un horizon économique correspondant par exemple à la durée de vie de l'installation de chauffage classique.

### 1) Coût de construction

On suppose qu'il n'existe qu'à l'instant  $t_0$ . C'est une impulsion située à l'instant initial.

Sur l'intervalle de calcul  $T_0$  ; le coût de construction cumulé est :

$$A \cdot \int_0^{T_0} C_{21}(t) dt = C_{21} \cdot A \cdot \int_0^{T_0} \delta(t - t_0) dt = C_{21} A \quad (42)$$

De même pour le système auxiliaire, on supposera que :

$$\int_0^{T_0} f'(q'_{HA \max}, t) dt = \int_0^{T_0} g'(A) \cdot \delta(t - t_0) dt = g'(A) \quad (43)$$

## 2) Coût de maintenance

Le coût de maintenance est défini comme étant le coût associé à l'action du maintien en bonne marche du système.

- Pour le système a collecteur :

$$C_m (o - T_o) = \int_0^T C_{25} (t) A dt = A \int_0^T C_{25} (t) dt \quad (44)$$

- Pour le système auxiliaire :

$$C_m (o - T_o) = \int_0^T f'' (q'_{HA \max}, t) dt \quad (45)$$

- Pour le système de stockage :

$$C_m (o - T_o) = \int_0^T g'' (A, t) dt \quad (46)$$

Avec

$$C (t) = C (o) \cdot e^{-rt} \quad (r \text{ taux d'actualisation})$$

## 3) Coût de fonctionnement du système auxiliaire : $C_1 (t)$ (f/th)

Ce coût est défini comme étant le coût lié à la quantité de fuel à consommer pour qu'on obtienne à tout instant  $q_{HT}$

$$C (t) = C_1 (t) \cdot \left[ q_{HT} (t) - q_{HS} \right] \quad (47)$$

Dont le coût cululé sera :

$$C (o-T_o) = \int_0^T C_1 (t) \left[ q_{HT} (t) - q_{HS} \right] dt = \int_0^T C_1 (t) q_{HT} (t) dt - q_{HS} \int_0^T C_1 (t) dt$$

Avec toujours

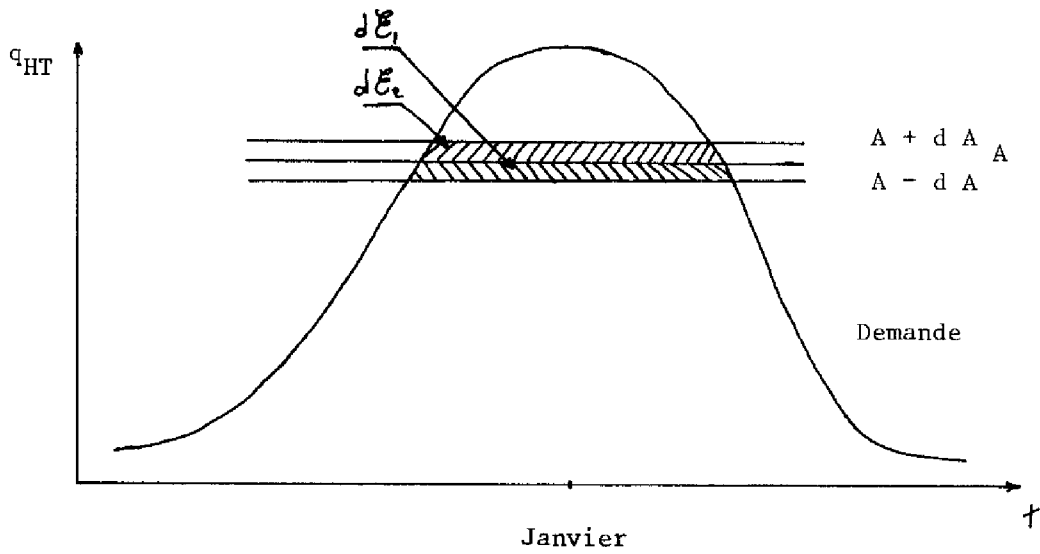
$$C_1 (t) = C_1 (o) e^{-rt}$$

Il apparaît nettement que :

- le supplément de quantité de chaleur apporté par l'accroissement d'aire  $(A - dA) - A$  est supérieur à celui apporté par l'augmentation d'aire  $A - (A+dA)$

$$d \mathcal{E}_1 > d \mathcal{E}_2 \Rightarrow C_1 \left[ \int_0^T (q_{HT} (t) - q_{HS}) dt \right] \neq k A$$





- Figure 43 -

4) Coût d'utilisation :  $C_u (A, t)$ 

En instantané :

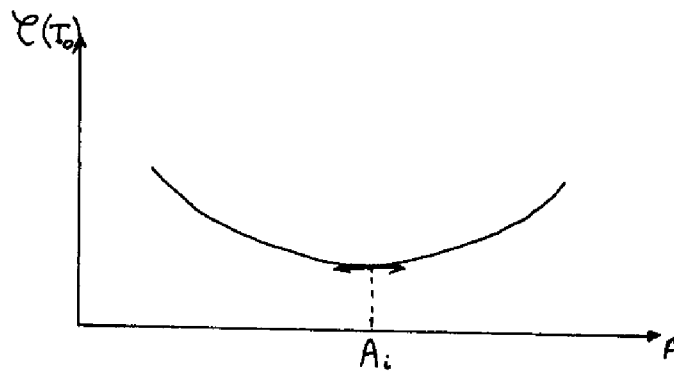
$$C_u (A, t) = \left[ C_{21}(t) + C_{25}(t) \right] A + C_1(t) \left[ q_{HT}(t) - q_{Hs} \right] + f + g(A) \quad (48)$$

Afin de prendre en compte l'actualisation des coûts, ceux-ci seront affectés du facteur  $e^{-rt}$  ; et le coût cumulé est ainsi ramené à l'instant 0. Sur un intervalle de temps  $(0, T_0)$  , on a le coût d'utilisation cumulé :

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_{(A_c)} &= C_u \left[ A, (0 - T_0) \right] = \int_0^{T_0} C_u (A, t) dt \\ \int_0^{T_0} C_u (A, t) dt &= C_{21} A + A \int_0^{T_0} C_{25}(t) dt + \int_0^{T_0} C_1(t) q_{HT}(t) dt \\ &\quad - q_{Hs} \int_0^{T_0} C_1(t) dt + f'(q'_{HA \max}) + \int_0^{T_0} f''(q'_{H \max}, t) dt \\ &\quad + g'(q'_{HA \max}) + \int_0^{T_0} g''(q'_{H \max}, t) dt \quad (49) \end{aligned}$$

Ce qu'on se propose de faire, c'est de minimiser le coût d'utilisation cumulé sur un intervalle de temps donné.

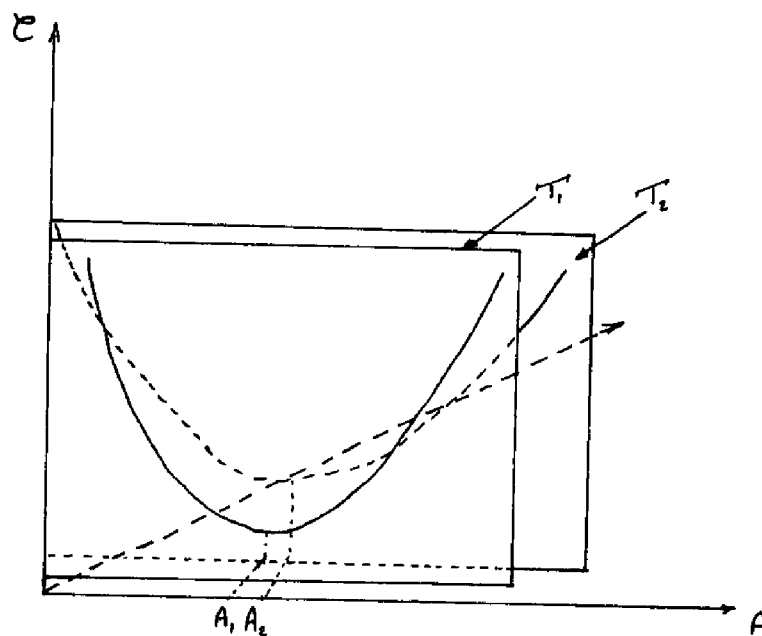
On cherche donc :  $\min \mathcal{C}(A, T_0)$



- Figure 44 -

Nota : Il conviendrait de retrancher à la valeur du coût cumulé, la valeur actualisée de l'installation au temps  $T$ , cette estimation est hasardeuse. Nous lui préférons l'étude suivante.

5) Généralisation :  $T_0$  variable



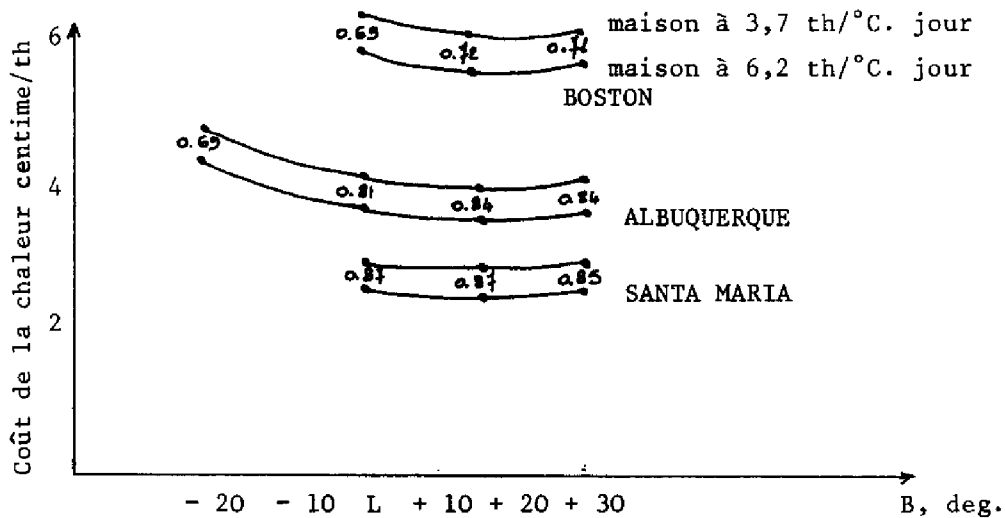
- Figure 45 -

Pour chaque intervalle  $(0, T_i)$ , on peut donc déterminer une aire de collecteur  $A_i$  qui minimise le coût cumulé  $\mathcal{C}$ . D'où la figure précédente donnant deux valeurs de  $\mathcal{C}_{\min}$ ;  $A_1$  et  $A_2$  différentes selon que l'on travaille sur l'intervalle  $(0, T_1)$  ou  $(0, T_2)$ .

On voit ici, toute la difficulté et tout l'intérêt des études qui, soit par simulation, soit par expérimentation permettent de tracer cette courbe de coût en fonction de la superficie de capteur installé.

## 6) Influence des différents paramètres sur le coût d'utilisation [12]

### 1) Influence de l'angle d'inclinaison du collecteur



- Figure 46 -

### Autres Paramètres

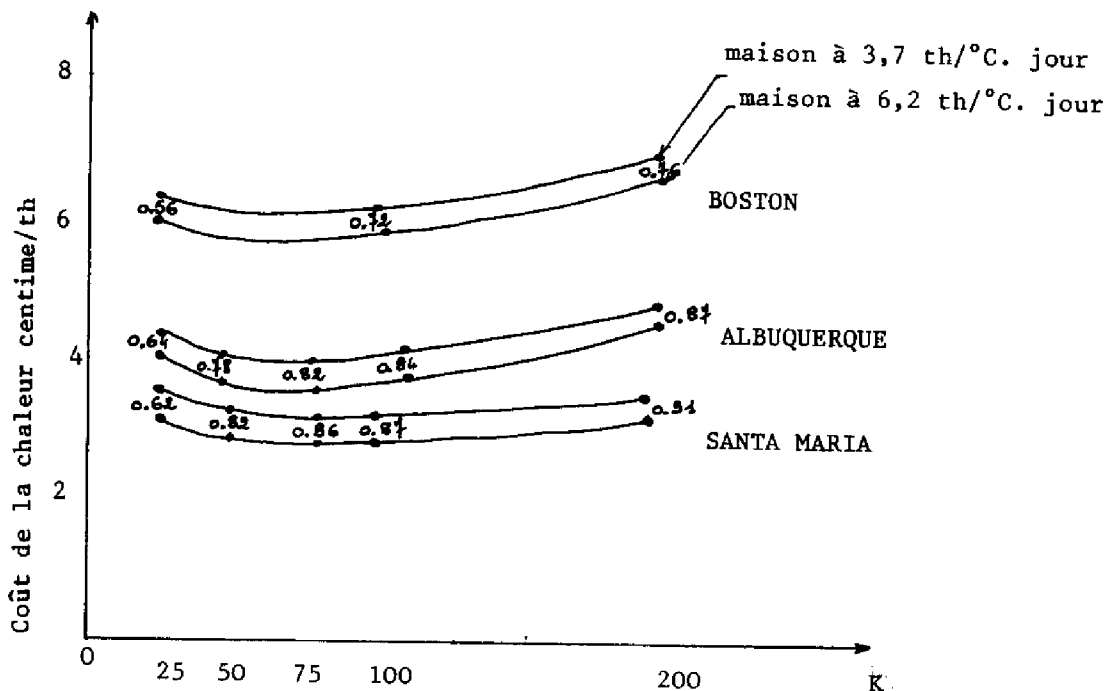
ALBUQUERQUE	BOSTON	SANT' MARIA
K = 144	K = 96	K = 96
N = 2	N = 22	N = 2
A = $9,6 \times 10^{-3}$	A = $4,8 \times 10^{-3}$	A = $14,4 \times 10^{-3}$
HW = $5,3 \times 10^{-3}$	HW = $2,7 \times 10^{-3}$	HW = $8,0 \times 10^{-3}$

Les pourcentages expriment la proportion de la demande totale pour le chauffage fournie par le solaire.

$K$  est la capacité de stockage rapportée à la surface de collecteur ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )  
 $N$  est le nombre de vitrages  
 $A$  est le rapport des besoins en chauffage auxiliaire par l'aire du collecteur  
 x degré heure ( $\text{th m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )  
 $HW$  est la consommation énergétique due à l'eau chaude domestique  
 ( $\text{th m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )

Le coût de la chaleur est calculé à partir de l'investissement supplémentaire de l'installation solaire, avec un taux d'intérêt de 6 %, pour une durée de vie de 20 ans. Les calculs ont été faits en 1971 par M M Löf et Tybout.

2) Influence de la capacité de stockage



- Figure 47 -

Autres paramètres

ALBUQUERQUE

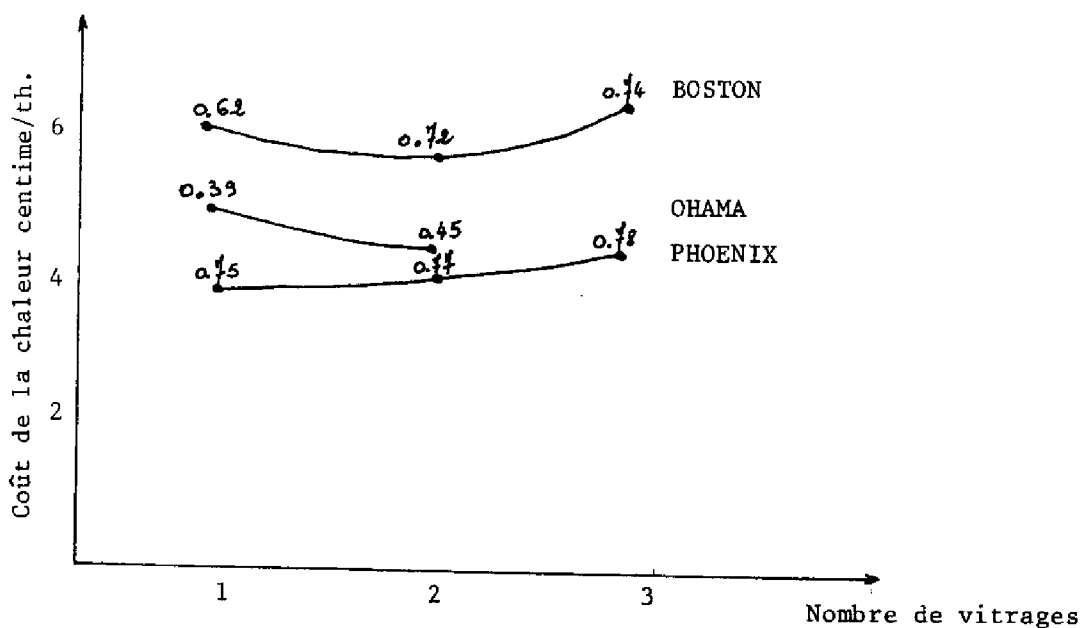
$B = 50^\circ 1$   
 $N = 2$   
 $A = 9,6 \times 10^{-3}$   
 $HW = 5,3 \times 10^{-3}$

BOSTON

$B = 57^\circ 2$   
 $N = 2$   
 $A = 4,8 \times 10^{-3}$   
 $HW = 2,7 \times 10^{-3}$

SANTA MARIA

$B = 49^\circ 9$   
 $N = 2$   
 $A = 14,4 \times 10^{-3}$   
 $HW = 8,0 \times 10^{-3}$

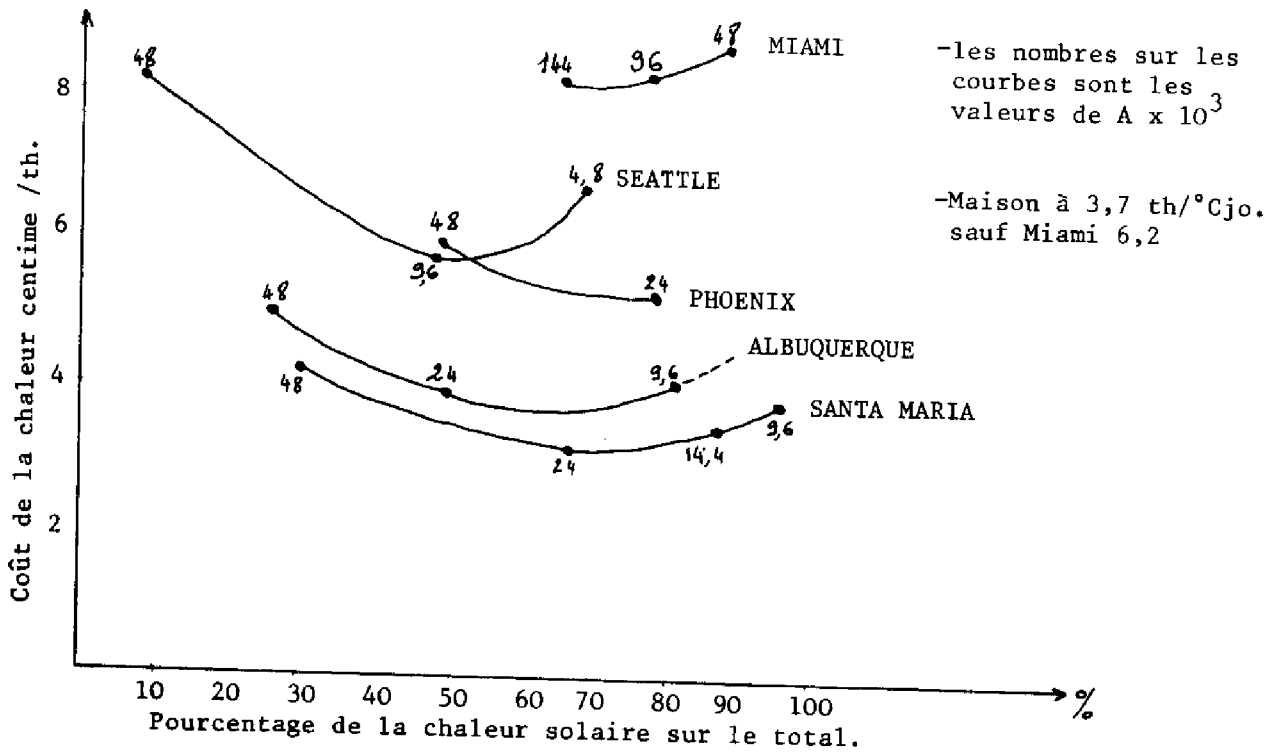
3) Influence du nombre de vitrages- Figure 48 -Autres Paramètres

Maisons à 6,2 th/°C jour

BOSTON	PHOENIX	OMAHA
B = L + 15°	B = L + 15°	B = L + 15°
K = 96	K = 96	K = 72
A = 4,8 x 10 <sup>-3</sup>	A = 24 x 10 <sup>-3</sup>	A = 9,6 x 10 <sup>-3</sup>
HW = 2,7 x 10 <sup>-3</sup>	HW = 13 x 10 <sup>-3</sup>	HW = 5,3 x 10 <sup>-3</sup>

4) Influence de la taille des collecteurs

Nous avons, ici, envisagé l'application du capteur plan à liquide caloporteur au chauffage de l'habitat et à la production d'eau chaude domestique. On peut également envisager, comme application du capteur plan, les refroidisseurs par absorption, les pompes solaires et les dispositifs à capteurs à air.



- Figure 49 -

## CONCLUSION

Le capteur plan, s'il a l'avantage de collecter aussi bien le rayonnement direct que le diffus, ne permet pourtant pas d'atteindre des températures élevées. De plus, son rendement de collection chute quand la température du fluide caloporteur augmente. De ce fait, il sera difficile de le coupler à un cycle thermodynamique en vue de produire soit de l'énergie mécanique soit de l'énergie électrique.

La brève approche économique développée précédemment n'est que qualitative aussi ne permet-elle pas d'aborder des problèmes complexes. Elle est classique en ses formes et n'a pour objectif que de marquer la sensibilité économique du système mixte à l'augmentation (ou diminution) de l'aire du capteur. Il apparaît également ici la nécessité d'existence d'un système auxiliaire de chauffage.



BIBLIOGRAPHIECHAPITRE II

- 1 W.H. MAC ADAMS  
Transmission de la chaleur.  
Dunod 1964.
- 2 W.A. SHURCLIFF  
Transmittance and reflexion loss of multi-plate planar window of a solar-radiation collector : Formulas and tabulations of results for case  $n = 1,5$  .  
Solar Energy. vol. 16 pp. 149-154.
- 3 HUETZ-AUBERT  
(Déjà cité. Référence 6 du chapitre I).
- 4 M. BERTHONDO  
Etude théorique des capteurs solaires plans à eau.  
Document EDF - 25 Avril 1976.
- 5 B.W. BLISS  
The derivations of several "plate-efficiency factors" useful in the design of flat-plate solar-heat collectors.  
Solar Energy. Vol. 3 n° 4 - 1959 - pp. 55-64.
- 6 J.F.O. SACADURA  
Equations caractéristiques des capteurs solaires plans sans concentration  
Revue générale de thermique n° 171 - Mars 1976 - pp. 217-223.
- 7 B. DENIN  
Les capteurs solaires à eau : mesure et extrapolation.  
Rencontre annuelle SFT\* - Mai 1976 - Grenoble.
- 8 G.O.G. LOF and R.A. TYBOUT  
The design and cost of optimized systems for residential heating and cooling by solar energy.  
Solar Energy - Vol. 16. pp. 9-18.

\* SFT : Société française des thermiciens.



- 9 A. SPIRIDONOS  
Contribution à l'étude du régime d'un thermo-siphon solaire.  
Bulletin COMPLES\* Juin 1972
- 10 D. CAVARD, P. CRIQUI  
Problèmes liés à l'évaluation économique des différentes technologies  
d'application de l'énergie solaire à l'habitat.  
Novembre 1976 - O57/76/DC.PC. IEJE\*Grenoble.
- 11 P. LABAT, E. THIEBAUT  
Quelques notions physiques et économiques sur les collecteurs plans.  
Note interne LAAS-SEESI n° 76 I 30 - Octobre 1976.
- 12 G.O.G. LOF and R.A. TYBOUT  
The cost of house heating with Solar Energy.  
Solar Energy. Vol. 14. n° 3. pp. 253-278.

\* COMPLES : Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire.

\* IEJE : Institut d'étude juridique de l'énergie.

## CHAPITRE III

---

### LES CONCENTRATEURS



## INTRODUCTION

Le troisième chapitre va être consacré à une présentation des systèmes permettant la concentration du rayonnement solaire direct par réflexion.

Tout comme les dispositifs appliquant l'effet de serre, le but de ces systèmes est d'utiliser l'énergie solaire incidente pour chauffer un corps "noir" duquel on prélève l'énergie thermique au moyen d'un fluide caloporteur.

Le chapitre sera composé de trois paragraphes.

Le premier a pour but d'introduire la concentration, les courbes de rendement photothermique et photomécanique ainsi que les divers types de concentrateurs. Elle se terminera par un graphique situant les concentrateurs en fonction de la concentration géométrique et de la température théorique atteignable.

Nous introduirons ensuite brièvement quelques notions technico-économiques qui nous permettront de présenter la notion de station énergétique solaire et de donner les grandes lignes du problème posé par l'insertion de l'énergie solaire dans le système énergétique.

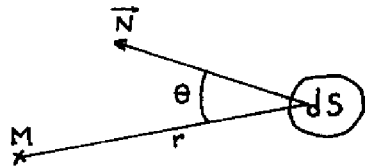
Enfin, dans une troisième partie, nous avons tenté de présenter les concentrateurs en utilisant des résultats théoriques ou de simulation.

Nous utiliserons des notions de ce chapitre, lors de l'application de l'analyse morphologique aux stations énergétiques solaires dans le chapitre V.

### III.1. INTRODUCTION À LA CONCENTRATION

#### III.1.1. Concentration ponctuelle C

Nous définirons la concentration géométrique du concentrateur ou concentration ponctuelle comme suit :



N : Normale à la surface d S

M : Point de l'espace

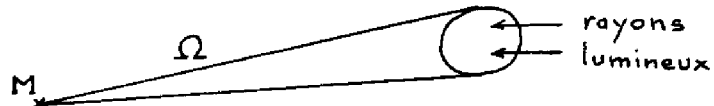
$d\Omega$  : Angle solide élémentaire sous lequel on voit d S depuis M.

- Figure 50 -

$$d\Omega = \frac{dS \cdot \cos \theta}{r^2} \quad (1)$$

Si le diamètre apparent du soleil est  $\alpha = 10^{-2}$  rd on peut déterminer l'angle solide du soleil  $w = \frac{\pi \cdot \alpha^2}{4}$

Nous définirons le facteur d'amplification géométrique C tel que  $C = \frac{\Omega}{w}$  (2)



- Figure 51 -

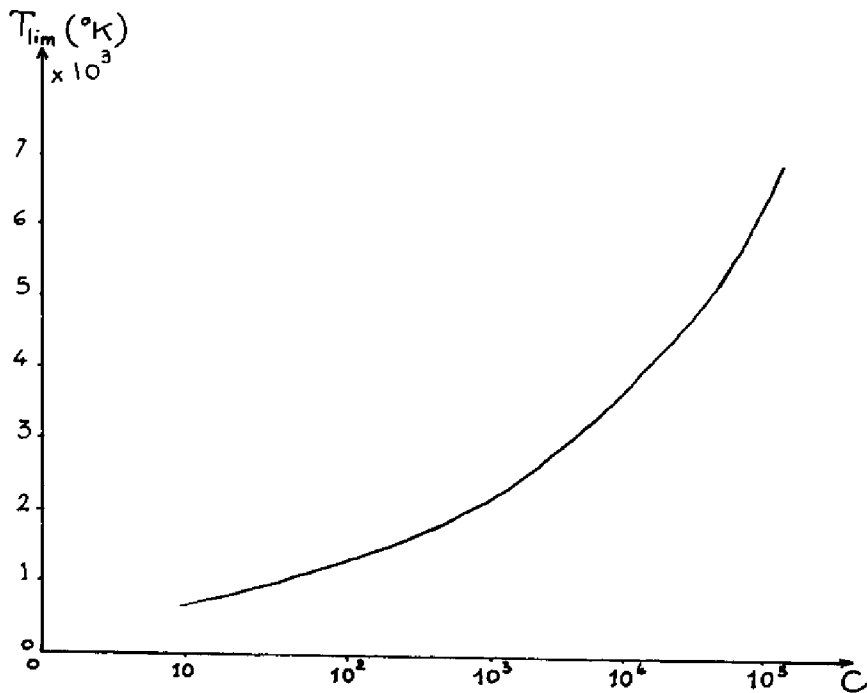
Nous avons également défini le flux énergétique  $\phi$  au moyen de la relation :

$$\frac{d^2 \phi}{dS} = L \cos \theta d\Omega \quad (3)$$

- Figure 52 -

L étant la luminance énergétique relative à la direction  $O_x$ .

L'intérêt de la concentration du rayonnement solaire incident va être de pouvoir atteindre des températures élevées au niveau du corps noir. En effet, théoriquement, la température limite atteinte par un absorbeur ( $\alpha = 1$ ,  $\epsilon = 1$ ) ponctuel éclairé sous une concentration C avec une constante solaire  $W_0$  de 1 kW/m<sup>2</sup> est :  $T_{lim} = \sqrt[4]{\frac{C W_0}{\sigma}}$  (4)



- Figure 53 -

Le rendement photothermique  $\eta_1$ , est défini comme étant le rapport de la puissance collectée sur la puissance incidente au collecteur. Comme cette collection se fait à haute température, nous ne considérerons que les pertes par rayonnement ce qui entraîne que :

$$\eta_1 = \frac{Cw_o - \sigma T^4}{Cw_o} = 1 - \frac{\sigma T^4}{Cw_o} \quad (5)$$

$$\eta_1 = 1 - \left( \frac{T}{T_{lim}} \right)^4 \quad (6)$$

De même, le rendement photomécanique qui est le produit du rendement photothermique et du rendement de Carnot s'exprimera sous la forme :

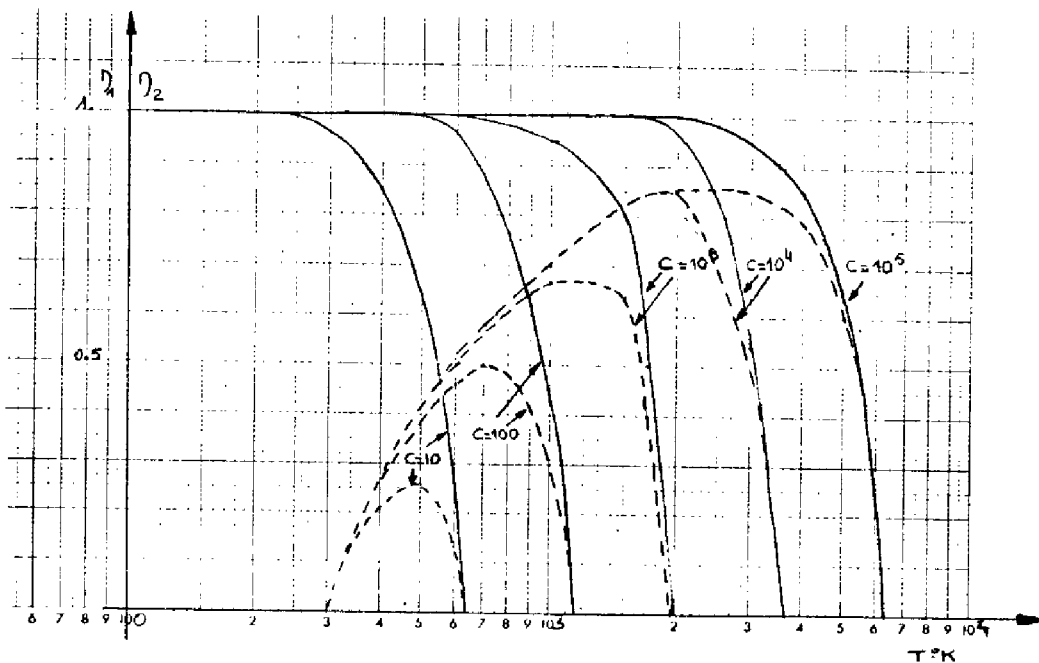
$$\eta_2 = \eta_1 \left( 1 - \frac{T_o}{T} \right) \quad (7)$$

( $T_o$  = Température de la source froide)

d'où

$$\eta_2 = \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_{lim}} \right)^4 \right] \cdot \left[ 1 - \frac{T_0}{T} \right] \quad (8)$$

Si nous traçons maintenant le rendement photothermique d'un absorbeur ponctuel (-) ainsi que le rendement photomécanique  $\eta_2$  (...) de ce même absorbeur.



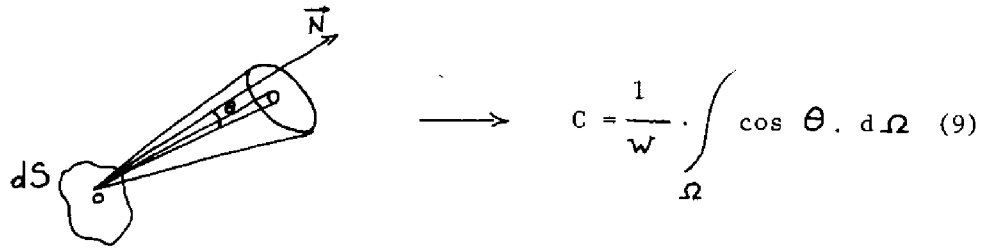
- Figure 54 -

Nous voyons, ici, que le rendement photomécanique  $\eta_2$  présente, pour une valeur de C donnée, un maximum en fonction de la température.

Maintenant qu'à été définie la concentration ponctuelle C, nous allons nous attacher à définir les différents types de concentration que nous allons pouvoir envisager.

### III.1.2. Les divers types de concentration

Nous allons d'abord définir la concentration sur un élément de surface :



- Figure 55 -

Nous allons, ici, introduire une différenciation entre les concentrations. Cette nuance apparaissant déjà dans le synoptique de la première partie quand nous scindions les concentrateurs en concentrateurs à deux et trois dimensions.

Nous dirons qu'un concentrateur à deux dimensions sera tel qu'il existe une direction d'axe selon laquelle l'éclairement de la cible se fait sous un diamètre apparent égal à celui du soleil  $\alpha$ .

De fait, pour la concentration à deux dimensions, on aura :

$$\Omega_{\max} = \int_0^{2\pi} \alpha \, d\beta = 2\pi\alpha \quad (10)$$

$$\text{En un point : } C_{\max} = \frac{\Omega_{\max}}{W} = \frac{2\pi\alpha}{\frac{\pi\alpha^2}{4}} = \frac{8}{\alpha} = 800$$

Sur un élément de surface :

$$C_{\max} = \frac{1}{W} \times 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \alpha \cos \beta \, d\beta = \frac{8}{\pi\alpha} = 250 \quad (11)$$

Et pour concentration à trois dimensions, on aura :

$$\Omega_{\max} = 4\pi \quad (\text{Aire de la sphère de rayon-unité}).$$

$$\text{En un point } C_{\max} = \frac{4\pi}{\frac{\pi\alpha^2}{4}} = \frac{16}{\alpha^2} = 16 \cdot 10^4$$

$$\text{Sur un élément de surface : } C_{\max} = \frac{1}{\frac{\pi\alpha^2}{4}} \times 4 \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \cos \beta \, d\beta \times \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \cos \gamma \, d\gamma = \frac{16}{\pi\alpha^2} = 5 \cdot 10^4. \quad (12)$$



### III.1.3. Les divers concentrateurs [1]

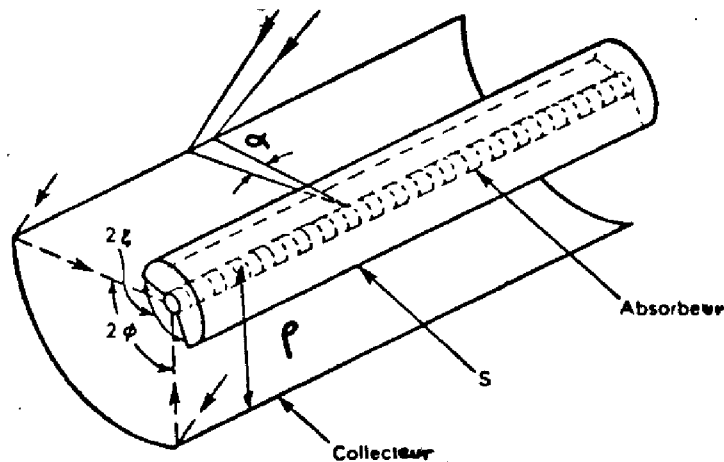
Nous appellerons concentrateur tout système optique de réflexion (ou réfraction) qui a pour but de modifier la direction du rayonnement solaire incident de façon à augmenter l'intensité de la radiation solaire collectée au niveau de la surface absorbante.

Tout système de concentration sera donc constitué :

- par une surface réfléchissante permettant la focalisation du rayonnement solaire direct ;
- par un absorbeur qui aura pour rôle d'absorber l'énergie solaire concentrée.

Comme grandes classes de concentrateurs, nous aurons :

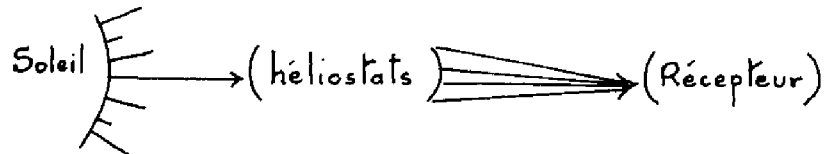
- le concentrateur cylindro-parabolique dans lequel un fluide caloporteur parcourant le récepteur peut collecter l'énergie réfléchie



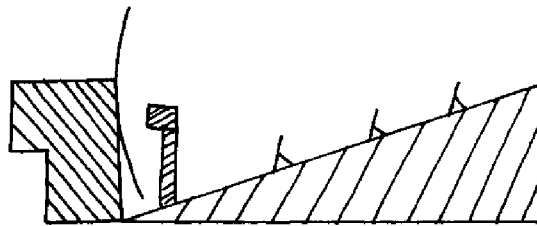
- Figure 56 -

- le paraboloïde ;
- le concentrateur à héliostats.

Ce montage a pour but de concentrer au moyen d'un ensemble de miroirs orientables (héliostats) le rayonnement sur un récepteur de faibles dimensions.

- Figure 57 -

Comme illustrations, nous citerons le four solaire d'Odeillo dont la représentation schématique est la suivante :

- Figure 58 -

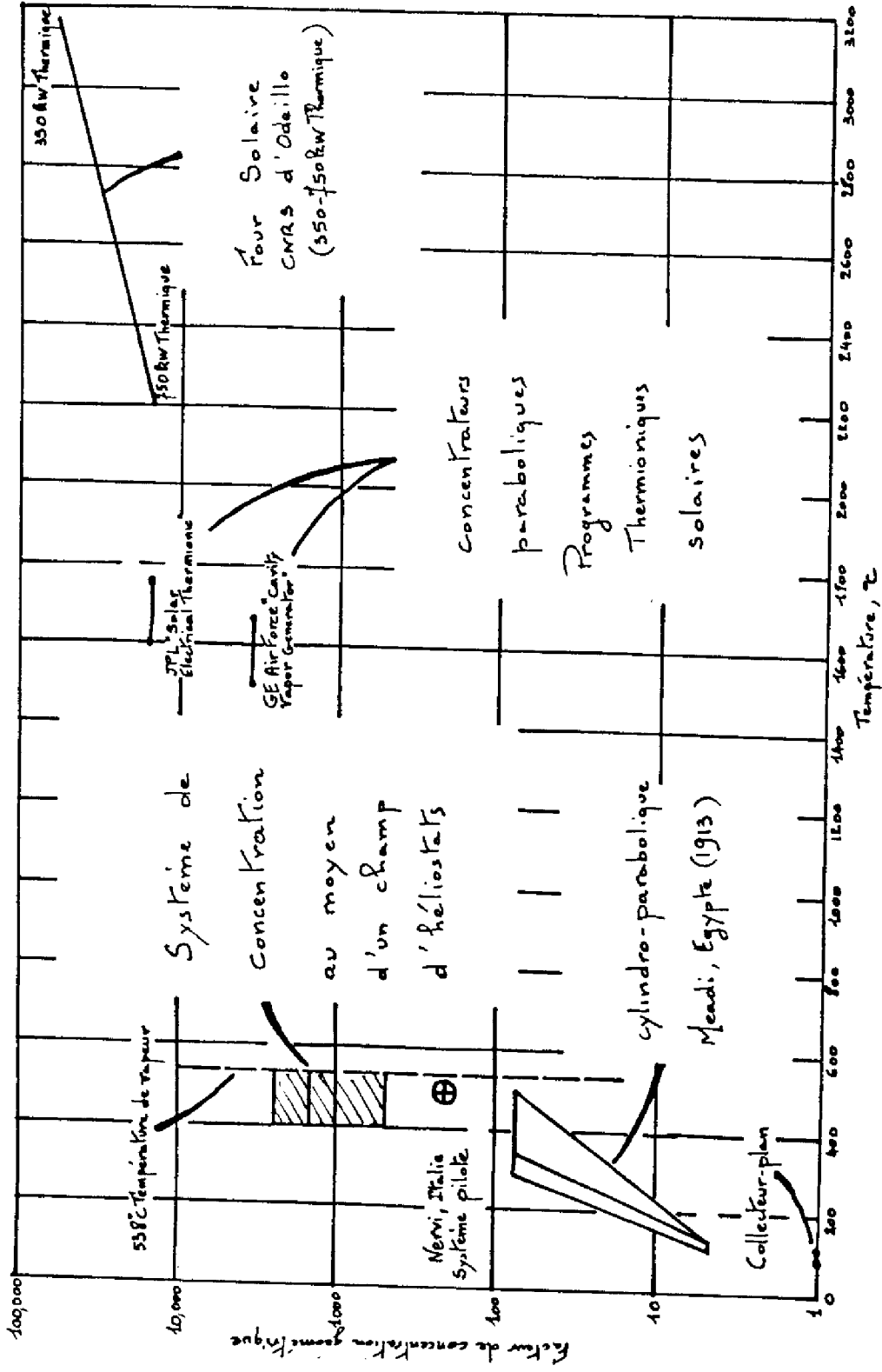
Nous terminerons cette brève présentation des diverses classes de concentrateurs, en donnant le tableau suivant qui permet de les situer par rapport au facteur de concentration géométrique  $C$  et à la température  $T$ .

### III.2. INTRODUCTION AUX STATIONS ÉNERGÉTIQUES SOLAIRES

L'énergie solaire peut jouer un rôle substantiel dans la production de la chaleur et même de l'électricité à condition de construire des stations énergétiques solaires de puissance relativement élevée.

Un des principaux critères, déterminant la rentabilité de l'utilisation de ces stations est l'investissement spécifique en francs/kW. En général, on utilise le kW installé, c'est à dire la puissance maximale que la station pourra fournir. On peut également prendre en compte le kWh solaire ce qui reviendra à estimer, sur la durée de vie de la centrale, le nombre de kWh produits [3]. Ce deuxième choix à l'avantage de permettre de prendre en compte non seulement les coûts d'investissement mais également

- Figure 59 -



les coûts de fonctionnement qui sont actuellement jugés faibles pour une station énergétique solaire. L'attention principale doit être portée sur la réduction maximum du coût de construction : On doit pouvoir atteindre ce but par l'élaboration de schémas simples et efficaces de stations énergétiques solaires, par le choix approprié de leur puissance unitaire, par le nombre et les dimensions des modules et, enfin, par l'emploi de matériaux adéquats.

A l'institut énergétique Krjijanovsky [2], des recherches sur la construction de stations énergétiques solaires sont conduites. Les calculs ont démontré que, bien que pour les stations thermiques ordinaires, ainsi que pour la plupart des machines, l'augmentation de la puissance unitaire conduit à une réduction des investissements spécifiques, une seule augmentation des dimensions d'une installation solaire munie d'un réflecteur parabolique, cylindro-parabolique ou plan n'est pas rationnelle. Cela s'explique par le fait que la puissance d'une installation solaire augmente en proportion de la surface réfléchissante, c'est à dire proportionnellement au carré des dimensions linéaires, tandis que son coût déterminé par la résistance aux intempéries, et surtout par les déformations minimes, s'accroît plus rapidement.

Ainsi, plus rationnel est un schéma où la puissance est réalisée par un grand nombre de petits réflecteurs identiques concentrant la radiation sur un récepteur commun (chaudière). En fait, cette voie a déjà été utilisée à Odeillo et est sérieusement envisagée pour les projets de production d'électricité (grande puissance) à partir de l'énergie solaire.

Un avantage sérieux de cette disposition est que les réflecteurs peuvent être produits en série ce qui réduit naturellement leur coût.

Au cours de l'élaboration d'un tel projet, on se heurtera certainement à de nombreux problèmes aussi bien de conception que techniques qui pourront en partie être étudiés par voies théoriques et expérimentales en laboratoire.

En principe, une station énergétique solaire de type quelconque est composée de deux parties essentielles : le système de réflecteurs et le transformateur de la radiation solaire et d'autres formes d'énergie (chaudière, chaudière avec turbine et générateur...).

Nous avons vu que l'on peut associer le coût initial de la station énergétique solaire au coût actualisé de sa maintenance pendant sa durée de vie ce qui revient à s'intéresser à la durée de vie des matériaux choisis (Annexe 5).

L'impact réduit des dépenses futures peut conduire à limiter la durée de vie de certains sous-systèmes, si de cette manière, on réduit sensiblement leur coût initial.

Les stations énergétiques solaires ont un gros défaut qui est leur coût d'investissement. Elles présentent, par contre, d'importants avantages économiques [3] :

- l'"indépendance" vis à vis du prix du pétrole et du prix des autres sources d'énergie non renouvelables ;
- l'indépendance vis à vis des fluctuations monétaires ;
- l'absence d'impact sur la balance commerciale; si ce n'est, en positif, par d'éventuels bénéfices à l'exportation ;
- le respect de l'environnement.

Certains de ces avantages se manifestent au niveau de l'économie de la nation, d'autres au niveau du gestionnaire.

L'indépendance de l'énergie solaire mériterait d'être explicitée par des comparaisons avec les autres sources d'énergie et l'établissement de matrices de dépendance des coûts du kWh produit par les différentes sources vis à vis de grandeurs économiques (prix de la main-d'oeuvre, des matières premières ...).

Ceci amène à considérer l'énergie solaire en tant que source énergétique au même titre que le charbon, le pétrole ... Ce problème de "bilan" énergétique à un niveau national (ou international) a déjà été abordé en France [4] et des scénarios (1985-2000) ont été élaborés [5] [6] de façon à appréhender quel pourrait être notre futur énergétique. [7]

### III.3. APPROCHE SUCCINCTE DES CONCENTRATEURS

Si nous voulions dégager les propriétés optiques de chaque concentrateur, cela reviendrait à étudier en fonction du rayonnement solaire incident les propriétés du rayonnement réfléchi. Mais le but que nous nous sommes fixés n'étant pas d'établir des équations rigoureuses, ni de faire une étude par simulation, nous aborderons de façon assez générale ces problèmes de façon à avoir une connaissance globale de ces différents concentrateurs. Le but recherché sera donc, à travers des études théoriques sur le cylindro-parabolique partiellement étendues au paraboloïde et des études par simulation en ce qui concerne la centrale HTE\*, l'obtention d'un modèle simple de ces concentrateurs, de façon à avoir un support physique que nous utiliserons lors de l'application de l'analyse de la morphologie de systèmes aux concentrateurs solaires.

#### III.3.1. Le cylindro-parabolique - Le paraboloïde

##### Introduction

Nous effectuerons ici une brève étude théorique des performances de concentrateurs solaires cylindro-paraboliques [8] et paraboliques dans des conditions idéales. Des indices qui décrivent les performances seront définis et calculés et les divers paramètres seront étudiés. En particulier l'énergie disponible dans le plan focal et la répartition de son intensité seront déterminées.

\* HTE : hélio-thermo-électrique.

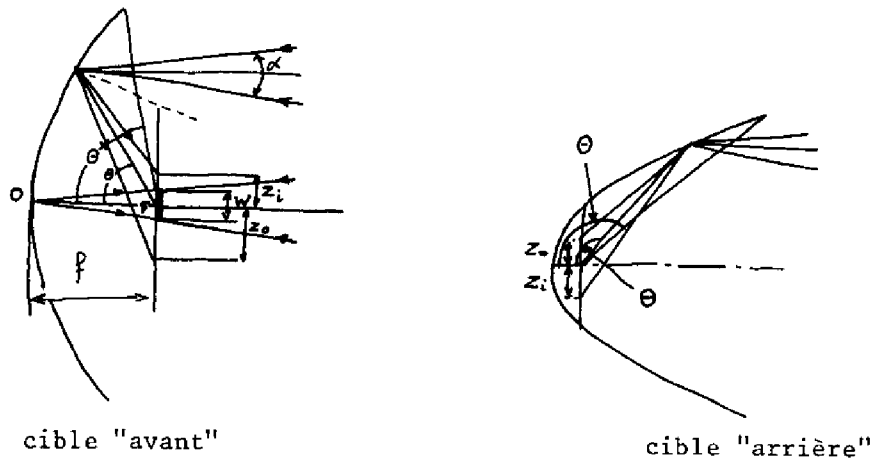
Etude optique

Hypothèses restrictives :

- La surface réfléchissante est une parabole continue et parfaite.
- L'incidence du rayonnement solaire est parfaitement axiale.
- Une réflexion spéculaire existe sur l'ensemble du récepteur.
- La réflectivité est constante sur l'ensemble de la surface réfléchissante, quel que soit l'angle d'incidence.
- Le diamètre angulaire apparent du soleil, donné par le symbole  $\alpha$  est constant et égal à 32' d'angle.
- La cible du concentrateur est infiniment mince sur ses deux bords dans le plan focal. Le centre de la cible coïncide avec le foyer du cylindre-parabolique ou du paraboloïde.

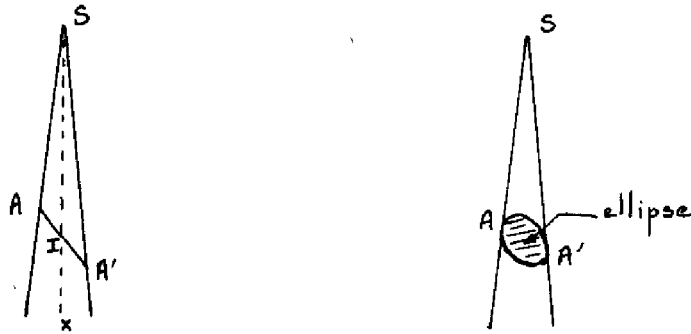
III.3.1.1. Géométrie de réflexion

III.3.1.1.1. Réflexion en un point

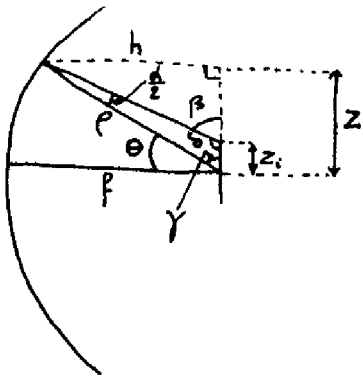


- Figure 60 -

L'angle d'incidence varie de  $(\frac{\theta}{2} - \frac{\alpha}{2})$  pour la raie intérieure à  $(\frac{\theta + \alpha}{2})$  pour la raie extérieure.

- Figure 61 -

Le cône de radiation réfléchi par tout point autre que le sommet intercepte le plan focal sous une ellipse dont le grand axe A est égal à  $Z_0 + Z_i$ .



$$\begin{cases} \gamma = \frac{\pi}{2} - \theta \\ \delta = \pi - \left( \frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{2} - \theta \right) = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \theta \\ \beta = \pi - \delta \end{cases}$$

$$e^2 = z^2 + h^2 = \left( \frac{2f}{1 + \cos \theta} \right)^2$$

propriété de la parabole

$$h = e \cos \theta$$

$$z^2 = e^2 - h^2 = e^2 (1 - \cos^2 \theta) = e^2 \sin^2 \theta$$

$$\Rightarrow z = \pm e \sin \theta$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h}{z - z_i} \quad z - z_i = \frac{h}{\operatorname{tg} \beta} = h \operatorname{cotg} \left( \theta - \frac{\alpha}{2} - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$z_i = z - h \operatorname{tg} \left( \theta - \frac{\alpha}{2} \right) = e \left[ \sin \theta - \cos \theta \cdot \operatorname{tg} \left( \theta - \frac{\alpha}{2} \right) \right]$$



$$Z_i = \rho \left[ \sin \theta - \cos \theta \frac{\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \theta} \right] = \rho \left[ \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} + \cos \theta \right] \times \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \theta}$$

$$Z_i = \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \theta} \times \frac{1}{\cos \theta} = \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sec \theta}{1 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \theta} \quad (13)$$

Dans le cas particulier où le récepteur est lui-aussi parabolique :

$$\rho = \frac{2f}{1 + \cos \theta} \quad Z_i = \frac{2f \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sec \theta}{1 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \theta} \times \frac{1}{1 + \cos \theta}$$

De la même manière, on obtiendrait :

$$Z_o = \rho \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sec \theta}{1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \theta} \xrightarrow[\text{parabole}]{\text{cas de la}} Z_o = \frac{2f \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sec \theta}{1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \theta} \cdot \frac{1}{1 + \cos \theta} \quad (14)$$

$$\text{d'où} \quad A = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sec \theta}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg}^2 \theta} \quad (15)$$

Comme le centre de cette ellipse ne coïncide pas avec le foyer, l'excentricité E sera donnée par :

$$Z_o - Z_i = E = \frac{2f \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \sec \theta \operatorname{tg} \theta}{(1 + \cos \theta) (1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg}^2 \theta)} \quad (16)$$

### Angles critiques et détermination des différentes zones de la surface de réflexion.

La largeur linéaire de la cible étant W, si nous appelons w, la dimension A quand  $\theta = 0$  ( $\Rightarrow A = 2 \rho \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ ), nous définirons le rapport  $B = \frac{W}{w}$

$$(w = A_{\min}).$$

$B^{-1}$  est en quelque sorte le rapport d'utilisation de la cible dans le cas où A est minimal.

L'efficacité de concentration sera définie comme le rapport entre la radiation reçue par la cible sur la radiation totale réfléchie par le miroir.

Nous allons maintenant déterminer les deux angles critiques  $\alpha'$  et  $\gamma'$  définis comme suit :

Si, à la fois,  $Z_0$  et  $Z_i$  sont plus petits que  $W/2$ , toute l'énergie réfléchie sera interceptée par la cible. Si,  $Z_0$  ou  $Z_i$  est plus grand que  $W/2$ , une partie de l'énergie réfléchie passera à côté de la cible. L'angle  $\theta$  correspondant au fait que le plus grand de  $Z_0$  ou  $Z_i$  est égal à  $\frac{W}{2}$  sera l'angle critique  $\alpha'$ . Le deuxième angle critique  $\gamma'$  est l'angle  $\theta$  correspondant à la situation où le plus petit de  $Z_0$  et  $Z_i$  est égal à  $\frac{W}{2}$ .

Il est clair que les valeurs des angles critiques vont diviser la surface réfléchissante en plusieurs zones. Il est également clair que  $\alpha'$  et  $\gamma'$  seront fonctions de B.

Reprenant la figure 60, nous voyons donc que nous aurons deux ensembles de relations :

$$\text{- cas 1} \rightarrow Z_0_{\theta=\alpha'} = \frac{W}{2} \text{ et } Z_i_{\theta=\gamma'} = \frac{W}{2}$$

$$\text{- cas 2} \rightarrow Z_i_{\theta=\alpha'} = \frac{W}{2} \text{ et } Z_0_{\theta=\gamma'} = \frac{W}{2}$$

Si nous voulons exprimer B en fonction de  $\alpha'$  ou  $\gamma'$ , nous aurons :

$$\text{cas 1} \rightarrow Z_0_{\theta=\alpha'} = \frac{W}{2} = \frac{\text{tg} \frac{\alpha'}{2} \sec \theta}{1 + \text{tg} \frac{\alpha'}{2} \text{tg} \theta} \Rightarrow B = \frac{W}{w} = \frac{2}{\cos \alpha' (1 + \cos \alpha') (1 + \text{tg} \frac{\alpha'}{2} \text{tg} \frac{\alpha'}{2})}$$

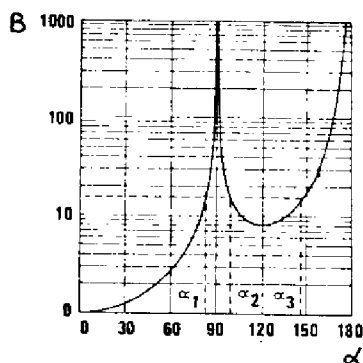
Donc de façon générale pour les cas 1 et 2 :

$$B = \frac{2}{\cos \alpha' (1 + \cos \alpha') (1 + \text{tg} \frac{\alpha'}{2} \text{tg} \alpha')} \quad (17)$$

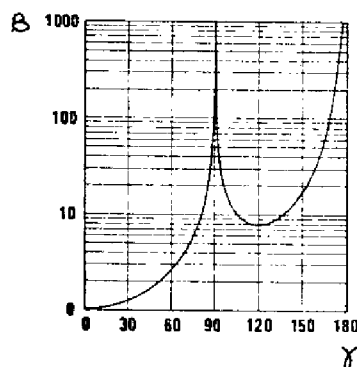
De même en fonction de  $\gamma'$  :

$$B = \frac{2}{\cos \gamma' (1 + \cos \gamma') (1 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \gamma')} \quad (18)$$

Si bien que si nous traçons  $B(\alpha')$ ,  $B(\gamma')$  :



- Figure 63 -



- Figure 64 -

$$\begin{array}{l} 0 \leq \alpha' \leq 90^\circ \quad - \quad \text{1er cas} \quad - \quad 0^\circ \leq \gamma' \leq 90^\circ \\ 90^\circ \leq \alpha' \leq 180^\circ \quad - \quad \text{2ème cas} \quad - \quad 90^\circ \leq \gamma' \leq 180^\circ \end{array}$$

A partir des équations 18 et 17 ; on arrive à :

$$B_{\min} \neq 8 \quad \longrightarrow \quad \text{pour} \quad \alpha' = \gamma' = 120^\circ$$

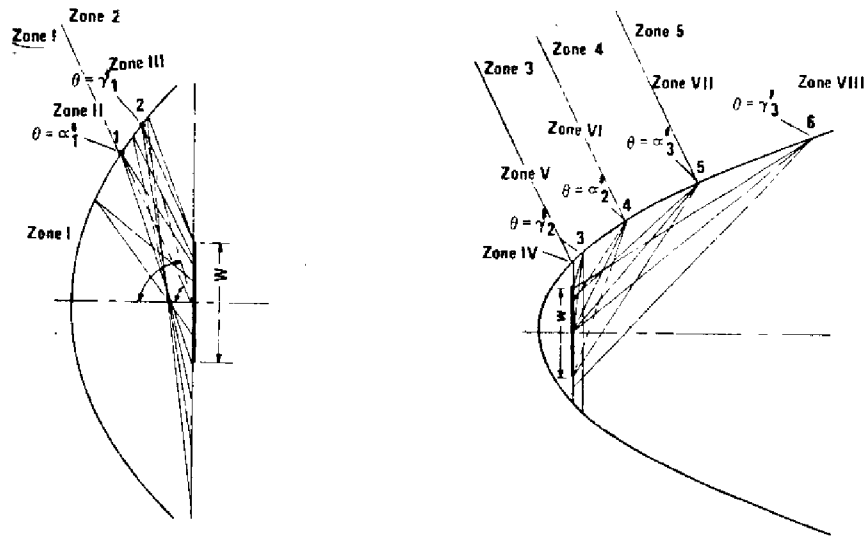
Les figures 63 et 64 permettent de déterminer les 2 angles critiques pour certaines valeurs de  $B > B_{\alpha_{\min}}$ .

La surface réflectrice est divisée en 8 zones. Tout ce qui se réfléchit dans les zones I et VI est complètement intercepté par la cible. Pour les zones II, V et VII une partie du rayonnement réfléchi n'atteint pas la cible mais ne déborde que d'un côté. Pour les zones III, IV et VIII une partie du point réfléchi passe à chaque extrémité de la cible.

$$B_{\min, \gamma'} < B < B_{\min, \alpha'} \quad , \quad \text{la zone VI disparaît.}$$

$$B < B_{\min, \gamma'} \quad , \quad \text{les zones V et VII disparaissent.}$$

- Figure 65 -



Si nous comparons les valeurs des 2 angles critiques  $\alpha'$  et  $\gamma'$  données par 17 et 18 nous voyons que  $\alpha'$  et  $\gamma'$  prennent des valeurs proches :

$$\begin{cases} \alpha_1' \sim \gamma_1' \\ \alpha_2' \sim \gamma_2' \\ \alpha_3' \sim \gamma_3' \end{cases}$$

Si bien que nous pourrions en lère approximation négliger les zones II, V et VII et nous avons alors les zones numérotées de 1 à 5 en chiffres arabes.

Pour les zones 1 et 4 : Tout dans la cible.

De façon à faire clairement apparaître cette notion de tout ou partie du rayonnement réfléchi dans la cible nous allons définir une variable appelée "contribution"  $C_o$  déterminée comme suit :

$$C_o = \frac{\text{Radiation réfléchiée par un point et interceptée par la cible}}{\text{Radiation totale réfléchiée par ce point}}$$

Du fait de la symétrie de la parabole ; nous allons considérer les points 2 par 2.

Nous allons déterminer  $\bar{W}$  = longueur du trait pour 2 points symétriques ; alors :

$$\theta < 90^\circ \implies z_o > z_i \implies W = 2 z_o$$

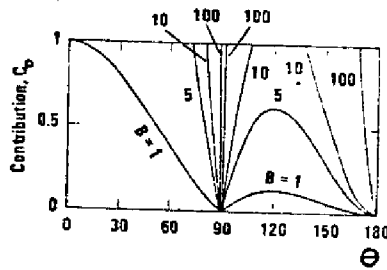
$$90^\circ < \theta \implies z_o < z_i \implies W = 2 z_i$$

Si bien que nous pourrons définir la contribution  $C_o$  pour tout couple de points sym/axe de la parabole c'est à dire pour une valeur de  $\theta$  ;

par :  $C_o = \frac{W}{\bar{W}}$

$$W = B w \quad W = 2 \begin{cases} z_o \\ z_i \end{cases}$$

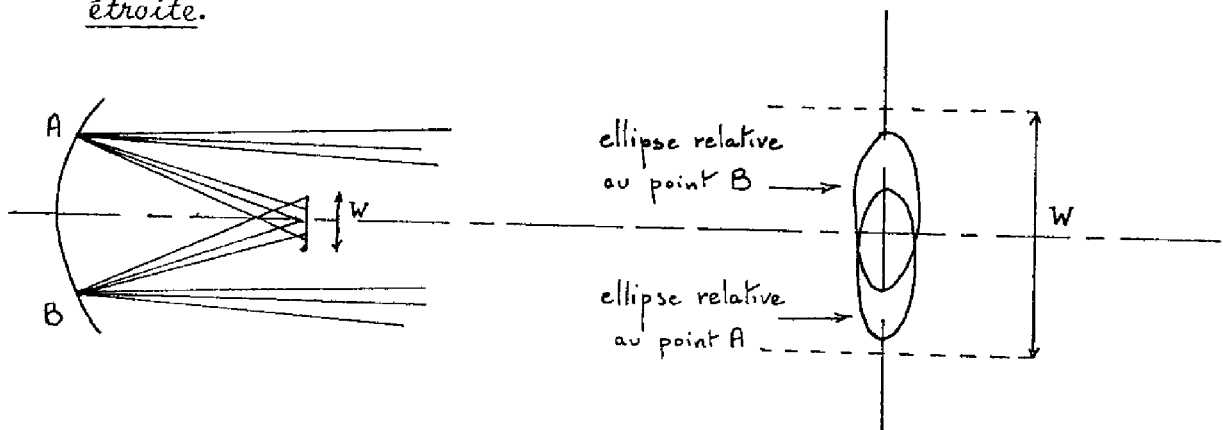
$$\implies C_o = \frac{B}{2} \cos \theta (1 + \cos \theta) (1 \pm \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}) \quad (18)$$



- Figure 66 -

III.3.1.1.2. Réflexion sur une bande parabolique infiniment

étroite.



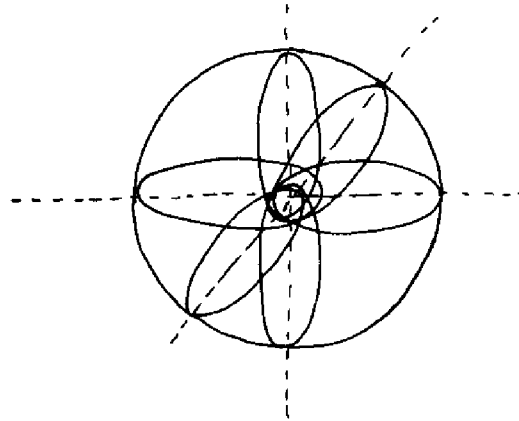
- Figure 67 -

L'intersection du cône réfléchi en chaque point par le plan focal va donner un ensemble d'ellipses dont les grands axes appartiennent tous à la même droite.

### III.3.1.1.3. Réflexion sur un paraboloïde et un cylindro-parabolique.

#### a) Le paraboloïde

Du fait de sa symétrie de révolution, pour ce qui est du paraboloïde, nous allons considérer que toute parabole appartenant à ce paraboloïde donnera sur le plan focal un ensemble d'ellipses telles celles montrées sur la figure précédente, mais dont le grand axe n'est plus vertical.



- Figure 68 -

La tache globale fournie par le paraboloïde sera donc un cercle de diamètre égal au grand axe de l'ellipse calculé précédemment (15). Nous ne nous poserons pas le problème de dépointage du paraboloïde puisque, idéalement, le paraboloïde doit être constamment "bien" orienté pour concentrer sur la cible.

La puissance collectée par le paraboloïde sera égale à  $P = q_s \times A'$  ;  $A'$  étant l'aire de la section droite d'entrée du paraboloïde.

Si on veut étudier l'effet soit de dépointage soit des défauts de planéité sur la tache au niveau de la cible ; il pourrait être intéressant d'effectuer une analyse numérique.

En ce qui nous concerne nous ne nous attarderons pas sur ces problèmes et n'approfondirons pas davantage l'approche relative au paraboloïde ; notre objectif n'étant qu'une présentation succincte des concentrateurs.

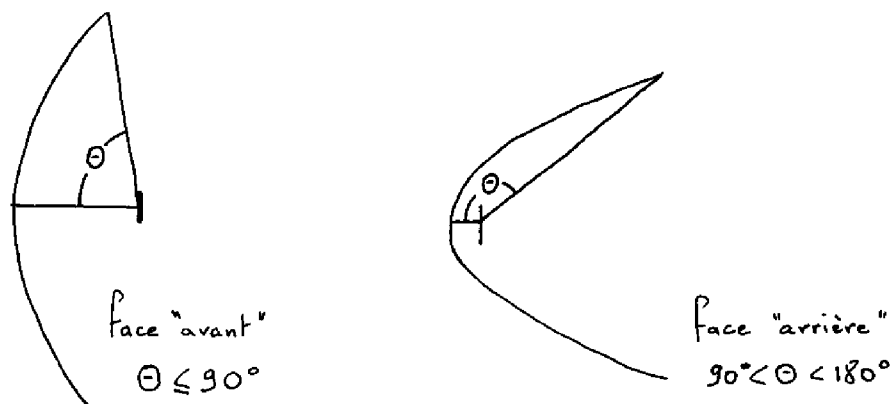
b) Le cylindro-parabolique

L'étude de la tache fournie par une parabole réfléchissante peut-être directement étendue au cylindro-parabolique dont la cible sera alors un tuyau le parcourant dans toute sa longueur dans lequel circulera le fluide caloporteur.

Dans le cas où le cylindro-parabolique n'est pas orienté de façon à ce que le rayonnement incident lui soit axial, on aura intérêt à effectuer l'étude de la tache par simulation. On introduira un pas de discrétisation pour découper le cylindro-parabolique en un ensemble de petites surfaces. Il restera alors à étudier l'équation exacte de la tache de chaque surface élémentaire.

Puissance thermique collectée et répartition de flux pour le cylindro-parabolique :

Sur la figure 60, nous voyons que selon la position de la cible la collection sur celle-ci peut s'effectuer soit sur sa face "avant" (placée vers le sommet de la parabole), soit sur sa face "arrière" (face placée vers l'extérieur) soit sur ses deux faces. Ces trois types de collection pourront être caractérisés par une gamme de valeur donnée à  $\theta$ .



- Figure 69 -

Nous allons effectuer les calculs suivants dans le cas de la face "avant" et donnerons ensuite les résultats dans les deux autres cas.

Puissance concentrée sur la cible "avant"  $P$ .

Afin de travailler avec une variable sans dimension, nous utiliserons la puissance réduite  $N_p$  telle que :

$$N_p = \frac{P}{q_s \cdot \rho' \cdot L} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} q_s = \text{énergie incidente W/m}^2 \\ \rho' = \text{coefficient de réflexion de la parabole.} \\ L = \text{Longueur du collecteur} \end{cases}$$

$$q_s \cdot \rho' \cdot L \rightarrow W = \frac{W}{m^2} m^2$$

Nous décomposerons  $P$  en  $P_1$  et  $P_2$ ; ( $P = P_1 + P_2$ ) de telle façon que  $P_1$  corresponde à la zone 1 et  $P_2$  à la zone 2 ; on aura alors :

$$P_1 = 2 \int_0^{\alpha'_1} q_s \rho' L da \quad (19)$$

avec

$$da = rd\theta = \frac{2f}{1 + \cos\theta} d\theta$$

$$P_1 = 2 \int_0^{\alpha'_1} q_s \rho' L \frac{2f}{1 + \cos\theta} d\theta = 4 \cdot q_s \cdot f \cdot \rho' \cdot L \cdot \text{tg} \frac{\alpha'_1}{2} \quad (20)$$

$$\text{d'où} \quad N_{p1} = \frac{4 q_s \rho' \times L f \times \text{tg} \frac{\alpha'_1}{2}}{q_s \cdot \rho' \cdot f \cdot L} = 4 \text{tg} \frac{\alpha'_1}{2} \quad (21)$$

Dans le cas où  $\theta$  est inférieur à  $\alpha'_1$  on aura :

$$N_{p1} = 4 \text{tg} \frac{\theta}{2}$$

$N_{p1}$  est donc ainsi indépendant de  $\theta$  mais dépend de l'angle critique  $\alpha'_1$ .

Pour ce qui est du calcul de  $P_2$  dans la zone 2 nous allons utiliser le facteur de contribution  $C(\theta)$ .



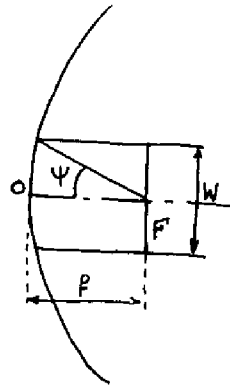
$$\begin{aligned}
 P_2 &= 2 \int_{\alpha'_1}^{\Theta} c_o(\theta) \cdot P(\theta) \cdot d\theta = 2 \int_{\alpha'_1}^{\Theta} I \cdot \rho' L \cdot \cos \frac{\theta}{2} da \\
 &= 2 \int_{\alpha'_1}^{\Theta} I \cdot \rho' L \cdot \frac{\cos \theta}{2} \cdot \rho \cdot \frac{d\theta}{\cos \frac{\theta}{2}} \quad (22)
 \end{aligned}$$

Si on introduit :

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{2f}{1 + \cos \theta} \\ \text{et } B \end{aligned} \right\} \Rightarrow N_{p_2} = 2B \int_{\alpha'_1}^{\Theta} \cos \theta \left( 1 - \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) d\theta$$

$$\text{soit } N_{p_2} = 2B \left[ \sin \theta - \sin \alpha'_1 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} (\cos \theta - \cos \alpha'_1) \right] \quad (23)$$

Il nous faut maintenant tenir compte du fait que la cible fait ombre sur la parabole.



- Figure 70 -

$$\Psi = \operatorname{Arc} \operatorname{tg} \frac{W}{2f}$$

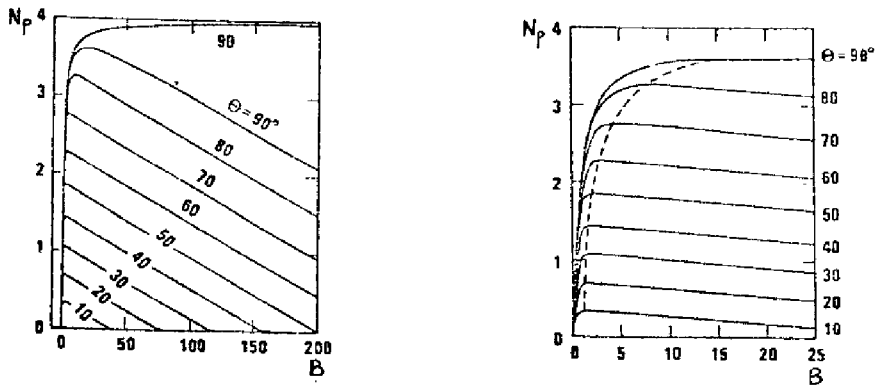
$$\Psi = \operatorname{Arc} \operatorname{tg} \left[ B \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right] \quad (24)$$

$$\text{Soit } N_{p_1} = 4 \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha'_1}{2} - \operatorname{tg} \frac{\Psi}{2} \right)$$

$$\text{d'où } N_p = 4 \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha'_1}{2} - \operatorname{tg} \frac{\Psi}{2} \right) + 2B \left[ \sin \theta - \sin \alpha'_1 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} (\cos \theta - \cos \alpha'_1) \right] \quad (25)$$

$$\text{si } \Psi < \theta < \alpha'_1 \Rightarrow N_p = 4 \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha'_1}{2} - \operatorname{tg} \frac{\Psi}{2} \right) \quad (26)$$

$$\text{si } \Psi > \alpha'_1 \Rightarrow N_p = 2B \left[ \sin \theta - \sin \Psi + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} (\cos \theta - \cos \Psi) \right] \quad (27)$$

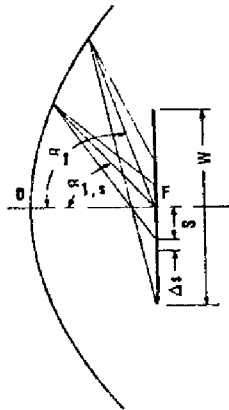


- Figure 71 -

La courbe supérieure représente le cas pour lequel on néglige les effets d'ombre ( $\theta = 90^\circ$ ). La rapide croissance de  $N_p$  pour  $B$  faible correspond au fait que  $\alpha_1'$  croît rapidement pour les basses valeurs de  $B$  (figure 63).

Distribution de la densité de puissance sur le récepteur face avant :

Si nous localisons un point de la cible de la façon suivante :



- Figure 72 -

Soit  $L$  la "longueur" de la cible et  $P_s$  la puissance concentrée sur l'aire  $W$ .  
On aura une densité de puissance :

$$i = \frac{1}{2L} \cdot \frac{dP_s}{ds} \quad \text{kw/m}^2$$

et un facteur de concentration local :

$$r_c = \frac{i}{q_s \rho'} = \frac{1}{2q_s L \rho'} \cdot \frac{dp_s}{ds} \quad (28)$$

Si nous nous basons sur les équations 17, 24, 25 ; nous voyons que  $P_s$  est relatif à  $s$  à travers  $x$ , puisqu'en analogie avec 17, on a :

$$b_s = \frac{2s}{w} = \frac{2}{\cos \alpha'_{1,s} \cdot (1 + \cos \alpha'_{1,s}) \cdot (1 - \text{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \text{tg} \alpha'_{1,s})} \quad (29)$$

si bien que quand  $\Psi < \alpha'_{1,s} < \Theta$ , on a  $P_s$  depuis l'équation 25 et donc après calcul, on arrive à :

$$r_c = \text{cosec} \frac{\alpha}{2} \left[ \sin \left( \Theta + \frac{\alpha}{2} \right) - \sin \left( \alpha'_{1,s} + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (30)$$

$r_c$  est indépendant de  $B$ , il dépend à la fois de  $\Theta$  et de  $s$ , qui déterminent  $\alpha'_{1,s}$ . La valeur de  $r_c$  décroît quand  $\Theta$  croît et que  $s$  décroît également.

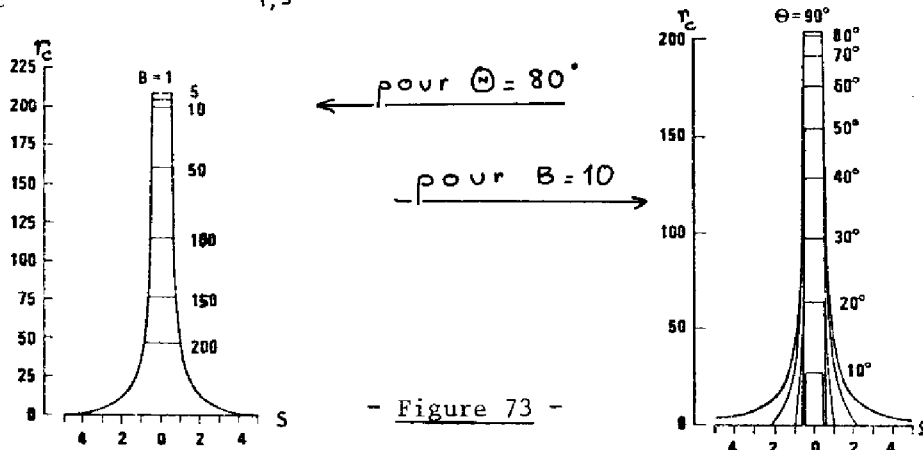
Si  $\alpha'_{1,s} < \Psi$

$$r_c = \text{cosec} \frac{\alpha}{2} \left[ \sin \left( \Theta + \frac{\alpha}{2} \right) - \sin \left( \Psi + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (31)$$

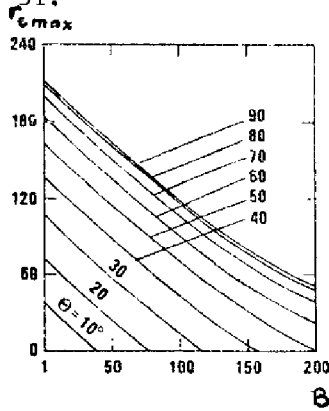
Dans ce cas,  $r_c$  est indépendant de la portion du point et ne dépend donc uniquement que de  $\Theta$  et  $B$  qui détermine  $\Psi$ .  $r_c$  croît quand  $\Theta$  croît et que  $\Psi$  décroît c'est à dire quand  $B$  décroît.

Au centre de la cible, il y aura donc une région à densité uniforme qui inclue tous les points pour lesquels  $\alpha'_{1,s} < \Psi$ . Cette densité uniforme représente la valeur maximum sur toute la cible.

Dès que  $\alpha'_{1,s} > \Psi$ , la densité décroît et nous aurons même  $r_c = 0$  quand  $\alpha'_{1,s} = \Theta$  dans le cas où  $\alpha'_1 > 0$ .



Si nous traçons  $r_{c \max}$  en fonction de B nous aurons depuis les équations 30 et 31:



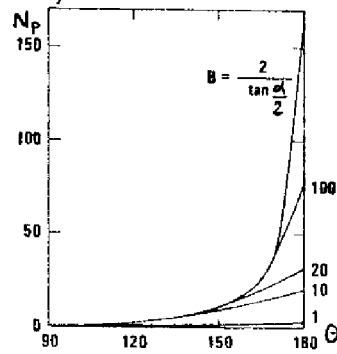
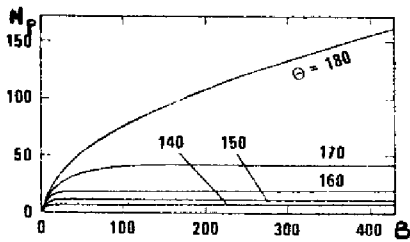
Résultats dans le cas de la cible "arrière" ou "avant-arrière".

Cas de la cible "arrière".

$\theta$  est supérieur à  $90^\circ$ . Le rayonnement concentré est incident à la partie "arrière" de la cible. Dans ce cas de figure, l'ensemble de la surface réflectrice est exposée au rayonnement incident et la "cible" n'ombre aucune zone.

Comme cela a été fait précédemment nous pouvons calculer :

$$N_p = 2 B \left( 1 - \sin \theta + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cos \theta \right)$$



Pour avoir  $N_{pT}$ , puissance réduite totale, il nous faudra prendre en compte le rayonnement incident qui frappe directement la cible sans jamais n'avoir été réfléchi sur la parabole. On aura :

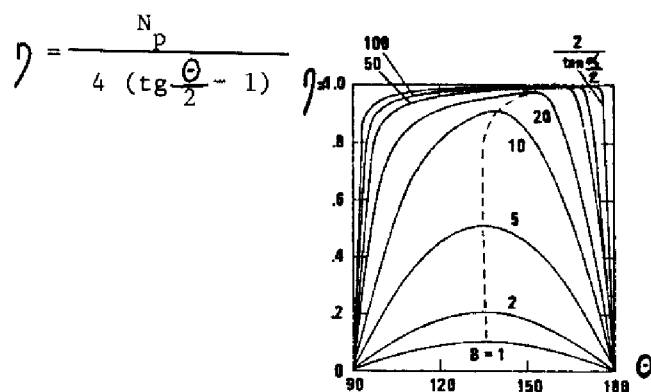
$$N_{pT} = \dot{N}_p + N_{pd}$$

avec 
$$N_{pd} = \frac{P_d}{q_s \frac{p}{L}} = 2 B \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

soit 
$$N_{pT} = 2 B \left( 1 - \sin \theta + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sin \theta + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)$$

$$N_{pT} = 2 B \left( 1 - \sin \theta \right) \cdot \left( 1 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)$$

L'efficacité de concentration sera de la forme :

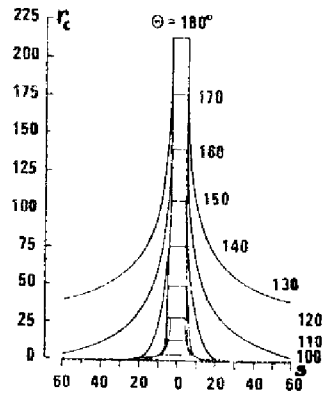


La concentration locale  $r_c$  :

$$\alpha'_{2,s} < \theta < \alpha'_{3,s} \quad ; \quad r_c = \operatorname{cosec} \frac{\alpha}{2} \left( \cos \frac{\alpha}{2} - \sin \left( \alpha'_{2,s} - \frac{\alpha}{2} \right) \right)$$

$$\alpha'_{3,s} < \theta \quad ; \quad r_c = \operatorname{cosec} \frac{\alpha}{2} \left( \cos \frac{\alpha}{2} + \sin \left( \alpha'_{2,s} - \frac{\alpha}{2} \right) - \sin \left( \alpha'_{2,s} - \frac{\alpha}{2} \right) - \sin \left( \theta - \frac{\alpha}{2} \right) \right)$$

$$\alpha'_{2,s} > \theta \quad ; \quad r_c = \operatorname{cosec} \frac{\alpha}{2} \left( \cos \frac{\alpha}{2} - \sin \left( \theta - \frac{\alpha}{2} \right) \right)$$



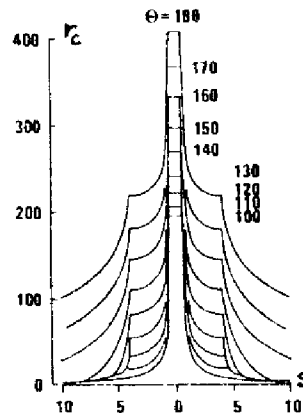
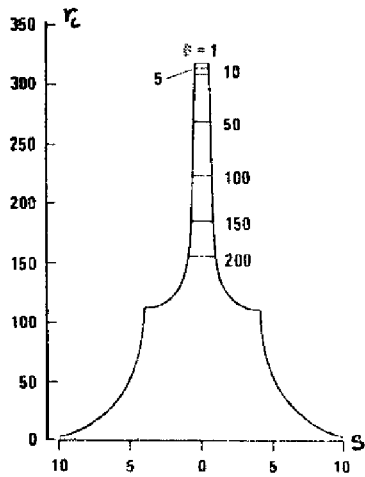
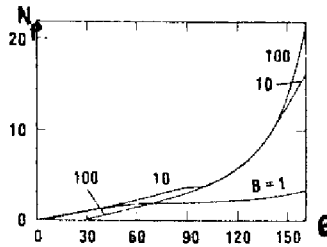
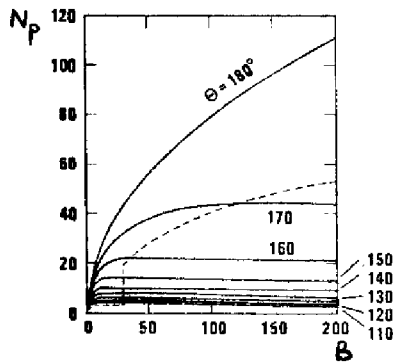
Cas de la cible "double-face" :

Dans ce cas nous aurons :

$$N_p = N_{p \text{ avant}} + N_{p \text{ arri\`ere}} + N_{pd}$$

( $N_{pd}$  est dû à l'éclairement direct de la cible)

d'où :



### III.3.2. La concentration par héliostats

Du fait des nombreux travaux effectués sur ce système de concentration et, en particulier, ceux d'étude et de simulation de l'opération SEESI du LAAS ; nous nous contenterons d'exposer certaines notions élémentaires qui nous seront utiles lors de l'analyse morphologique.

- Tâche fournie par un héliostat :

Un héliostat plan est constitué par un ensemble de miroirs carrés élémentaires. L'image de la tache solaire sur un plan perpendiculaire au rayon réfléchi passant par le foyer du récepteur est de dimension sensiblement égale à :

$$D_{im} \text{ tache} = 4 \cos(\vec{n} \cdot \vec{r}) + x \operatorname{tg}(32')$$

avec

L = Dimension du côté du miroir

$\vec{n}$  = Vecteur normal à l'héliostat

$\vec{r}$  = Vecteur rayon réfléchi

x = Distance du foyer du récepteur au centre du miroir

32' = Angle apparent du soleil.

Dans le second membre, le deuxième terme est dû au fait que le rayonnement solaire n'est pas issu d'une source ponctuelle et traduit donc le rayon du cône solaire.

#### III.3.2.1. Répartition du flux pour un héliostat plan

Au diamètre apparent de  $10^{-2}$  rd, on peut faire correspondre un angle solide solaire de  $\frac{\pi 10^{-4}}{4}$  st ( $\pi r^2$  avec  $r = \frac{10^{-2}}{2}$ ). Si nous faisons l'hypothèse que la luminance solaire  $W_0$  est constante en tout point du disque solaire, on pourra alors calculer l'énergie surfacique en un point du récepteur par rapport au rayon central du disque solaire.

$$\int_{\text{Disque solaire}} \Gamma(\omega) W_0 d\omega \quad \left\{ \begin{array}{l} W_0 \text{ en } \text{Wm}^{-2} \text{ st}^{-1} \\ \omega: \text{ angle solide} \end{array} \right.$$

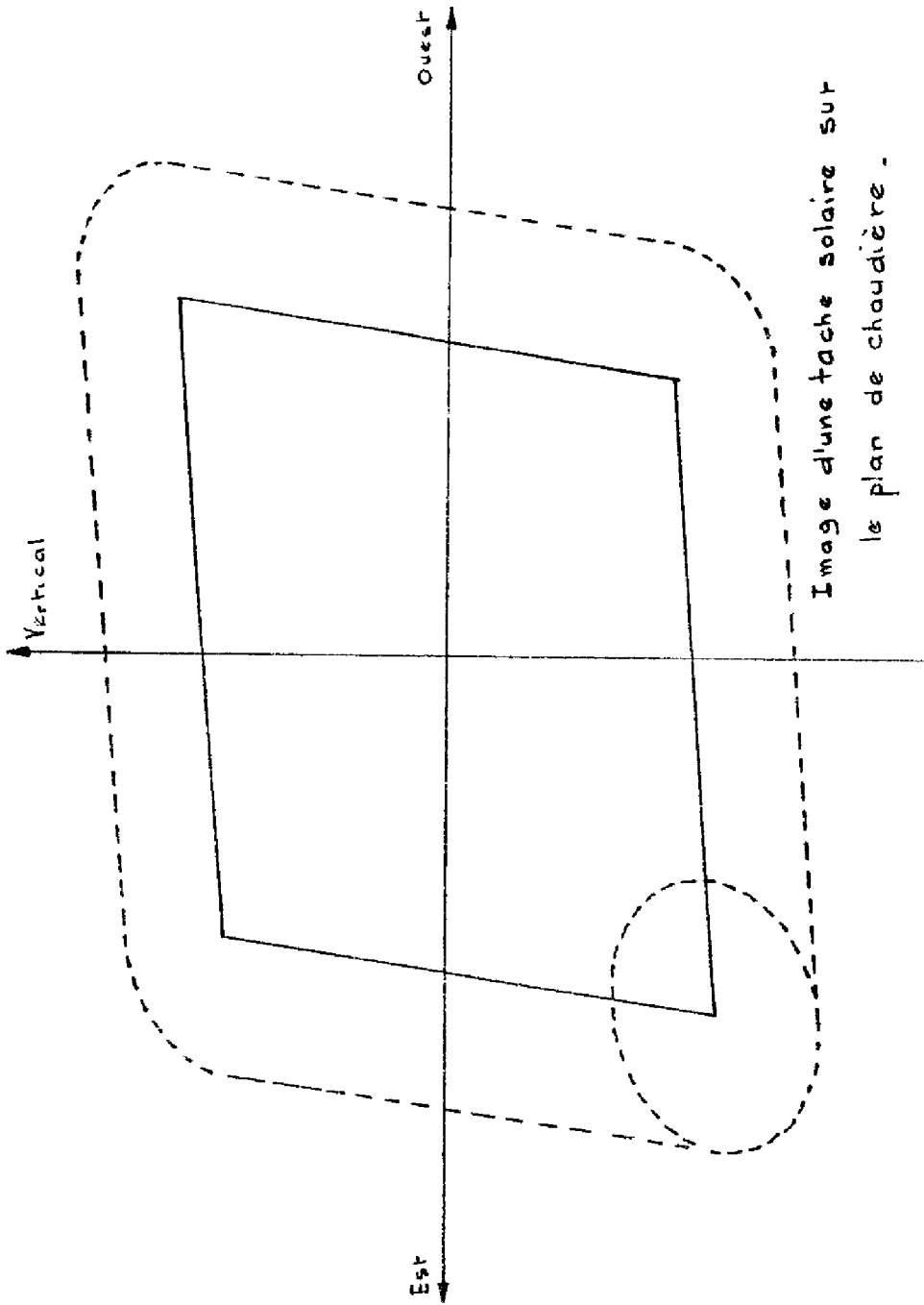


Image d'une tache soudure sur  
le plan de chaudière.

- Figure 74 -

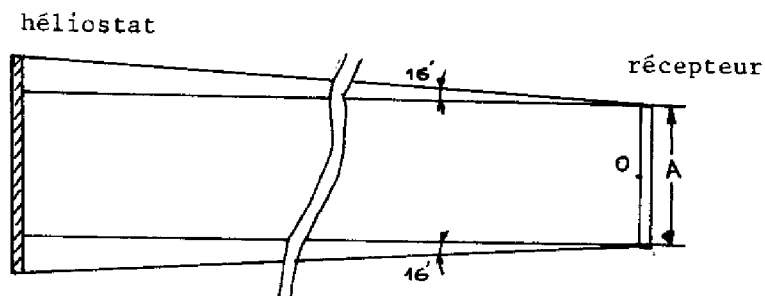


$\Gamma(\omega)$  correspond au fait que depuis un point du récepteur, on voit ou non un point du miroir. Ceci permettra de déterminer la zone de l'héliostat qui réfléchira un "Soleil entier" sur le récepteur.

$$\Gamma(\omega) = 1 \longrightarrow \text{On retrouve } W_0 \text{ sur le récepteur}$$

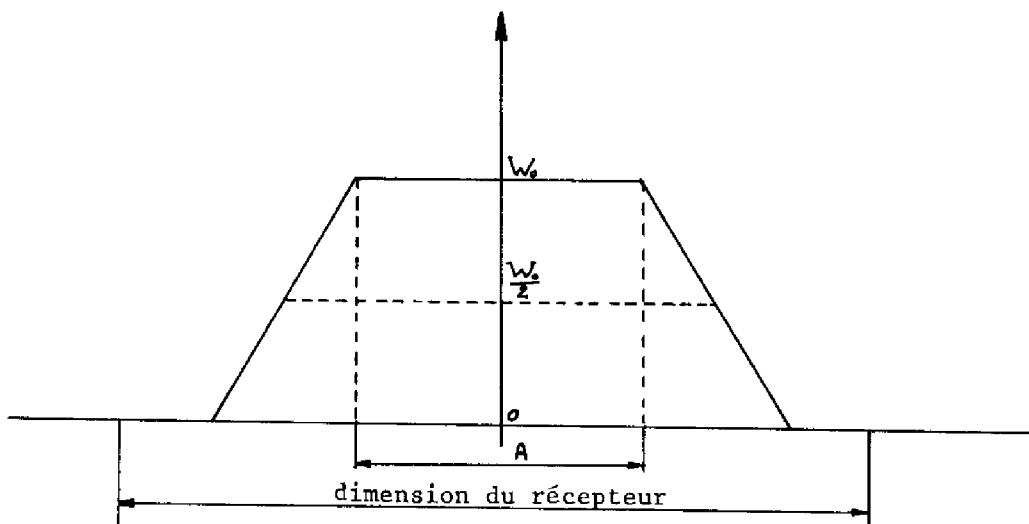
$$0 < \Gamma(\omega) < 1 \longrightarrow \text{On retrouve } \frac{W_0}{k} \text{ sur le récepteur } (k > 1)$$

Dans le plan, on aurait :



Plus on s'éloigne de O vers le bas plus W décroît linéairement puisque la luminance  $W_0$  est supposée constante.

La densité d'énergie sur le récepteur sera de la forme :

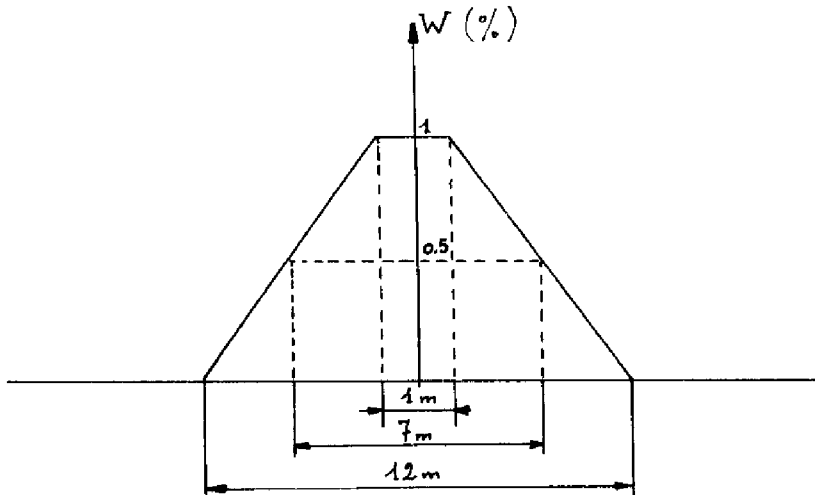


Exemple pratique de détermination de A :

Si l'héliostat a une aire de 49 m<sup>2</sup> et se situe à 500 m du récepteur.

$$\text{Demi-disque solaire} = \frac{500 \cdot 10^{-2}}{2} = 2,50 \text{ m}$$

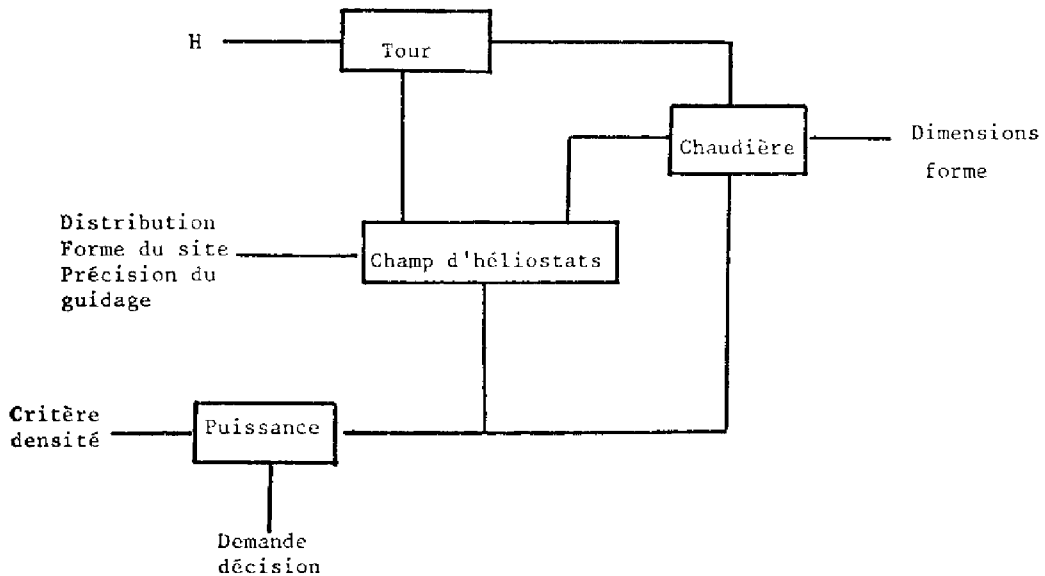
d'où



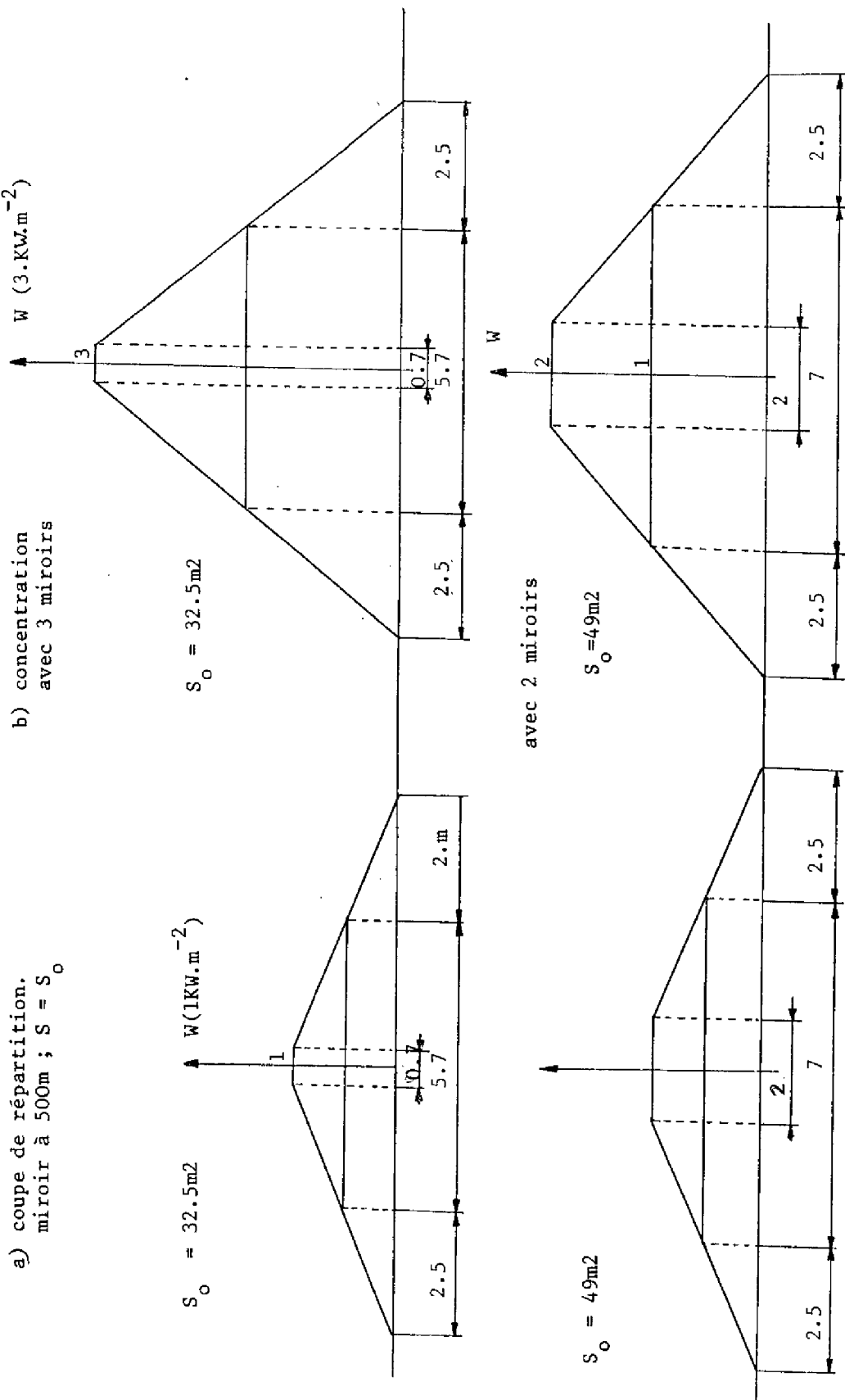
Page suivante, nous trouverons plusieurs exemples extraits de [9]

III.3.2.2. Vue d'ensemble d'une station énergétique solaire

Nous allons maintenant dégager les principaux paramètres liés à la station énergétique solaire à l'héliostats ; pour cela nous allons utiliser le schéma-bloc suivant :



Comparaison des répartitions d'énergie fournies par  
des héliostats de tailles 49m<sup>2</sup> et 32.5m<sup>2</sup>.



- Figure 75 -

Quant à l'étude par simulation de la tache fournie par l'ensemble des héliostats d'un champ ; elle a conduit aux résultats suivants :

- héliostats focalisants [10]

MIROIR(S) FOCALISANT

F1=330.0 F2=470.0 F3=530.0

DENSITE SUPERFICIELLE DE PUISSANCE SUR LA CHAUDIERE INCLINEE A 30 DEGRES  
TACHE GLOBALE SUR LA TOUR

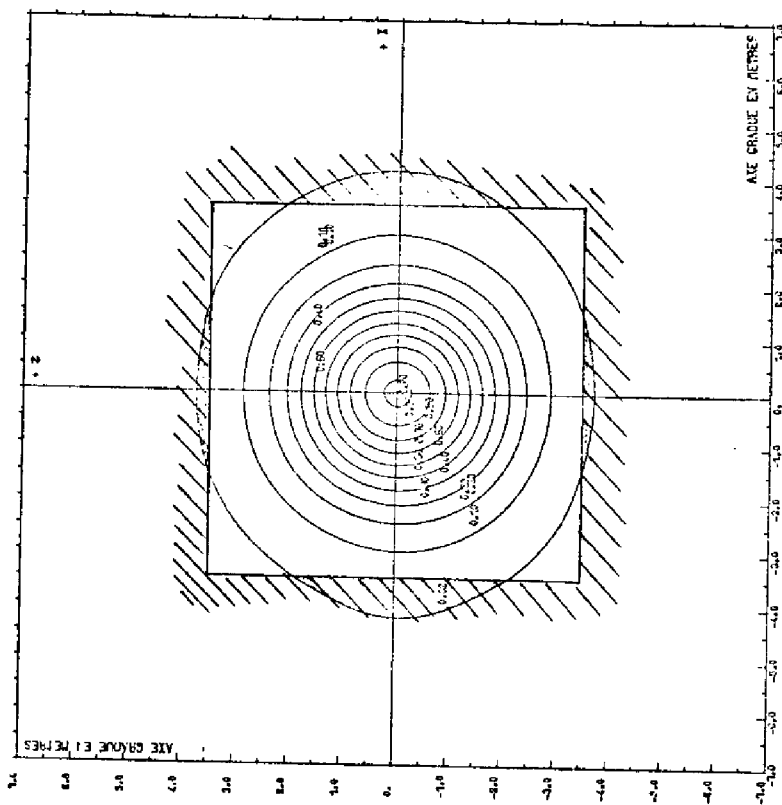
JOUR HEURE NSIT PAS DNTOT

3 12 17 0.5 556.5

DEPOINTAGE=0.00050 RADIAN (2 MRAD SUR R')

PUISSANCE TOTALE RECUE = 49980.84 KW

DENSITE MAXIMUM= 9.35



- héliostats plans [9]

DENSITE SUPERFICIELLE DE PUISSANCE SUR LA CHAUDIERE

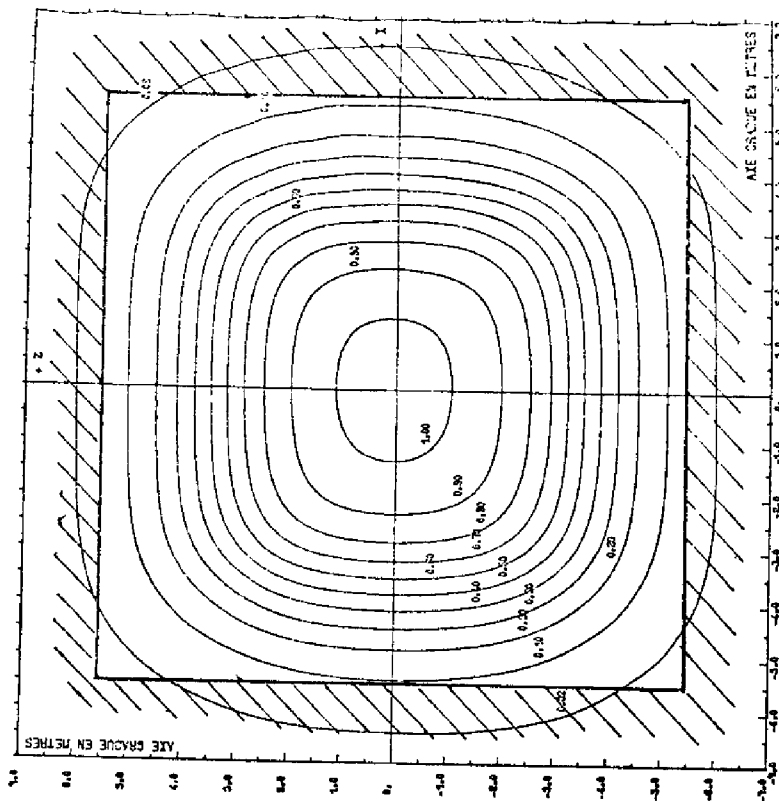
TACHE GLOBALE SUR LA TOUR

JOUR HEURE NSIT PAS DNTOT

1 12 17 1.0 1368.0

DEPOINTAGE=0.00010 RADIAN

PUISSANCE TOTALE RECUE = 51193.14 KW



- Figure 76 -

Pour tous les projets en étude, la puissance de la centrale est la première étape décisionnelle.

Elle est fixée soit par la demande en électricité, soit par une optimisation dont les critères -objectifs et subjectifs- sont le fruit de décisions et de données économiques. La définition même de la notion de puissance dépendra de l'utilisation faite de l'énergie produite et influera sur le critère.

Nous allons poser brièvement les problèmes inhérents aux deux grands sous-ensembles constituant la centrale :

- la partie optique c'est à dire le champ d'héliostats
- la partie conversion de la chaleur recueillie dans la chaudière en énergie électrique.

Au niveau des héliostats, outre les choix technologiques relatifs à la structure porteuse, à la forme géométrique du miroir (plan ou focalisant) et au type d'automatisation, se posent les problèmes liés aux effets de masquage des miroirs et à la précision de guidage des héliostats.

Dans un champ d'héliostats, à un moment donné, une partie de la surface réfléchissante est inutilisée. En raison de la proximité des miroirs, une partie du rayonnement solaire incident devant être captée par un miroir est interceptée par ses voisins ; c'est ce qu'on appelle l'effet d'ombre. De même, une partie du rayonnement réfléchi par les miroirs est bloqué par ses proches.

Il résulte de cela que la répartition optimale des miroirs dans le champ prendra en compte le critère de minimisation des effets de masquage.

Comme deuxième critère d'optimisation, on cherchera à maximiser le rendement énergétique annuel.

Une bonne connaissance du champ passe par l'étude de nombreux paramètres tels que :

- surface du miroir
- surface totale réfléchissante
- configuration du site
- implantation des héliostats
- hauteur de la tour.

Jusqu'à présent dans la simulation, le laboratoire a fixé la taille et la forme du miroir ainsi que la hauteur de la tour.

Une fois l'implantation des héliostats dans le champ effectuée, se pose le problème de la précision de guidage puisque le rayonnement réfléchi doit être dirigé sur une chaudière de faibles dimensions vue des miroirs. Une bonne orientation de ces derniers permettra non seulement une minimisation des pertes de collection mais aussi une répartition de la densité de puissance sur la chaudière nécessaire au bon fonctionnement du cycle thermodynamique.

La vapeur produite au niveau de la chaudière circule dans un turbo-alternateur afin de produire de l'électricité. A ce niveau, la technique est bien maîtrisée car il s'agit du même système que celui utilisé dans les centrales classiques.

En revanche, il reste une inconnue liée au caractère aléatoire de l'ensoleillement. C'est une inconnue à la fois d'ordre technologique (chaudière) et économique (production fatale ou prévue).

Le premier point consiste dans le fait que les passages nuageux en interrompant l'apport énergétique au niveau de la chaudière, y créent d'importantes contraintes thermiques.

Cette production sujette à des interruptions passagères peut être modulée de différentes manières :

- par insertion d'un système de stockage :
  - \* un stockage "nébulaire" de courte durée (1h ou 2h)
  - \* un stockage pour l'étalement de la puissance le long de la journée (15 à 24 h)

- \* un stockage pour la fourniture d'énergie aux heures de pointe
  - \* un stockage permettant un report de la production à l'échelle de quelques jours afin d'utiliser l'énergie produite pendant les week-ends ou bien "d'effacer" l'absence de soleil pendant quelques jours
  - \* un stockage saisonnier.
- par le couplage avec une centrale classique :
- \* couplage thermique : production de vapeur par un système auxiliaire (centrale mixte)
  - \* couplage électrique.

Déjà, d'un point de vue optique, de ce qui précède on peut faire apparaître les divers rendements intervenant lors de la concentration de l'énergie solaire par les héliostats sur le récepteur :

- Un rendement cosinus-ombre ( $\eta_{co}$ ) qui tient compte du cosinus dû à l'orientation de l'héliostat et des phénomènes d'ombre et de masquage mutuels ;
- Un rendement  $\eta_{ab\ op}$  qui prend en compte le fait que la surface réfléchissante n'est pas idéale, et présente des aberrations optiques ;
- Un rendement relatif à l'imprécision de positionnement de l'héliostat  $\eta_{er\ pos}$  ;
- Et enfin, un rendement qui n'est autre que le coefficient de réflexion  $\rho$  de la surface réfléchissante  $\eta_p$ .

Nous concluons cette brève introduction aux concentrateurs à héliostats par quelques valeurs numériques :

- Comme facteur de concentration géométrique théorique maximum ; on aura :

$$C_{\max} = \frac{\text{Surface réfléchissante}}{\text{Surface récepteur}}$$

exemple :

$$a) \left. \begin{array}{l} 1500 \text{ héliostats de } 50 \text{ m}^2 \\ \text{récepteur de } 8 \times 8 \text{ m}^2 \end{array} \right\} C_{\max} = \frac{75 \cdot 10^3}{64} \# 1200$$

D'après les courbes de densité superficielle de flux (figure 76), nous voyons qu'en réalité le flux n'est pas réparti uniformément.

- La puissance thermique théorique maximale :

$$P_{\max} = (\text{Surface réfléchissante}) \cdot W_o$$

$$\text{si } W_o = 1 \text{ kW/m}^2 \longrightarrow P_{\max} = 75 \text{ MW}_{\text{th}}$$

De ce fait, il va falloir inclure toute une série de rendements en cascade pour obtenir une valeur réaliste de la puissance thermique collectée  $P_{\text{th}}$ .

Pour celà, nous allons utiliser une formule prenant en compte les rendements précédemment définis :

$$P_{\text{th}} = \eta_{\text{champ d'héliostats}} \times P_{\max}$$

$$P_{\text{th}} = \left[ \eta_{\text{co}} \cdot \eta_{\text{abop}} \cdot \eta_{\text{epos}} \cdot \eta_{\text{p}} \right] \cdot P_{\max} \quad [11]$$

Si nous donnons à ces différents rendements des valeurs qui sont communément admises :

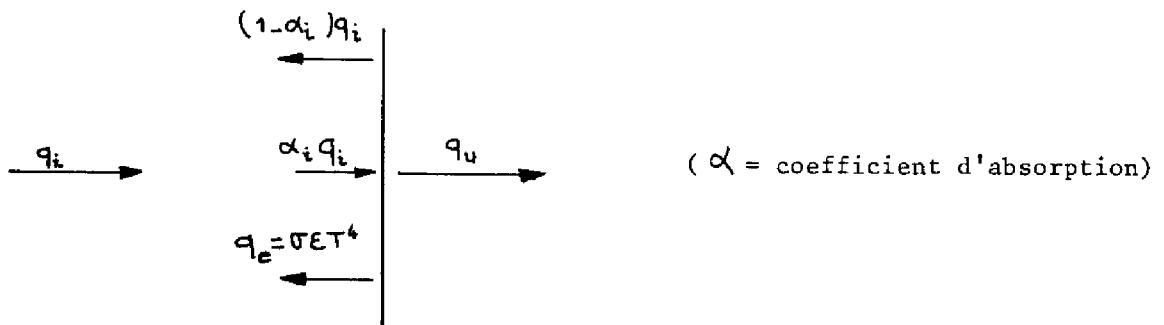
$$\eta_{\text{ch d'h}} = 0,85 \times 1 \times 0,95 \times 0,82 = 0,66 \quad [12]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{\text{co}} = 0,85 \\ \eta_{\text{ab op}} = 1 \\ \eta_{\text{epos}} = 0,95 \\ \eta_{\text{p}} = 0,82 \end{array} \right. \quad P_{\text{th}} = 0,66 \cdot 75 \cdot 10^6 \# 50 \text{ MWth.}$$



### III.3.3. Introduction aux problèmes thermiques [13]

Le bilan thermique au niveau de l'élément unitaire d'une surface servant à la captation du rayonnement solaire peut s'écrire simplement en ne considérant, dans une approche très simplifiée, que les échanges par rayonnement et par conduction (en négligeant les échanges par convection).



On peut alors définir un rendement de captation :

$$\frac{q_u}{q_i} = \eta = \alpha_i \left[ 1 - \frac{\epsilon \sigma T^4}{\alpha q_i} \right]$$

Dans le cas, où l'on recueille  $q_i$  non plus sur un plan mais dans une cavité, la formule précédente restera valable si nous remplaçons  $\alpha$ ,  $\epsilon$ ,  $\eta$  par  $\alpha_o$ ,  $\epsilon_o$ ,  $\eta_o$  qui peuvent être calculés comme cela a été fait dans le document [14].

Par exemple,  $\epsilon_o$  serait de la forme :

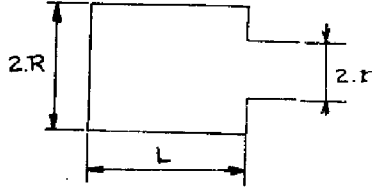
$$\epsilon_o = \frac{\epsilon \left[ 1 + (1 - \epsilon) \left( \frac{\Delta}{s} - \sin^2 \theta \right) \right]}{\epsilon (1 - \frac{\Delta}{s}) + \frac{\Delta}{s}}$$

(nous aurions la même formule pour  $\alpha_o$ , en remplaçant  $\epsilon$  par  $\alpha$ ).

- Avec
- $\epsilon$  = facteur d'émission propre du matériau
  - $\epsilon_o$  = facteur total d'émission dans le cas de diffusion multiple dans une cavité.
  - $\theta$  = 1/2 angle d'ouverture de l'angle solide sous lequel on voit l'orifice de la paroi opposée à celui-ci.
  - $\Delta$  = surface de l'orifice de la cavité
  - $s$  = surface de la paroi interne de la cavité.

exemple

Cas d'une cavité cylindrique à ouverture réduite selon [10] :



$$\left. \begin{aligned} A &= \pi \cdot r^2 \\ s &= 2 \pi \cdot R^2 + 2 \cdot \pi \cdot RL - \pi \cdot r^2 \end{aligned} \right\}$$

$$\sin^2 \theta = \frac{1}{1 + \left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

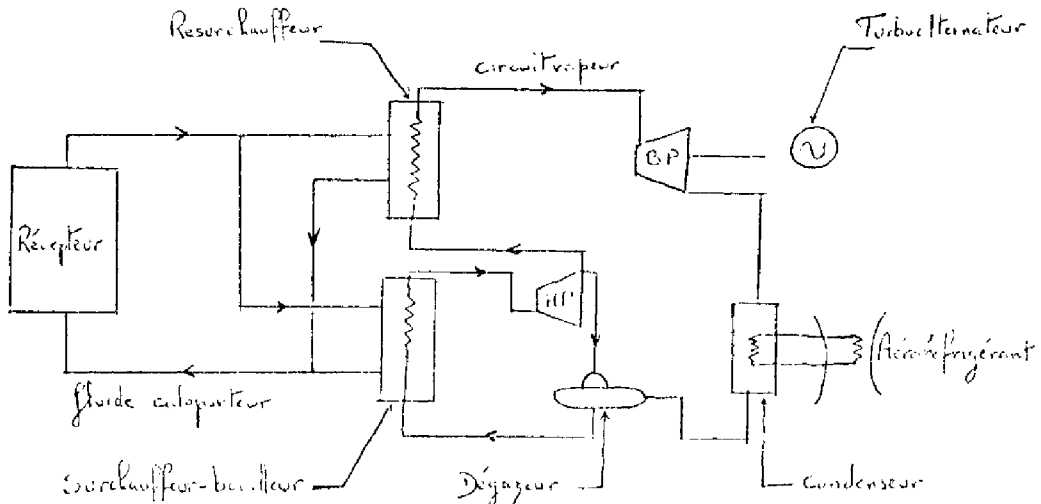
$$\frac{A}{s} = \frac{\left(\frac{r}{R}\right)^2}{2 \left(1 + \frac{L}{R}\right) - \left(\frac{r}{R}\right)^2}$$

En définitive, nous aurons donc :

$$\eta_o = \alpha_o \left[ 1 - \frac{\epsilon_o \cdot \sigma \cdot T^4}{\alpha_o \cdot q_i} \right]$$

L'énergie ainsi concentrée puis absorbée par le récepteur devra être cédée par ce dernier à un fluide caloporteur qui "conduira" l'énergie récupérée jusqu'au lieu d'utilisation. Nous retrouverons donc ici une formulation identique à celle développée dans la première partie lorsque nous avons étudié les différents bilans thermiques à prendre en compte lorsque l'énergie collectée est "transférée" du corps noir au système de chauffage solaire de l'habitat.

Dans le cas particulier où le but visé est la production d'énergie électrique, il y aura en fin de "chaîne" énergétique un système de conversion thermoélectrique dont le principe de réalisation pourra être le suivant :



## CONCLUSION

Alors que le collecteur-plan ne demande pas un positionnement rigoureux ; les concentrateurs, en général, se doivent d'être "pointés" avec une grande précision de façon à concentrer le rayonnement solaire incident sur une cible de faibles dimensions par rapport à la surface réfléchissante. Bien que n'utilisant que le rayonnement solaire direct, ces concentrateurs vont permettre d'atteindre des températures suffisamment élevées pour pouvoir envisager dans des conditions économiques intéressantes, certaines applications telle la production d'électricité au moyen d'un cycle thermodynamique.

Une station énergétique solaire constituée par un grand nombre de petits réflecteurs est composée de deux parties essentielles qui sont le système de réflecteurs et le transformateur de la radiation solaire en d'autres formes d'énergie.

Le système de réflexion dont on a effectué, ici, une présentation des propriétés optiques et thermiques représente une part importante du coût global de la station énergétique solaire ; de plus c'est le premier maillon de la chaîne énergétique qui lie le rayonnement solaire à l'énergie produite.

BIBLIOGRAPHIE

## CHAPITRE III

- 1 E. THIEBAUT, P. LABAT  
Analyse succincte des filières d'utilisation de l'énergie solaire.  
Note interne LAAS NI 76109
- 2 IT. ALANDIEV, V.A. BAUM, B.A. GARF, ZN. MALEVSKY  
Stations énergétiques solaires. Problèmes et perspectives.  
Analyse et Prévision T XVII (1/74) pp. 3-8.
- 3 M. CLAVERIE  
Point sur le calcul d'actualisation dans les travaux du PIRDES.
- 4 F. MORA-CAMINO  
A long-run economic and energetic model for an industrial country.  
Proceeding of the seventh annual Pittsburgh Conférence.
- 5 D. FINON  
Le modèle énergie.  
Thèse de 3ème cycle, Spécialité "économie de l'énergie" Mars 1975.
- 6 VACLAY SMIL  
Energy and the environnement.  
Scénarios for 1985 and 2000. The futurist Février 1974.
- 7 E. COOK  
Energy sources for the future.  
The futurist August 1972
- 8 KAMAL-ELDIN HASSAN, MOHAMED FANZI EL-REFAIE  
Theoretical performance of cylindrical parabolic solar concentrator.  
Solar energy vol. 15 pp. 219-244 - 1973.
- 9 C. BOURDEAU, G. VIALARET  
Problèmes posés par l'automatisation d'un champ d'héliostats.  
Note technique LAAS-SEESI 75T37.

- 10 A. GIRAUD, P. CARRAUD  
Aide à la synthèse d'un système de concentration d'une centrale  
hélio-thermo-électrique de 10 MWe.  
(à paraître)
- 11 JL. ABATUT  
Production d'électricité par conversion thermodynamique de l'énergie  
solaire.  
Projet 10 MWe. Revue de l'énergie (à paraître Avril 1977)
- 12 JL. ABATUT, A. ACHAIBOU  
Analyse paramétrique du projet de centrale HTE.  
(à paraître)
- 13 C. ROYERE  
Remarques sur les chaudières solaires.  
Them 76-03.
- 14 A. GOUFFE  
Transmission de la chaleur par rayonnement.  
Cahier I, pp 30-35, Collection ANRT Eyrolles-Gauthier-Villars 1968
- 15 A. MOUMOUNI  
Captation avec concentration du rayonnement solaire.

## DEUXIEME PARTIE

---

AIDE A LA CONCEPTION

APPLICATION DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

-:-



## CHAPITRE IV

---

ESSAI MÉTHODOLOGIQUE D'AIDE À LA CONCEPTION





## INTRODUCTION

Un système technologique complexe pouvant prendre diverses configurations, il nous a semblé intéressant d'essayer "d'automatiser" la recherche des formes qu'il peut prendre.

Un système sera ici considéré comme étant constitué d'un ensemble d'éléments, chaque élément appartenant à une classe, chaque classe ayant un rôle bien précis dans le système global. Après avoir déterminé tous les éléments envisageables de chaque classe et avoir effectué une étude minutieuse des liaisons pouvant exister entre éléments de classes distinctes ; il restera à recenser toutes les concaténations possibles entre éléments de façon à fournir un ensemble d'images "structurelles" du système. A chaque élément pourront être, pour la suite, associés des paramètres de valuation et des critères prédicatifs.

De ce point de vue, une solution au problème de conception est constituée par un ensemble d'éléments vérifiant les relations de compatibilité structurelle et des critères prédicatifs propres aux divers paramètres de ces éléments. Une telle solution, si elle existe, est rarement unique ; l'aide à la conception se ramènera donc à la génération automatique de l'ensemble complet ou partiel des solutions ordonnées suivant certains critères pour permettre au concepteur de faire un choix exhaustif dominant l'aspect combinatoire.

### IV.1. DÉFINITIONS [1]

Par définition, une structure est l'ensemble fini des relations d'influence entre les éléments d'un ensemble fini d'éléments. Du fait que la relation L des influences est binaire, une structure se traduira par un graphe où plutôt un multigraphe puisque la multiplicité des influences entre propriétés fait qu'il peut exister plusieurs relations distinctes entre deux éléments A et B qui s'influencent. Ce multigraphe peut posséder plusieurs composantes totalement disjointes. Un multigraphe est dit connexe si, entre une paire quelconque de ses sommets, il existe au moins une chaîne d'arêtes (si on néglige l'orientation des arcs) successives reliant cette paire. Il existe des multigraphes connexes qui n'ont aucun cycle, ce sont des arbres.

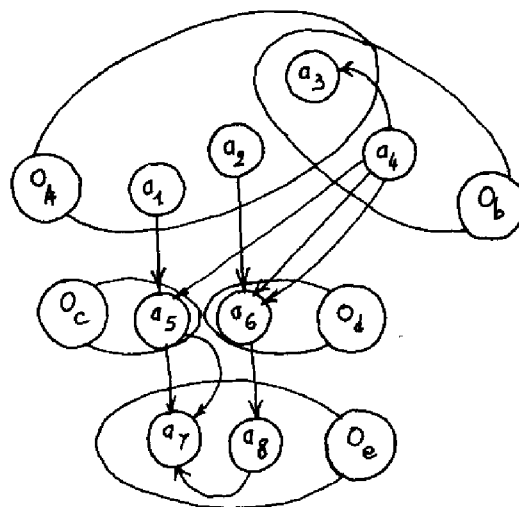
Pour définir ce qu'est une structure, on est resté au premier stade de l'explication scientifique, c'est à dire au niveau structuraliste.

Pour progresser, il faut préciser davantage les attributs des éléments. L'ensemble des propositions qualitatives ou quantitatives que l'on va définir pour une propriété constituera les modalités de l'attribut correspondant. Un jeu particulier de modalités attaché aux attributs d'un élément constitue un état de cet élément. Il arrive que l'on puisse préciser la totalité des états envisageables ; dans ce cas, on dit que l'élément ainsi totalement précisé est un objet. Par définition, un objet est un élément plus l'ensemble des états possibles de cet élément. Un élément dont certains attributs seulement on pû être qualifiés par des modalités, d'autres attributs n'ayant pu l'être, est un quasi-objet et non un véritable objet.

Par définition, un processus est un triplet constitué par des objets et par leur relation d'influence.

Un ensemble de processus interconnectant des objet constitue ce que l'on appelle un système. En d'autres termes, un système est un ensemble fini d'objets qui s'influencent de telle sorte que la structure d'influence soit connexe. De ce fait, le système possède une globalité qui lui est spécifique.

Comme les objets qui constituent le système peuvent être interdépendants, la structure d'un système est un multigraphe.



l'objet  $O_A$  inclut les éléments  $a_1, a_2, a_3$ .

Objets indépendants :

$O_C, O_D, O_E$

Objets interdépendants :

$O_A, O_B$

Par définition, on appelle forme d'un système, un ensemble d'états particuliers des objets constituant le système.

Etant donné, pour un système, une structure stable de processus, l'ensemble des formes possibles constitue la morphologie de ce système.

Il n'est pas à priori nécessaire de considérer que la solution du problème à résoudre prend obligatoirement la forme d'une structure de système. En effet, dans la plupart des cas d'analyse morphologique, il n'y a pas à proprement parler d'influence bien définie entre les éléments. La considération d'un système peut être intéressante pour préciser les incompatibilités et c'est pour cela que nous l'avons utilisée. En effet, nous verrons que la partie la plus originale concernant notre travail dans l'analyse morphologique est celui relatif aux arguments de valuation utilisés au moyen de critères prédictifs.

## IV.2. L'ANALYSE MORPHOLOGIQUE [2]

### IV.2.1. Introduction

Devant le problème ainsi posé, il nous reste à choisir la méthode à utiliser. Parmi les méthodes de prévision technologique, seule l'analyse morphologique a retenu notre attention. Ayant un caractère discontinu affirmé, elle tranche sur des méthodes traditionnelles continues qu'elles soient individuelles, comme l'extrapolation de la tendance ou les modèles analogiques, ou collectives comme DELPHI ou les matrices d'interdépendance.

Orientée vers l'observation, l'analyse morphologique ne néglige pas pour autant une étude minutieuse des liaisons pouvant exister à l'intérieur d'une structure, d'une forme, d'où sa dénomination : morphologique. C'est donc avec les matrices d'interdépendance (qui, elles aussi, s'intéressent à l'importance des relations entre objets d'un système), une autre méthode de prévision que l'on peut inscrire dans le courant de pensée de l'analyse de systèmes.

Une certaine volonté d'aboutir s'affirme dans le choix et l'assemblage des éléments de la structure, et dans les restrictions qui sont apportées à cette dernière pour la rendre réalisable et calculable.

L'analyse morphologique [3] est une méthode d'aide à la créativité dans l'étude des systèmes complexes. On utilise pour détecter les innovations qui devraient apparaître dans un domaine déterminé ou pour stimuler l'imagination des chercheurs travaillant sur un problème donné. L'analyse morphologique a donc pour objectif d'une part de recenser toutes les solutions possibles d'un problème (toutes les formes), d'autre part de proposer des solutions nouvelles (nouvelles formes) à ce problème, enfin de rechercher toutes les applications que l'on peut faire d'une innovation dans un domaine donné. L'analyse morphologique ne s'applique qu'à des problèmes dont chaque solution est une combinaison relativement complexe.

Lorsqu'elle est utilisée comme méthode de créativité, son apport est d'autant plus intéressant que les éléments des systèmes étudiés sont fortement en interaction.

#### IV.2.2. La technique de l'analyse morphologique

L'expression "Analyse Morphologique" a été créée par F. ZWICKY [4,5] (un astrophysicien d'origine suisse qui a longtemps travaillé aux Etats-Unis), bien que la méthode soit, en fait, plus ancienne puisqu'on peut en attribuer la création au logicien et mystique majorquin Ramon LULL (1235-1315). L'analyse morphologique s'intéresse à la décomposition des structures en plusieurs classes. Elle exige, en premier lieu, que l'on décompose le problème étudié en une série de sous-problèmes d'importance relative comparable, de telle sorte que chaque solution déjà connue du problème général à résoudre se présente comme une combinaison particulière de réponses partielles aux divers sous-problèmes définis par l'analyse. Il est bien évident que ces classes nécessitent une réflexion extrêmement approfondie et un choix délicat. Respecter une certaine indépendance (éviter de représenter deux fois la même chose) mais surtout éviter d'oublier un niveau nécessaire à l'utilité de l'analyse sont déjà des

questions difficiles. En multipliant les classes, on élargit le système, mais son analyse devient vite impossible car il est trop complexe. En restreignant le nombre de classes, on risque de l'appauvrir et de ne plus rien apprendre. Il y a donc quelque part un compromis qui nécessite de nombreux tâtonnements. Arriver à ce compromis, c'est à dire réaliser la détermination des diverses classes caractéristiques du système. Toutes les solutions possibles, y compris celles qu'on ne pouvait imaginer directement seront mises à jour. Il ne faudrait pas, cependant, en déduire que l'analyse morphologique est purement exploratoire : le choix des différentes classes traduit l'affirmation d'une certaine volonté, d'une "normativité" de la part de l'expérimentateur. Comme tout travail prospectif, l'analyse morphologique nécessite une ligne directrice et une volonté d'aboutir ; ce qui revient à dire que la première phase de la démarche consiste à définir clairement l'objet de la recherche. Le soin apporté à la définition du problème a une influence capitale sur les chances de succès de l'analyse.

L'originalité de l'analyse morphologique réside dans le fait qu'elle ne cherche pas à entrer dans le détail des éléments du problème, mais, au contraire, à caractériser ce problème par un petit nombre de paramètres jugés importants.

"L'image" globale ainsi obtenue est plus parlante à l'imagination qu'une description trop fine où les détails cacheraient l'essentiel.

La recherche des solutions constitue la seconde phase de l'analyse. Elle s'effectue par la désignation des modalités qui satisfont chaque classe.

On recense donc pour chaque classe toutes les variantes connues y compris les variantes nouvelles encore au stade de projet. On va donc associer à chaque objet l'ensemble des états qu'il peut prendre. Il est bien évidemment exclu de considérer comme états distincts des "synonymes".

Il peut exister des incompatibilités entre certains éléments de deux ou plusieurs classes. Il va donc falloir étudier les relations existant entre éléments de classes différentes. Cette approche s'effectue

au moyen de "tableaux morphologiques". Certains tableaux ont toutes leurs cases remplies ; certains autres - et ce sont autant de directions intéressantes - ont encore des cases vides. Il est certain que LE VERRIER et son étude du système solaire, que les électroniciens du début de l'ère du transistor (brevétant tour à tour les différentes "jonctions" imaginables) n'ont pas raisonné autrement, remplissant les cases vides décelées par une structuration de leurs connaissances et réflexions.

L'avantage de l'analyse morphologique est de rendre systématique ce raisonnement.

On obtient ainsi une sorte d'arbre dont chaque branche (passant par un état et un seul par classe) représentera une solution imaginable. Cette représentation faite, bien entendu, penser aux arbres de pertinence.

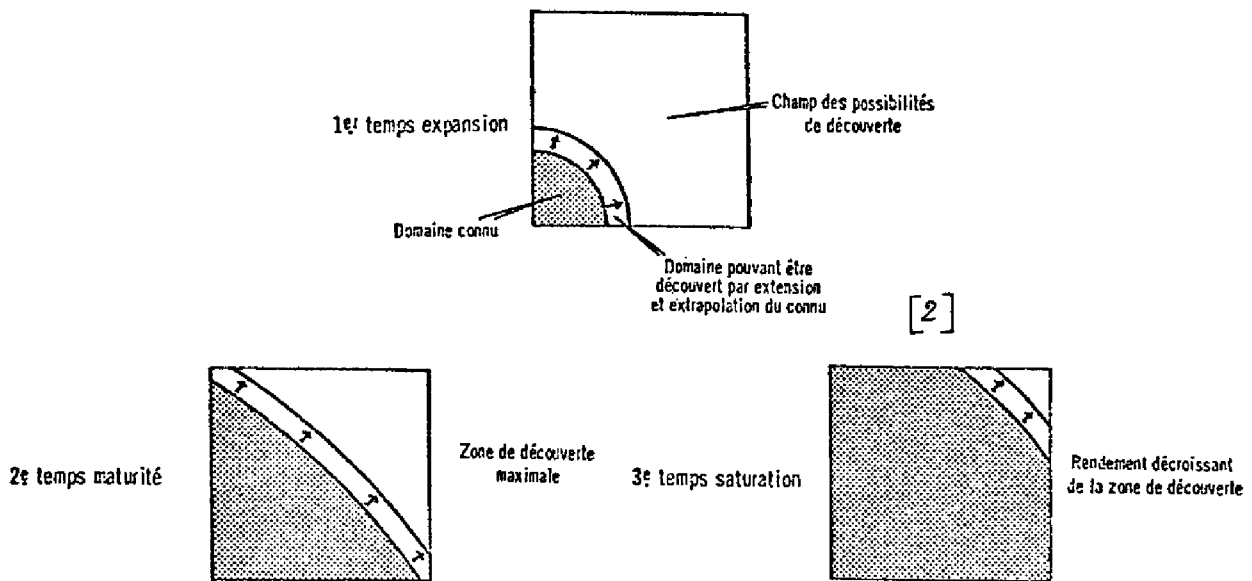
Une fois qu'a été déterminé l'ensemble des modalités c'est à dire qu'on a formé l'espace morphologique, on peut rechercher les solutions. Le nombre de solutions que peut proposer un espace morphologique même de dimensions restreintes est extrêmement élevé. En l'absence d'interdictions,  $N$  classes pouvant contenir chacune  $k$  éléments fournissent  $k^N$  solutions. Parmi elles, certaines sont très proches. On pourra définir la "distance morphologique" c'est à dire la similarité existant entre les formes que peut prendre le système. Ces formes formeront donc un "voisinage topologique". Cette notion de voisinage peut d'ailleurs être généralisée en considérant plusieurs voisinages distants de un, deux, etc... états.

Une combinaison linéaire de ces voisinages formera une "surface morphologique" (au moyen d'une pondération de 1 pour la distance 1,  $1/4$  pour la distance 2,  $1/n^2$  pour la distance  $n$ , montrant ainsi la confiance que l'on peut attendre de solutions éloignées).

Il pourra également être intéressant de prévoir la possibilité de n'explorer qu'une partie du champ des solutions.

#### IV.2.3. Les difficultés de mise en oeuvre de l'analyse morphologique

Les éventuelles découvertes auxquelles pourra aboutir l'usage de l'analyse morphologique, seront d'importance variable suivant le domaine étudié. Si l'on représente ce dernier par un carré, on se rend compte immédiatement en effet que la frange qui peut faire l'objet de prévisions nouvelles originales, varie en fonction de ce qui est déjà connu schématisé sous la forme d'une portion de cercle.



- Figure -

Cette représentation qui n'est pas sans rappeler les courbes en S et les modèles analogiques, peut faire l'objet d'un calcul concernant la zone de découverte maximale. Supposons que l'on étudie une structure à trois classes  $C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$ , chacun d'eux ayant trois éléments :

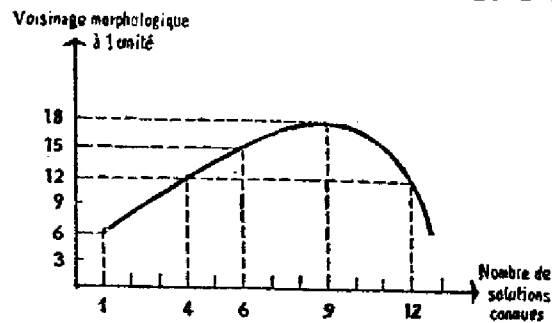
$$c_1 \begin{cases} e_{11} \\ e_{12} \\ e_{13} \end{cases} ; \quad c_2 \begin{cases} e_{21} \\ e_{22} \\ e_{23} \end{cases} ; \quad c_3 \begin{cases} e_{31} \\ e_{32} \\ e_{33} \end{cases}$$

L'espace morphologique est donc composé de 27 points. Supposons qu'une solution soit connue ( $e_{11}$ ,  $e_{21}$ ,  $e_{31}$ ) ; le voisinage morphologique



à 1 unité est composé de :  $(e_{12}, e_{21}, e_{31})$ ,  $(e_{13}, e_{21}, e_{31})$ ,  
 $(e_{11}, e_{22}, e_{31})$ ,  $(e_{11}, e_{23}, e_{31})$ ,  $(e_{11}, e_{21}, e_{32})$  et  
 $(e_{11}, e_{21}, e_{33})$  soit 6 solutions.

Si l'on connaissait quatre solutions connues, on obtiendrait 12 configurations voisines d'une unité. Pour 6 solutions connues ce serait 15 ; pour 9 connues ce serait 18 ; mais pour 12 solutions connues, le nombre de configurations voisines retomberait à 12 :



L'expérimentateur doit se rendre compte de cette situation, l'effet étant bien moindre au voisinage du maximum que dans les phases d'extension ou de saturation.

Il ne faut conclure en aucune façon au succès automatique de l'analyse morphologique lorsqu'elle est employée dans des situations favorables.

La principale limite pratique de l'analyse morphologique est l'ampleur qu'elle peut prendre. Il n'est pas rare de voir des systèmes contenant plusieurs centaines de possibilités. Il faut donc savoir limiter l'analyse à la quantité d'informations la plus faible permettant néanmoins d'aboutir aux recherches ou aux prévisions qu'on s'était fixé .

D'un autre point de vue, l'étude morphologique d'un sujet suppose que tous ses aspects soient examinés puisqu'il faut être exhaustif.

A ces critiques, ZWICKY répondait qu'il s'agissait d'entreprendre une analyse morphologique "modeste".

L'analyse morphologique et ses prolongements peuvent donc être considérés comme une transition concrète entre les méthodes d'évaluation technologique et les techniques de créativité.

#### IV.3. FORMULATION ET FORMALISATION DU PROBLÈME

En nous basant sur ce qui vient d'être développé dans les paragraphes 1 et 2 ; nous allons tenter de formuler le problème que nous nous sommes posés : aide à la conception d'un dispositif solaire. Cette étude doit conduire à l'obtention des formes possibles d'un système constitué structurellement de différentes composantes technologiques. Déterminer toutes les formes du système, va revenir à en déterminer les différents éléments structurels (objets) dont la concaténation des états sera une forme du système. Aussi bien durant la phase de la décomposition du système en classes que pendant celle de l'étude des concaténations, nous nous appuyerons sur l'approche méthodologique introduite précédemment. Soit  $\mathcal{E} = (e_1, \dots, e_m)$ , l'ensemble de tous les éléments ou constituants susceptibles d'intervenir dans la conception d'un système S ; et soit  $\mathcal{C} = (C_1, \dots, C_j, \dots, C_n)$  une partition sur  $\mathcal{E}$  avec  $C_j = (e_{j1} \dots e_{jn_j})$  et  $\sum_1^n n_j = m$ . Deux constituants  $e_{ji}$  et  $e_{jp}$  appartiennent à la même classe s'ils jouent un rôle équivalent dans le système S. Par définition, une classe apparaîtra dans l'analyse morphologique si elle répond aux deux conditions suivantes :

- A cette classe, on peut associer plusieurs éléments.
- A un changement d'élément de cette classe correspondra durant l'analyse morphologique au moins un changement d'élément pour une autre classe. Cette deuxième condition est la condition nécessaire et suffisante de prise en compte d'un élément dans le tableau morphologique.

La deuxième étape sera consacrée à la détermination des relations de compatibilité (ou d'incompatibilité) existant entre les états précédemment déterminés. Le résultat de cette étape sera donc l'obtention de l'ensemble des relations  $\mathcal{R}$ , relations appliquées aux divers objets :  $R_{C_1} = R_1 =$  Ensemble des relations entre  $C_1$  et les autres classes, on aura :

$$\mathcal{R} = \left( R_1 \dots R_n \right)$$

Si  $R_{ij}$  = Ensemble des relations entre le  $j$ ème élément  $e_{ij}$  de  $C_i$  et les autres classes :

$$R_i = \left( R_{i_1} \dots R_{i_{m_i}} \right)$$

Si nous voulons pousser plus loin le formalisme, nous dirons que  $R_{ij}$  est un vecteur dont chaque terme est relatif à la relation du  $j$ ème élément de la classe  $i$  avec les autres éléments du système :

$$R_{ij} = \left( R_{ij}^{11} \dots R_{ij}^{nm} \right)$$

#### Propriétés de R :

R est une relation exprimant la compatibilité de deux éléments. Nous allons étudier ses propriétés de façon à savoir si elle ne serait pas une relation d'ordre ce qui aurait pour conséquence d'introduire une contrainte de classement des différentes classes. Si R est une relation d'ordre au sens large, il reste à vérifier qu'elle est réflexive, anti-symétrique et transitive.

- Réflexive :

Peut-on écrire  $ARA$  ?

Si R est la relation de compatibilité, A est bien sûr, compatible avec lui-même. La relation R est donc réflexive. Par contre,  $\bar{R}$  n'est certainement pas une relation d'ordre puisqu'on ne peut écrire  $\bar{A}\bar{R}\bar{A}$ .

- Antisymétrique :

$$\text{Ce sera vérifié si } \begin{cases} ARB \\ \text{et} \\ BRA \end{cases} \Rightarrow A \equiv B$$

que A soit compatible avec B, entraîne forcément que B est compatible avec A, mais pas forcément que A est équivalent à B. Au contraire, R (tout comme  $\bar{R}$ ) est symétrique.

D'où et déjà, R et  $\bar{R}$  ne sont pas des relations d'ordre.

Cette propriété de symétrie de la relation R, va avoir pour principal intérêt que si le nombre d'éléments total de l'ensemble des classes

est égal à  $N$  ; le nombre de relations à considérer n'est plus  $N^N$ , mais par le fait de cette symétrie :  $\frac{N^N}{2}$ .

- Transitive :

$$R \text{ est transitive si quand } \begin{cases} \text{ARB} \\ \text{et} \\ \text{BRC} \end{cases} \Rightarrow \text{ARC}$$

ce qui ne se vérifie pas puisqu'en toute logique :

$$\left. \begin{array}{l} - \text{ si A est compatible avec B} \\ - \text{ si B est compatible avec C} \end{array} \right\} \not\Rightarrow \text{ A est compatible avec C.}$$

Il en serait de même pour  $\bar{R}$ .

Ceci va introduire un degré de complexité supplémentaire au problème puisqu'il s'agira lors de l'élaboration des branches de l'arborescence de vérifier la compatibilité entre tout couple d'éléments appartenant à une branche.

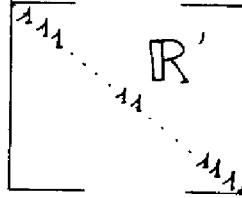
N'ayant pas une relation d'ordre, nous aurons donc toute liberté pour ordonner les classes en vue de l'étude de l'arborescence. En particulier il pourra être intéressant lors d'une étape ultérieure, d'essayer d'ordonner les classes dans un but d'utilisation optimale de l'ordinateur, par exemple en vue d'un volume de calcul minimal.

Désormais, pour simplifier la notation, nous appellerons  $R$  non plus la relation mais l'opérateur prenant en compte la compatibilité et tel que  $ARB = 1$  si  $A$  et  $B$  sont compatibles.

La prise en compte de toutes les relations nous permettra de dresser un tableau morphologique tel qu'il a été précédemment défini.

$$N \text{ éléments} \left[ \begin{array}{c} \\ R \\ \\ \end{array} \right] N \text{ éléments}$$

Ce tableau prendra la forme définitive suivante :



Ceci du fait que :

- Tout élément est compatible avec lui-même, ce qui entraîne que tous les termes de la diagonale principale sont égaux à 1.

- Le tableau est symétrique par rapport à la diagonale principale.

Il reste maintenant à déterminer pour chaque élément quels sont ses éléments de comparaison avec les autres éléments. Nous allons donc chercher à définir un jeu d'arguments dits "de compatibilité" tel que si on associe le jeu d'arguments  $(\alpha_{ij}^1 \dots \alpha_{ij}^n)$  à son élément  $e_{ij}$ , on puisse savoir toutes les valeurs de  $R_{ij_k}$ . On aura donc :

$$e_{ij} (\alpha_{ij}^1 \dots \alpha_{ij}^n).$$

Il se peut qu'entre deux éléments  $e$  et  $e'$ , il existe plusieurs arguments de comparaison. Pour que  $e R e' = 1$ , il faudra donc évidemment que tous les opérateurs de compatibilité élémentaires (portant sur les arguments) soient égaux à 1.

Si à  $e$ , on associe les arguments  $(\alpha_1 \dots \alpha_n)$  et à  $e'$  :  $(\alpha'_1 \dots \alpha'_n)$  et qu'on fasse l'hypothèse que la comparaison doit porter sur les  $\alpha$  de même indice, on aura :

$$e' R e = 1 \text{ si, à la fois } \begin{cases} r_1 (\alpha_1, \alpha'_1) = 1 \\ \vdots \\ r_n (\alpha_n, \alpha'_n) = 1 \end{cases}$$

$r_i$  étant l'opérateur de compatibilité existant entre  $\alpha_i$  et  $\alpha'_i$ .

Jusqu'ici nous n'avons utilisé que les relations de compatibilité liant les états deux à deux.

Le problème du cheminement dans l'arborescence se ramène donc à une étude des relations binaires existant entre les éléments pris deux à deux.

L'ultime étape va être celle de l'élaboration de l'arborescence. Le résultat des deux étapes précédentes est l'obtention d'un graphe dont tout noeud est un élément et dont tout arc entre deux noeuds signifie que ces deux noeuds sont compatibles.

Un mot sera formé par la concaténation de noeuds de l'arbre (1 noeud et un seul par classe). A un mot correspond donc un chemin et un seul. La longueur d'un mot sera prise égale au nombre de noeuds composant ce mot.

Nous avons également envisagé le cas suivant : il se peut que  $N$  éléments soient compatibles deux à deux mais que le mot de longueur  $N$  correspondant soit à rejeter. Nous avons pensé que ce cas ne pouvait se présenter très souvent ce qui nous a incité à opérer comme suit : nous utiliserons les relations d'incompatibilité puisque nous citerons chaque mot d'ordre 3 à  $N$  à supprimer ; ces mots pris en compte à la fin de l'étude de l'arborescence permettront d'éliminer les mots de longueur  $N$  possibles (d'après l'étude binaire) comportant les mots de longueur 3 à  $N$  à rejeter.

Une forme du système global sera donc un mot dont la longueur sera égale au nombre de classes du système.

Soit  $F$  l'ensemble des  $N$ -tuples sur  $C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n$  ;  
 $N = \prod_{j=1}^n n_j$  ;  $f = (e_{1\alpha}, \dots, e_{j\beta}, \dots, e_{n\lambda})$  élément de  $F$  est dit forme sur  $\mathcal{E}$  ;  $f$  est une forme acceptable si la relation  $n$ -aire  $R_n(e_{1\alpha}, \dots, e_{n\lambda})$  est vraie.

Soit  $F' \subset F$ , le sous-ensemble des formes acceptables ; i.e. l'ensemble des solutions au problème de conception du système  $S$ .

Deux éléments  $f_1$  et  $f_2$  de  $F$  sont dits équivalents modulo  $k$  s'ils ont leurs  $k$  premières composantes respectivement égales. On note  $f_1 \equiv f_2 \pmod{k}$  ; et  $\phi_k = (\varphi_{k_1}, \dots, \varphi_{k_{N_k}})$  la partition induite sur  $F$  par la relation  $(\equiv \pmod{k})$  ; avec  $N_k = \prod_{j=1}^k n_j$ . Chaque classe d'équivalence  $\varphi_{ki}$  est une forme partielle, d'ordre  $k$ , constituée des  $k$  premières composantes communes aux éléments de cette classe.

Deux relations  $(\equiv \pmod{k})$  et  $(\equiv \pmod{k'})$  induisent sur  $F$  deux partitions  $\phi_k$  et  $\phi_{k'}$ , telles que si  $k > k' \Rightarrow \phi_k$  est plus fine que  $\phi_{k'}$ .

On pose  $\mathcal{F} = \bigcup_{k=0}^n \phi_k$  ensemble des formes partielles sur  $\mathcal{E}$  ; avec :

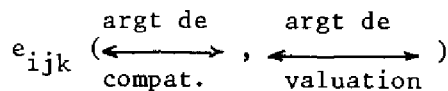
$\phi_0 = (\varphi_0)$  :  $\varphi_0$  forme partielle vide ou classe contenant tous les éléments de  $F$  et  $\phi_n$  partition identique à l'ensemble  $F$ .

Une forme partielle  $\varphi_{ki}$  d'ordre  $k$  est dite acceptable si  $R_K(e_{1\alpha}, \dots, e_{k\lambda})$  est vraie ;  $(e_1 ; \dots ; e_k)$  constituants communs aux éléments de la classe  $\varphi_{ki}$ . On note  $\phi'_k \subset \phi_k$  le sous-ensemble des formes partielles d'ordre  $k$  acceptables, et  $\mathcal{F}' = \bigcup_{k=0}^n \phi'_k$ .

#### IV.4. PROBLÈME DE LA VALUATION

La formulation précédente ne fait apparaître que des arguments de compatibilité. Il nous a paru intéressant d'étudier quel pourrait être l'intérêt de l'introduction d'une valuation dans ce type de problème.

Valuer un élément va revenir à lui associer, en plus de ses arguments de compatibilité, des arguments de valuation tels qu'on puisse apprécier cet élément par rapport aux éléments du même niveau et/ou aux mots auxquels il appartient.



Un jeu particulier de valuations attaché aux arguments de valuation d'un élément constitue un état de cet élément. Tout ce qui a été dit précédemment au sujet des éléments restera, bien sûr, valable en ce qui concerne les états.

Les arguments de valuation sont des paramètres caractéristiques auxquels on associera des critères prédicatifs qui permettront la sélection de mots de longueur :

- Un : Ce qui revient à dire qu'au moins un paramètre caractéristique associé à l'état étudié à une valeur telle que cet état ne puisse être pris en compte lors de la recherche des solutions possibles ;

- Deux à N : Ce qui permet d'envisager le fait que plusieurs états qui étaient compatibles précédemment peuvent ne plus l'être dès que leurs paramètres caractéristiques prennent certaines valeurs.

Il nous a paru intéressant de découpler les arguments de compatibilité et ceux de valuation car si les premiers sont donnés par le concepteur ; les critères prédicatifs, par contre, permettront d'intervenir au niveau des solutions de l'arborescence sans pour cela utiliser des relations structurelles données au départ du problème comme c'est le cas de la matrice de compatibilité.

Nous allons maintenant proposer un algorithme et un programme général qui permettent à partir de la donnée des diverses classes de constituants, de leur paramètres de valuation, des relations n-aires de compatibilité structurelles ainsi que des critères prédicatifs d'engendrer toutes les solutions possibles au problème de conception.

## IV.5. ALGORITHMIQUE

### IV.5.1. Problème du cheminement dans une arborescence

Si nous partons de l'hypothèse que l'on a pu déterminer tous les arguments de compatibilité, nous sommes alors en possession d'un tableau morphologique R.



Si nous avons  $N$  classes ayant chacune un nombre déterminé d'états, on aura :

$$R = \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{cccc} \times & & & \\ & \times & & \\ & & \times & \\ & & & \times \end{array} \right] \begin{array}{l} n_1 \\ \vdots \\ n_N \end{array} \\ \begin{array}{c} n_1 \dots \dots n_N \end{array} \end{array}$$

Pour la suite de notre travail nous n'avons pas utilisé  $R$  mais les sous matrices :

$$(n_1, n_2), (n_1, n_3) \dots \dots (n_1, n_N), (n_2, n_3) \dots \dots (n_{N-1}, n_N)$$

avec  $(n_i, n_j) =$  Matrice donnant les arguments de compatibilité qualifiant les liaisons des états de  $n_i$  et ceux de  $n_j$ .

Ceci a en plus l'avantage d'utiliser la propriété de symétrie de  $R$  par rapport à sa diagonale principale.

Par l'intermédiaire de  $(n_1, n_2)$  nous allons pouvoir déterminer les mots de longueur 2 entre les objets 1 et 2. Ceci revient à repérer les 1 de  $(n_1, n_2)$

$$\text{Si, à } \begin{cases} n_1 & \text{on associe } a_1^1 \dots a_{n_1}^1 \\ n_2 & \text{on associe } a_1^2 \dots a_{n_2}^2 \end{cases}$$

Si nous avons par exemple le vecteur des mots de longueur 2 :

$$P_2^{12} = \left( a_1^1 a_1^2, a_1^1 a_5^2, a_2^1 a_1^2 \dots a_i^1 a_j^2 \dots \right)$$

Alors les mots contenant  $a_1^1$  devront donc également contenir  $a_1^2$  ou  $a_5^2$

Si, dans une deuxième étape, nous recherchons maintenant les termes de  $n_3$  que l'on peut associer à ceux de  $n_2$ , nous aurons comme précédemment :

$$P_2^{23} = \left( \dots a_i^2 a_j^3 \dots \right)$$

La troisième étape sera celle de la recherche des mots de longueur trois entre  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$  ; il faut déterminer tout d'abord les termes



$$P_2^{12} = (14, 15, 24, 25, 26, 35)$$

$$P_2^{23} = (47, 48, 58, 69)$$

$$P_3^{123} = (148, 158, 247, 248, 258, 269, 358)$$

$$P_4 = (248 \ 11, 258 \ 11, 358 \ 11)$$

#### IV.5.2. Problème posé par les arguments de valuation

Les modifications structurelles dues aux arguments de valuation n'apparaissent pas directement au niveau de la matrice de compatibilité. Celle-ci pourra donc être établie une fois pour toutes pour le système étudié en début d'étude. Les possibles modifications apportées par les arguments de valuation pourront être introduites de différentes façons suivant que le mot sera de longueur :

- Un : Il s'agira de donner une valeur prohibitive à un des critères prédicatifs du noeud que l'on pourra ainsi exclure de l'arborescence ;
- Deux : Certains critères prédicatifs peuvent décider de l'apparition (ou suppression) d'une relation de compatibilité entre deux états de deux classes distinctes ;
- k ( $2 < k \leq N$ ) : Il peut se présenter le cas de figure suivant : Soit le mot m formé des états  $e_{1i}, e_{2j}, e_{3k}$  tel que  $m = (e_{1i}, e_{2j}, e_{3k})$  ;  
il se peut que nous ayons pour un état  $e_{4e}$ 

$$\left\{ \begin{array}{l} R(e_{1i}, e_{4e}) = 1 \\ R(e_{2j}, e_{4e}) = 1 \\ R(e_{3k}, e_{4e}) = 1 \end{array} \right.$$

mais que  $R(m, e_{4e}) = 0$ . Ceci devrait donc nécessiter l'utilisation de relations n-aires ; mais, comme nous l'avons dit précédemment, si nous faisons l'hypothèse que ces relations sont peu nombreuses, nous nous contenterons d'exclure les mots présentant cette particularité à la fin de la recherche "binaire" des mots possibles.

Les critères prédictifs communs à tous les niveaux de l'arborescence pourront servir à valuer chaque solution. En particulier, nous utiliserons la notion de coût qui aura la propriété d'être additive le long du mot et nous pourrons effectuer un choix dans les solutions en ne gardant que celles dont le coût global sera inférieur à un  $C_{\max}$  préalablement fixé.

Au niveau du programme, les trois cas précédemment cités peuvent être exploités soit :

- Par une "modification de coût" : On donne au noeud étudié la valeur  $C = C_{\max}$  de façon à éliminer toute branche passant par ce noeud ;

- Par une "modification de structure" permettant de supprimer ou d'ajouter une relation de compatibilité entre deux noeuds ;

- Par la prise en compte en fin de la recherche des mots de longueur N de solutions dites "exclues" (voir Annexe 6).

#### IV.5.3. L'algorithme et sa programmation [5]

Ce travail a été le fruit d'une étroite collaboration avec M. GHALLAB, chercheur au LAAS.

Pour permettre l'utilisation la plus générale possible du programme réalisé, on n'y a introduit qu'un seul critère, supposé commun à toute application éventuelle : c'est le critère de coût. Tous les autres critères devront être définis dans chaque cas particulier et calculés dans un sous programme spécifique à l'application considérée.

L'algorithme, à l'itération k, détermine  $\phi'_{k+2}$  ; ensemble des formes partielles acceptables d'ordre (k+2); à partir de  $\phi'_{k+1}$  de la façon suivante :

- On parcourt  $\phi'_{k+1}$  élément par élément, et pour chaque  $\varphi_{k+1,i}$
- On explore la classe  $C_{k+2} = (e_{k+1,1}, \dots, e_{k+1,j}, \dots, e_{k+1,n_{k+1}})$  ;

pour chaque constituant de cette classe on obtient par concaténation avec  $\varphi_{k+1,i}$  une forme partielle d'ordre (k+2) soit  $\varphi_{k+2,\ell}$

- On détermine si  $\gamma_{k+2, \ell}$  est acceptable par le calcul de  $R_{k+2}(\gamma_{k+2})$  si oui  $\gamma_{k+2, \ell}$  est rangé dans  $\phi'_{k+2}$ .
- On poursuit l'exploration de  $C_{k+2}$  jusqu'à épuisement.

L'évaluation du critère coût (addition des coûts des différents constituants et comparaison à un coût maximum) est effectuée au fur et à mesure, ce qui permet l'élimination des formes partielles acceptables qui ne vérifient pas ce critère.

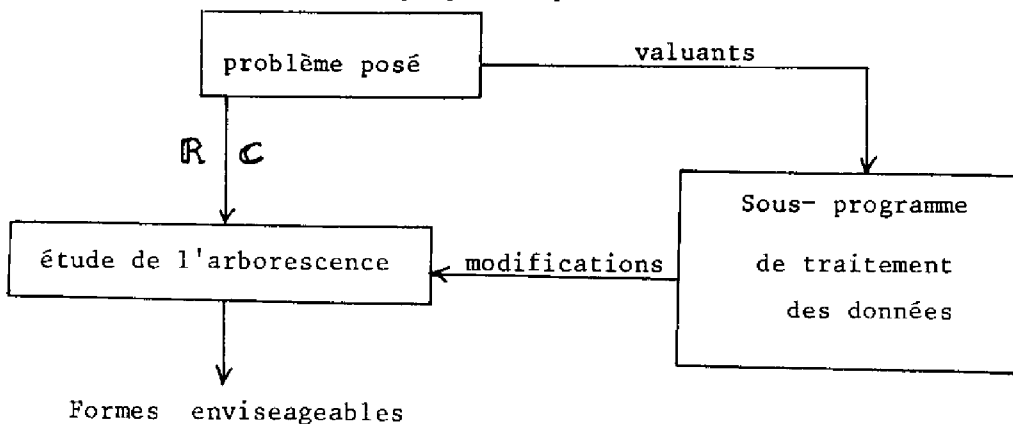
L'algorithme s'initialise par la détermination de  $\phi'_2$ , ensemble des couples de  $C_1 \times C_2$  qui vérifient  $R_2$ .

A l'itération  $n-2$ , le sous ensemble de  $F'$  des formes acceptables qui vérifient le critère coût, est déterminé.

Remarque : Le calcul de  $R_{k+2}(\gamma_{k+2, \ell})$  qui nécessite de déterminer  $R_{k+1}$  pour  $(k+1)$  formes partielles, puis  $R_k$  pour  $k$  formes ... etc jusqu'à  $R_2$ ; a été grandement simplifié et ramené à un produit de matrices binaires par un codage adéquat.

Dans une première version du programme, les modifications envisagées précédemment sont entrées comme données.

Depuis, nous avons envisagé, sans apporter de modifications fondamentales, de les faire parvenir au programme au moyen d'un sous-programme de traitement propre au problème étudié :



## CONCLUSION

L'intérêt que nous avons porté aux méthodes de prévision technologique, nous a amené à étudier en particulier l'Analyse Morphologique.

Dans ce chapitre, nous avons essayé tour à tour de faire une brève introduction puis une présentation formelle de cette analyse. Par la suite, nous avons introduit des arguments de compatibilité, des arguments de valuation et des critères prédictifs.

C'est surtout à ce niveau que se situe notre apport et c'est pourquoi nous y attacherons principalement notre attention dans l'application envisagée au chapitre V.

C'est également dans ce dernier chapitre qu'est abordé le côté pratique de cette méthodologie.

De plus nous nous y intéresserons aux possibilités apportées par l'algorithme et le programme proposé.



BIBLIOGRAPHIE

## CHAPITRE IV

- 1 L. GERARDIN  
Théorie générale des systèmes.
- 2 R. SAINT-PAUL et P.F. TENIERE-BUCHOT  
Innovation et évaluation technologique.  
Entreprise moderne d'édition; Technique et documentation 1974.
- 3 W. RIBLIER  
Anamor et l'analyse morphologique. Une méthode d'aide à la créativité.  
Revue de la Thomson CSF vol. 6 n° 3 9/74.
- 4 L. GERARDIN  
L'analyse morphologique ; une aide à la créativité.  
Thomson CSF Novembre 1971.
- 5 F. ZWICKY  
Discovery, invention, research through the morphological approach.  
The Mac-Millan Company 1969.
- 6 M. CHALLAB, P. LABAT  
L'analyse morphologique dans l'aide à la synthèse d'un système  
technologique complexe.  
Texte proposé au congré AFCET 1977.





CHAPITRE V

---

APPLICATION DE L'ANALYSE MORPHOLOGIQUE



## INTRODUCTION

L'essai méthodologique présenté dans le précédent chapitre se veut être une aide lors de la détermination de l'ensemble des dispositifs possibles répondant à une fonction donnée. Pour cela, nous allons reprendre l'étude des filières d'utilisation de l'énergie solaire en nous plaçant sous un angle permettant une approche morphologique.

L'objectif visé dans ce chapitre va être de tester la méthode proposée c'est à dire d'analyser son efficacité et d'en rechercher les limites.

L'étude de son intérêt opérationnel passera par trois étapes successives qui sont :

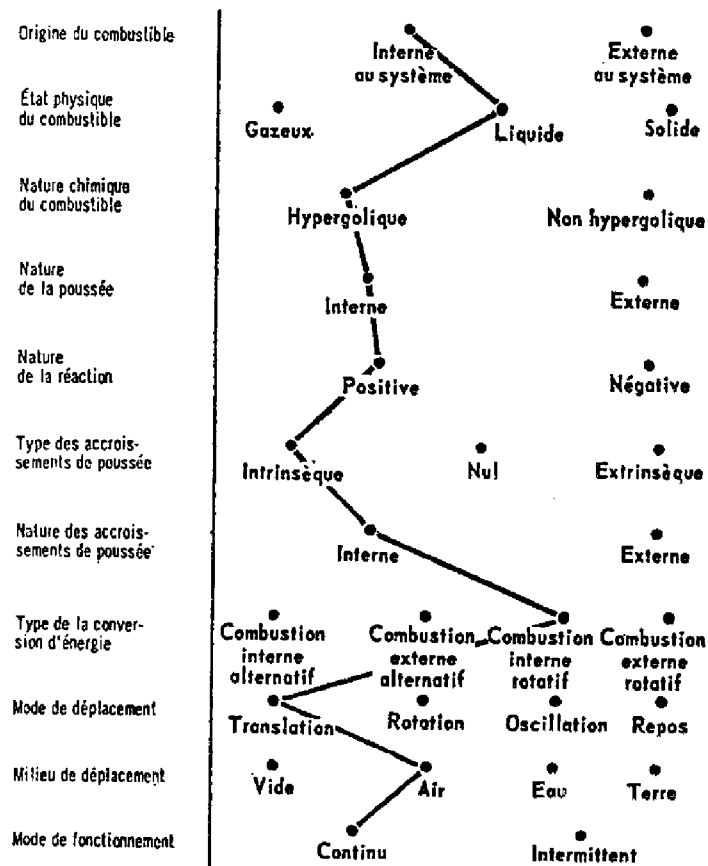
- la mise en forme du problème : Modélisation du système et détermination des relations de compatibilité et arguments de valuation ;
- La simulation : Commodité d'utilisation du programme ;
- Les résultats et leur exploitation.

Nous avons recherché, parmi les filières d'utilisation de l'énergie solaire, un exemple d'application suffisamment complexe de façon à tester la méthode proposée. Ainsi, nous avons eu à envisager trois exemples d'application dont un seul semble présenter un intérêt certain.

### V.1. LE SYNOPTIQUE, LE COLLECTEUR PLAN

La première application envisageable est relative au synoptique général des filières d'utilisation de l'énergie solaire. De fait, la forme sous laquelle le synoptique est présenté dans le chapitre I est la même que celle employée par F. ZWICKY lors de son étude des propulseurs de fusées [ 1 ] .

En ce qui nous concerne, il ne nous a pas paru intéressant d'associer des arguments de valuation à ces éléments du fait même du caractère général des notions mises en jeu. D'où une première conclusion qui sera que nous pensons que l'intérêt d'une valuation est directement lié à la généralité du système étudié.



De même, le collecteur plan n'a pas été retenu ; nous allons brièvement en expliquer les raisons.

Si nous nous référons au chapitre relatif au collecteur plan ; nous pouvons envisager la décomposition suivante en quatre classes :

- Vitrage ;
- Corps noir ;
- Fluide ;
- Utilisation.

Du fait du faible nombre de classes, il ne se pose, ici, pratiquement aucun problème de combinatoire.

Vouloir augmenter le nombre de classes équivaudrait à entrer dans le détail technique du collecteur-plan. Ceci va à l'encontre de l'analyse morphologique dont le but est de donner une image globale du système en peu d'éléments généraux. De plus, analyser structurellement

le collecteur plan en entrant dans le détail technique du système est un travail d'optimisation paramétrique qui ne semble pas pouvoir être traité au moyen d'un outil utilisant des relations logiques.

## V.2. APPLICATION AUX CONCENTRATEURS DU RAYONNEMENT SOLAIRE

En nous inspirant du synoptique exposé dans le chapitre I , nous allons rechercher les composantes technologiques du système à concentration. Nous pouvons le scinder en deux grands sous-systèmes :

- Un sous-système dit "de réflexion" qui correspondra à l'accolade "collection" ;

- Un sous-système dit "de captation" qui recouvre les accolades "transport" et "transformation"

Le sous-système de réflexion englobera du réflecteur au collecteur thermique vu, ici, en tant que cible, et le sous-système de captation, du collecteur en tant que convertisseur énergétique au produit fini.

Comme application, nous nous sommes limités au sous-système de réflexion.

Il reste maintenant à étudier ce sous-système de façon à dégager les diverses classes et leurs éléments associés pour ainsi obtenir un premier tableau morphologique, les éléments pouvant être réels ou abstraits.

Cette approche s'effectuera en se basant sur des exemples de réalisations actuels.

### V.2.1. Obtention du tableau morphologique de départ

#### a) La réflexion :

Selon que nous penserons, par exemple, soit à une centrale solaire type Odeillo ou à celle du projet Them , nous voyons que nous pouvons considérer le fait qu'il y ait 1 ou 2 réflexions :

1e classe → Cylindro-parabolique - paraboloïde - héliostat

2e classe → Parabole de 2e réflexion - Pas de 2e réflexion

De façon à envisager certains cas particuliers qui prennent en compte le fait que le champ d'héliostats puisse être mobile, nous avons introduit une 3e classe :

- champ de concentrateurs fixe ( $\exists$  d'un point fixe).
- champ de concentrateurs mobile.

b) Le collecteur

Il peut prendre plusieurs formes selon que l'on considère le cylindro-parabolique ou le paraboloïde et la centrale à héliostats. Dans les deux premiers cas, le récepteur est solidaire du concentrateur, dans le troisième, il en est extérieur et nécessite une tour sur laquelle se trouve le récepteur proprement dit.

4e niveau  $\longrightarrow \exists$  ou non d'une tour.

Pour ce qui est du récepteur, nous avons envisagé qu'il pouvait être de deux types :

- "Tronconique" (le tuyau du cylindro-parabolique, la chaudière d'un champ d'héliostats d'ouverture 360°);
- orienté : (Projet Them ou Francia ...)

En ce qui concerne les récepteurs, nous ferons une autre différenciation selon que le récepteur sera fixe ou mobile.

Voici terminée une première décomposition, nous allons en premier abord la tester au moyen de quelques vérifications puis, de ceci, établir un tableau morphologique et vérifier que tous les éléments sont nécessaires.

Nous allons donc d'abord tenter de modéliser morphologiquement quelques réalisations pratiques telles que :

- La centrale d'Odeillo ;
- La centrale du projet Them ;
- Le projet de centrale russe ;
- Le cylindro-parabolique ;
- le paraboloïde.

Odeillo	Projet Them	Projet russe	Cylindro- parabolique	paraboloïde	
X	X	X			héliostat (11)
					cyl.parabolique (12)
				X	paraboloïde (13)
X					2e réflexion (21)
	X	X	X	X	Pas de 2ème réflexion (22)
X	X		X	X	champ fixe (31)
		X			champ tournant (32)
X	X	X			Tour (41)
			X	X	pas de Tour (42)
			X		récepteur "tronconique" (51)
X	X	X		X	récepteur orienté (52)
X	X		X	X	récepteur fixe (61)
		X			récepteur mobile (62)



A partir du tableau précédent, nous allons élaborer le tableau morphologique qui devra donc permettre d'obtenir tous les cas déjà réalisés mais également les cas envisageables.

Nous ne mettrons un zéro entre deux éléments que quand on est sûr de leur incompatibilité (dans le doute on mettra un 1).

Dès ici vont donc apparaître les arguments de compatibilité.

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} 11 & 12 & 13 & 21 & 22 & 31 & 32 & 41 & 42 & 51 & 52 & 61 & 62 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 11 \\ 12 \\ 13 \\ 21 \\ 22 \\ 31 \\ 32 \\ 41 \\ 42 \\ 51 \\ 52 \\ 61 \\ 62 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ & & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ & & & & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & & & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & & & & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ & & & & & & & & & 1 & 0 & 1 & 0 \\ & & & & & & & & & & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & & & & & & & 1 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

### 1er résultats :

Nombre de classes      6

Nombre d'éléments dans chaque classe      3    2    2    2    2    2

Matrice de compatibilité :

$$\begin{aligned} P_1 P_2 & : \begin{bmatrix} 11 \\ 01 \\ 01 \end{bmatrix} & ; & P_1 P_3 & : \begin{bmatrix} 11 \\ 10 \\ 10 \end{bmatrix} & ; & P_1 P_4 & : \begin{bmatrix} 10 \\ 01 \\ 11 \end{bmatrix} & ; & P_1 P_5 & : \begin{bmatrix} 11 \\ 10 \\ 11 \end{bmatrix} & ; & P_1 P_6 & : \begin{bmatrix} 11 \\ 10 \\ 11 \end{bmatrix} \\ P_2 P_3 & : \begin{bmatrix} 11 \\ 11 \end{bmatrix} & ; & P_2 P_4 & : \begin{bmatrix} 10 \\ 11 \end{bmatrix} & ; & P_2 P_5 & : \begin{bmatrix} 01 \\ 11 \end{bmatrix} & ; & P_2 P_6 & : \begin{bmatrix} 10 \\ 11 \end{bmatrix} & ; & P_3 P_4 & : \begin{bmatrix} 11 \\ 10 \end{bmatrix} \\ P_3 P_5 & : \begin{bmatrix} 11 \\ 11 \end{bmatrix} & ; & P_3 P_6 & : \begin{bmatrix} 11 \\ 11 \end{bmatrix} & ; & P_4 P_5 & : \begin{bmatrix} 11 \\ 11 \end{bmatrix} & ; & P_4 P_6 & : \begin{bmatrix} 11 \\ 10 \end{bmatrix} & ; & P_5 P_6 & : \begin{bmatrix} 10 \\ 11 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Ensemble de solutions :

1	1	1	1	1	2	1	- Hélio- stat, 2e réflexion, champ fixe, Tour, Récept. orienté et fixe.
2	1	1	2	1	2	1	- Hélio- stat, 2e réflexion, champ mobile, Tour, Récept. orienté et fixe.
3	1	2	1	1	1	1	- Hélio- stat, pas de 2e réflexion, champ fixe, Tour, Récep. tronc. et fixe.
4	1	2	1	1	2	1	- Hélio- stat, pas de 2e réflexion, champ fixe, Tour, Récept. orienté et fixe.
5	1	2	1	1	2	2	- Hélio- stat, pas de 2e réflexion, champ fixe, Tour, Récept. orienté et mobile.
6	1	2	2	1	1	1	- Hélio- stat, pas de 2e réflexion, champ mobile, Tour, Récept. tronc. et fixe.
7	1	2	2	1	2	1	- Hélio- stat, pas de 2e réflexion, champ mobile, Tour, Récept. orienté et fixe.
8	1	2	2	1	2	2	- Hélio- stat, pas de 2e réflexion, champ mobile, Tour, Récept. orienté et mobile.
9	2	2	1	2	1	1	- Cyl- par. pas de 2e réflexion, champ fixe, Tour, Récept. tronc. et fixe.
10	3	2	1	1	1	1	- Parab. pas de 2e réflexion, champ fixe, Tour, Récept. tronc. et fixe.
11	3	2	1	1	2	1	- Parab. pas de 2e réflexion, champ fixe, Tour, Récept. orienté et fixe.
12	3	2	1	1	2	2	- Parab. pas de 2e réflexion, champ fixe, Tour, Récept. orienté et mobile.
13	3	2	1	2	1	1	- Parab. pas de 2e réflexion, champ fixe, Tour, Récept. tronc. et fixe.
14	3	2	1	2	2	1	- Parab. pas de 2e réflexion, champ fixe, Tour, Récept. orienté et fixe.

Nous avons donc 14 solutions au lieu de  $3 \times 2^5 = 96$ .

L'ordre dans lequel apparaissent les divers éléments semble le bon puisque les classes ayant le plus de zéro sont en début d'arbre.

Aux éléments de cette première analyse morphologique, nous pourrions associer des caractéristiques ou valants aussi bien quantitatives que qualitatives.

- exemple de valant qualitatif :

L'élément "hélio-  
stat" peut se dédoubler en  $\left\{ \begin{array}{l} \text{hélio-} \\ \text{stat plan} \\ \text{hélio-} \\ \text{stat focalisant} \end{array} \right.$

- exemple de valuant quantitatif : On peut associer une métrique à l'élément "héliostat" par exemple ses dimensions (7 x 7 m<sup>2</sup> ou son coût ( f /m<sup>2</sup>).

### V.2.2. Introduction de valuants qualitatifs

Nous allons considérer un des éléments de la précédente analyse dont nous ferons ici apparaître les différents états associés.

Nous n'aurons pas ici à rechercher l'ensemble des valeurs du tableau morphologique mais juste à étudier les vecteurs relatifs aux éléments modifiés.

Nous opérerons en deux étapes, d'abord nous dresserons les vecteurs de compatibilité de chaque nouvel élément en nous inspirant de celui de la forme-origine. En une 2ème étape, en nous servant d'une sous-matrice de compatibilité prenant en compte les relations entre nouveaux états, nous pourrons dresser les nouveaux vecteurs complets de chaque nouvel état.

Pour illustrer ceci, nous avons introduit deux caractéristiques qualitatives, une pour l'élément "héliostat", l'autre pour l'élément "  $\exists$  Tour".

lère étape : Relations entre les nouveaux états et les éléments précédemment déterminés.

héliostat	: 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1
héliostat plan	: 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1
héliostat focalisant	: 1 0 0 <u>0</u> 1 1 <u>0</u> 1 0 1 1 1 1
Tour	: 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1
Tour extérieure	: 1 0 0 1 1 1 1 1 0 <u>0</u> 1 1 1
Tour intérieure (au champ de concentrateurs)	: 1 0 <u>1</u> <u>0</u> 1 1 1 1 0 1 <u>0</u> 1 <u>0</u>

2ème étape : Relations entre les nouveaux états entre eux.

	Hél. plan	Hél. focal.	Tour ext.	Tour int.
Héliostat plan	1	0	1	1
Héliostat focalisant		1	1	0
Tour extérieure			1	0
Tour intérieure				1

Nouvelles relations :

Héliostat plan	<u>1 0</u>	0 0 1 1 1 1	<u>1 1</u>	0 1 1 1 1
Héliostat focalisant	<u>0 1</u>	0 0 1 1 1 1	<u>1 0</u>	0 1 1 1 1
Tour extérieure	<u>1 1</u>	0 0 1 1 1 1	<u>1 0</u>	0 0 1 1 1
Tour intérieure	<u>1 0</u>	0 1 0 1 1 1	<u>0 1</u>	0 1 0 1 0

Si bien que nous aurons pour le tableau :

Héliostat plan - Héliostat focalisant - cylindro-parabolique - paraboloïde  
 2ème réflexion - sans 2ème réflexion  
 Champ fixe - champ tournant  
 Tour extérieure - Tour intérieure - Pas de tour  
 Récepteur tronconique - Récepteur orienté  
 Récepteur fixe - Récepteur mobile

Ensemble de solutions :

1	1	1	1	1	2	1
2	1	1	2	1	2	1
3	1	2	1	1	2	1
4	1	2	1	1	2	2
5	1	2	1	2	1	1
6	1	2	2	1	2	1
7	1	2	2	1	2	2
8	1	2	2	2	1	1
9	2	2	1	1	2	1
10	2	2	1	1	2	2
11	3	2	1	3	1	1
12	4	2	1	2	1	1
13	4	2	1	3	1	1
14	4	2	1	3	2	1

### V.2.3. Introduction de valuants quantitatifs

Comme nous l'avons déjà vu, ces valuants vont pouvoir être de deux types selon que leur effet se fera sentir au niveau de la matrice de compatibilité ou à celui du nombre de solutions retenues comme souhaitable.

Dans certains cas, on pourra se poser la question de savoir si une caractéristique quantitative doit être susceptible de prendre seulement un certain nombre de valeurs discrètes, ou au contraire toute une série continue de valeurs. Le tableau morphologique est tel qu'on est obligé de prendre des valeurs discrètes. Ceci va donc poser un problème au niveau des variables continues. De fait, nous l'avons tourné en disant en ce qui concerne les variables auxquelles nous aurons affaire dans ces problèmes d'aide à la conception de systèmes technologiques complexes que

- Soit nous considérerons des réalisations technologiques (dimensions de l'héliostat par exemple) ;
- Soit nous choisirons a priori un ensemble de valeurs que l'on a jugé représentatives des différentes gammes caractéristiques de la variable continue (exemple : hauteur de tour).

Il existe des interactions entre les éléments qui composent le système. Ce n'est pas la nature de ces interactions qui nous importe, mais bien plutôt les différents types de changements que peuvent provoquer ces interactions sur les éléments du système.

C'est par l'examen de ces changements que l'on pourra observer le comportement structurel du système.

La notion de fonction d'un élément quelconque est étroitement liée au comportement de cet élément et au rôle qu'il joue dans un environnement donné, cet environnement étant lui-même constitué d'éléments divers. La notion de fonction ne peut se faire sans qu'interviennent à la fois les caractéristiques de l'élément considéré et les caractéristiques des autres éléments situés dans l'environnement [2] .

La recherche des fonctions élémentaires peut être parfois très difficile. Le but à atteindre est toujours de parvenir à isoler un phénomène simple en éliminant les interactions parasites susceptibles de le modifier. Ces opérations de discrimination peuvent être plus ou moins complexes ou délicates ne serait-ce que parce qu'elles requièrent une estimation qui n'est pas exempte de subjectivité [2] .

La prise en compte de ces arguments de valuation nous a conduit à deux tableaux morphologiques ; l'un n'ayant que des relations binaires, l'autre, par contre, faisant apparaître des relations ternaires.

Avant de développer ceci, nous reprendrons le tableau sans valuants précédemment étudié et nous y introduirons des valuants quantitatifs que nous expliciterons brièvement.

Nous n'avons pas valué l'ensemble des éléments du premier tableau mais seulement certains d'entre-eux, le but que nous nous étions fixés étant d'étudier l'intérêt de la valuation appliquée au tableau morphologique. Nous avons donc associé des valuants aux éléments suivants :

- héliostat : Ses dimensions de surface réfléchissante, le nombre d'héliostats du champ de réflecteurs, et la profondeur du champ (distance entre la tour et l'héliostat qui lui est le plus éloigné).

Nous avons choisi cinq héliostats :

$h_1$  (7m x 7m, 1500, 1500m) ;  $h_2$  (7m x 7m, 600, 700m) ;  $h_3$  (3,5m x 3,5m, 1500, 1000m) ;  $h_4$  (1m x 1m, 5000, 500m) ;  $h_5$  (1m x 1m, 500, 50m).

- Tour : Sa hauteur

T. ext.<sub>1</sub> (10m) ; T. ext.<sub>2</sub> (100m) ; T. int.<sub>1</sub> (10m) ; T. int.<sub>2</sub> (50m).

- Récepteur orienté : Son ouverture

Récept.<sub>1</sub> (20m x 20m) ; Récept.<sub>2</sub> (6m x 6m)

Comme 3ème tableau morphologique, nous aurons donc :

$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	cyl-parab.	parab.
	(2e réflexion sur parabole)				(pas de 2e réflexion)	
	(champ fixe)				(champ mobile)	
T.ext. <sub>1</sub>		T.ext. <sub>2</sub>		T.int. <sub>1</sub>	T.int. <sub>2</sub>	(pas de Tour)
( Récept.Tronc.)		(Récept. orienté 1)			(Récept. orienté 2)	
(Récept.fixe)					(Récept. mobile)	

Ce tableau est directement issu du premier tableau présenté, aussi retrouverons-nous les mêmes arguments de compatibilité et donc les mêmes relations structurelles.

Il reste alors à prendre en compte les arguments de valuation ce que nous ferons au moyen du tableau page suivante.

D'un point de vue pratique, nous allons introduire les valuations de coût avant d'effectuer l'analyse morphologique, pour la raison suivante :

- Si on veut supprimer les liaisons entre 1 noeud et plusieurs autres noeuds de l'arborescence, il suffit de mettre des '0' comme arguments de compatibilité ;

- mais si on veut carrément supprimer les chemins passant par un noeud donné ceci à cause d'une hypothèse de départ de calcul par exemple ; il suffira alors de donner à ce noeud un coût égal au coût maximum  $C_{\max}$  fixé.

Les propriétés et relations apparaissant dans ce tableau ont été extraites du chapitre relatif aux concentrateurs. Nous n'avons ici envisagé que les "formes" de la centrale à "héliostats + tour".

Nous ne traitons, ici, qu'un exemple d'application, aussi n'avons-nous pas attaché une grande importance aux coûts estimés.

Modifications	élément de comparaison	Type de modification	Résultat pratique	Explication
1e Classe : Surf.h-nbre h, P <sub>ph</sub> = Surface de verre x W <sub>0</sub> (W <sub>0</sub> = 1 kw/m <sup>2</sup> par ex.)	hypothèse de départ : P <sub>th syst</sub> >> P <sub>th donnée</sub>	M C	C = C <sub>max</sub>	Pour obtenir une certaine puissance thermique, certains dispositifs possibles seront à exclure.
1e Classe : Surf.h- profondeur Dim tache = Dim h + x.10 <sup>2</sup> supposé carré	Dimension du côté du récepteur (supposé carré)	M S	'0' B	On veut que la tache fournie (dans le cas le meilleur) par l'héliostat le plus éloigné de la tour contienne dans le récepteur.
2e Classe : $\int$ de la parabolé Concentration géométrique C <sub>G</sub> (voir tableau du chap. II)	Hypothèse de départ : On désire avoir C <sub>G</sub> >> C <sub>G</sub> fixé	M C	C = C <sub>max</sub>	Pour obtenir une densité de flux élevée, nous aurons besoin d'une concentration géométrique élevée.
3e Classe				
4e Classe : Hauteur de tour h <sub>t</sub>	- h <sub>t</sub> t.q. "hauteur"/h le plus éloigné. - h <sub>t</sub> = f(nbre h, dim h, profondeur et pente du site).	M S	'0' B	Le récepteur doit être à l'horizontale (au moins) du dernier miroir. De plus, pour limiter les effets d'ombre, il faut pour un champ donné un h <sub>min</sub> .
5e Classe	voir Classe I			
6e Classe				

M C = Modification de coût ; M S : Modification de structure ; h : héliostat



Si, dans une étape ultérieure, nous désirons appliquer cette approche morphologique, force sera d'essayer de quantifier de façon plus précise ces coûts ; ce qui reviendra tout d'abord à déterminer de quelle nature seront ces valants.

Dans l'exemple traité, nous avons utilisé des coûts en francs ; mais nous pourrions aussi bien envisager des coûts "énergétiques" tels qu'ils ont été abordés par exemple :

- Dans l'analyse WELMM développée à l'IIASA [3] (WELMM = W(water), E (energy), L (Land), M (materials), M (man-power) ) ;

- ou dans celle de la NSF-RANN [4] qui est basée sur le principe fondamental de la conservation de masse et d'énergie.

En ce qui nous concerne, les coûts (ou valeurs estimées) que nous avons utilisés durant cette analyse morphologique ont été déterminés comme suit : (en f 77).

Classe 1	m2 héliostat = 400 F	→	$h_1$	→	29,4	$10^6$			
			$h_2$	→	11,76	$10^6$			
			$h_3$	→	7,35	$10^6$			
			$h_4$	→	2	$10^6$			
			$h_5$	→	0,21	$10^6$			
			cylindro-parabolique		:	0,15	$10^6$	;	paraboloïde
Classe 2	Parabole type Odeillo	→	50	$10^6$					
Classe 3	Surface mécanique mobile	→	5	$10^6$					
Classe 4	Tour de 10 m	→	0.03	$10^6$					
	" " 50 m	→	1	$10^6$					
	" "100 m	→	3	$10^6$					
Classe 5	Récepteur tronconique	→	10	$10^6$					
	" orienté	{ 20 x 20	→	0,2	$10^6$				
		{ 6 x 6	→	5	$10^6$				
Classe 6	Récepteur mobile	→	1	$10^6$					

Nous allons maintenant donner plusieurs jeux de solutions possibles en faisant apparaître des modifications de coût et de structure de façon à illustrer ce qui a été exposé dans le tableau précédent.

Nous avons ainsi, depuis le troisième tableau morphologique, étudié cinq cas possibles.

- Dans un premier, nous allons faire apparaître l'ensemble global des solutions sans prendre en compte les modifications dues aux valuations :

ENSEMBLE DE SOLUTIONS: (nombre max de solutions possibles = 840).

5	2	1	1	2	1	0.43	41	3	2	2	2	2	1	15.55
5	2	1	1	2	2	1.43	42	1	2	1	2	2	2	15.95
4	2	1	1	2	1	2.23	43	4	2	2	2	3	2	16.00
4	2	1	1	2	2	3.23	44	5	2	2	4	1	1	16.20
5	2	1	2	2	1	3.40	45	3	2	2	2	2	2	16.55
5	2	1	2	2	2	4.40	46	4	2	2	4	1	1	18.00
4	2	1	2	2	1	5.20	47	3	2	1	4	1	1	18.35
5	2	1	1	3	1	5.23	48	1	2	2	2	2	1	19.95
5	2	2	1	2	1	5.43	49	1	2	2	2	2	2	20.95
4	2	1	2	2	2	6.20	50	1	2	1	4	1	1	22.75
5	2	1	1	3	2	6.23	51	3	2	2	4	1	1	23.35
5	2	2	1	2	2	6.43	52	1	2	2	4	1	1	27.75
4	2	1	1	3	1	7.03	53	2	2	1	2	2	1	32.60
4	2	2	1	2	1	7.23	54	2	2	1	2	2	2	33.60
4	2	1	1	3	2	8.03	55	2	2	2	2	2	1	37.60
5	2	1	2	3	1	8.20	56	2	2	2	2	2	2	38.60
4	2	2	1	2	2	8.23	57	2	2	1	4	1	1	40.40
5	2	2	2	2	1	8.40	58	2	2	2	4	1	1	45.40
5	2	1	2	3	2	9.20	59	5	1	1	1	2	1	50.43
5	2	2	2	2	2	9.40	60	4	1	1	1	2	1	52.23
4	2	1	2	3	1	10.00	61	5	1	1	2	2	1	53.40
6	2	1	5	1	1	10.15	62	4	1	1	2	2	1	55.20
4	2	2	2	2	1	10.20	63	5	1	1	1	3	1	55.23
5	2	1	3	1	1	10.23	64	5	1	2	1	2	1	55.43
5	2	2	1	3	1	10.23	65	4	1	1	1	3	1	57.03
3	2	1	2	2	1	10.55	66	4	1	2	1	2	1	57.23
4	2	1	2	3	2	11.00	67	5	1	1	2	3	1	58.20
4	2	2	2	2	2	11.20	68	5	1	2	2	2	1	58.40
5	2	1	4	1	1	11.20	69	4	1	1	2	3	1	60.00
7	2	1	4	1	1	11.20	70	4	1	2	2	2	1	60.20
5	2	2	1	3	2	11.23	71	5	1	2	1	3	1	60.23
3	2	1	2	2	2	11.55	72	3	1	1	2	2	1	60.55
4	2	2	1	3	1	12.03	73	4	1	2	1	3	1	62.03
4	2	1	4	1	1	13.00	74	5	1	2	2	3	1	63.20
4	2	2	1	3	2	13.03	75	1	1	1	2	2	1	64.95
5	2	2	2	3	1	13.20	76	4	1	2	2	3	1	65.00
5	2	2	2	3	2	14.20	77	3	1	2	2	2	1	65.55
1	2	1	2	2	1	14.95	78	1	1	2	2	2	1	69.95
4	2	2	2	3	1	15.00	79	2	1	1	2	2	1	82.60
5	2	2	3	1	1	15.23	80	2	1	2	2	2	1	87.60

- Si maintenant, nous introduisons les modifications de structure qui apparaissent dans le tableau. Ces modifications se présenteront sous la forme :

Modification de Structure :

0	22	3
0	23	3
0	24	3
0	25	3
0	18	2
0	19	2
0	15	1
0	16	1
0	17	1

Ensemble de solutions :

1	5	2	1	1	2	1	0.43	26	4	2	2	4	1	1	18.00
2	5	2	1	1	2	2	1.43	27	3	2	1	4	1	1	18.35
3	4	2	1	1	2	1	2.23	28	1	2	2	2	2	1	19.95
4	4	2	1	1	2	2	3.23	29	1	2	2	2	2	2	20.95
5	5	2	1	1	3	1	5.23	30	1	2	1	4	1	1	22.75
6	5	2	2	1	2	1	5.43	31	3	2	2	4	1	1	23.35
7	5	2	1	1	3	2	6.23	32	1	2	2	4	1	1	27.75
8	5	2	2	1	2	2	6.43	33	2	2	1	2	2	1	32.60
9	4	2	2	1	2	1	7.23	34	2	2	1	2	2	2	33.60
10	4	2	2	1	2	2	8.23	35	2	2	2	2	2	1	37.60
11	6	2	1	5	1	1	10.15	36	2	2	2	2	2	2	38.60
12	5	2	1	3	1	1	10.23	37	2	2	1	4	1	1	40.40
13	5	2	2	1	3	1	10.23	38	2	2	2	4	1	1	45.40
14	3	2	1	2	2	1	10.55	39	5	1	1	1	2	1	50.43
15	5	2	1	4	1	1	11.20	40	4	1	1	1	2	1	52.23
16	7	2	1	4	1	1	11.20	41	5	1	1	1	3	1	55.23
17	5	2	2	1	3	2	11.23	42	5	1	2	1	2	1	55.43
18	3	2	1	2	2	2	11.55	43	4	1	2	1	2	1	57.23
19	4	2	1	4	1	1	13.00	44	5	1	2	1	3	1	60.23
20	1	2	1	2	2	1	14.95	45	3	1	1	2	2	1	60.55
21	5	2	2	3	1	1	15.23	46	1	1	1	2	2	1	64.95
22	3	2	2	2	2	1	15.55	47	3	1	2	2	2	1	65.55
23	1	2	1	2	2	2	15.95	48	1	1	2	2	2	1	69.95
24	5	2	2	4	1	1	16.20	49	2	1	1	2	2	1	82.60
25	3	2	2	2	2	2	16.55	50	2	1	2	2	2	1	87.60

L'introduction des valuants fait que le nombre de solutions passe de 80 à 50.

- Par hypothèse de départ, nous pouvons nous fixer une limite inférieure à la puissance thermique. Ceci va entraîner, par exemple, que le cylindro-parabolique et le paraboloïde ne seront pas retenues ( $\Rightarrow C_{\text{cyl-par}} = C_{\text{parab}} = C_{\text{max}}$ ). De même, nous pouvons ne pas désirer une densité de flux telle qu'il soit nécessaire d'utiliser une parabole de 2ème réflexion ( $\Rightarrow C_{\text{par}} = C_{\text{max}}$ ).

Nous aurons alors :

Ensemble de solutions :

1	5	2	1	1	2	1	0.43
2	5	2	1	1	2	2	1.43
3	4	2	1	1	2	1	2.23
4	4	2	1	1	2	2	3.23
5	5	2	1	1	3	1	5.23
6	5	2	2	1	2	1	5.43
7	5	2	1	1	3	2	6.23
8	5	2	2	1	2	2	6.43
9	4	2	2	1	2	1	7.23
10	4	2	2	1	2	2	8.23
11	5	2	1	3	1	1	10.23
12	5	2	2	1	3	1	10.23
13	3	2	1	2	2	1	10.55
14	5	2	1	4	1	1	11.20
15	5	2	2	1	3	2	11.23
16	3	2	1	2	2	2	11.55
17	4	2	1	4	1	1	13.00
18	1	2	1	2	2	1	14.95
19	5	2	2	3	1	1	15.23
20	3	2	2	2	2	1	15.55
21	1	2	1	2	2	2	15.95
22	5	2	2	4	1	1	16.20
23	3	2	2	2	2	2	16.55
24	4	2	2	4	1	1	18.00
25	3	2	1	4	1	1	18.35
26	1	2	2	2	2	1	19.95
27	1	2	2	2	2	2	20.95
28	1	2	1	4	1	1	22.75
29	3	2	2	4	1	1	23.35
30	1	2	2	4	1	1	27.75
31	2	2	1	2	2	1	32.60
32	2	2	1	2	2	2	33.60
33	2	2	2	2	2	1	37.60
34	2	2	2	2	2	2	38.60
35	2	2	1	4	1	1	40.40
36	2	2	2	4	1	1	45.40

- Si, toujours dans l'optique d'une puissance thermique demandée ; nous avons  $P_{th \text{ demandé}}$  tel que seuls  $h_1$  et  $h_2$  puissent être retenus ( $\Rightarrow C_{h_3} = C_{h_4} = C_{h_5} = C_{max}$ ).

Ensemble de solutions :

1	1	2	1	2	2	1	14.95	7	2	2	1	2	2	1	32.60
2	1	2	1	2	2	2	15.95	8	2	2	1	2	2	2	33.60
3	1	2	2	2	2	1	19.95	9	2	2	2	2	2	1	37.60
4	1	2	2	2	2	2	20.95	10	2	2	2	2	2	2	38.60
5	1	2	1	4	1	1	22.75	11	2	2	1	4	1	1	40.40
6	1	2	2	4	1	1	27.75	12	2	2	2	4	1	1	45.40

- De même, si dans le cas 3, nous avons fixé un  $C_{max}$  plus petit ; ce qui peut revenir à fixer un coût/ $KW_{th}$ , on aurait :

Ensemble de solutions :

1	5	2	1	1	2	1	0.43
2	5	2	1	1	2	2	1.43
3	4	2	1	1	2	1	2.23
4	4	2	1	1	2	2	3.23
5	5	2	1	1	3	1	5.23
6	5	2	2	1	2	1	5.43
7	5	2	1	1	3	2	6.23
8	5	2	2	1	2	2	6.43
9	4	2	2	1	2	1	7.23
10	4	2	2	1	2	2	8.23
11	5	2	1	3	1	1	10.23
12	5	2	2	1	3	1	10.23
13	3	2	1	2	2	1	10.55
14	5	2	1	4	1	1	11.20
15	5	2	2	1	3	2	11.23
16	3	2	1	2	2	2	11.55
17	4	2	1	4	1	1	13.00

V.2.4. Type d'analyse sur laquelle peut déboucher une telle approche

- L'héliostat 5 (le moins cher des cinq héliostats) apparaît le plus grand nombre de fois (10 sur 17). Le coût du champ d'héliostats représente suivant les cas de 10 % (sol. 15) à 90 % (sol. 3) du coût global de la station énergétique solaire.

- Les solutions à champ tournant n'apparaissent que 6 fois sur 17 solutions et qu'avec les héliostats  $h_4$  et  $h_5$ . Elles sont à prendre en compte dès que  $C_{\max} > 5.4 \cdot 10^6$  f.

- Les petites centrales (à faible coût) n'admettent, ici, que la tour extérieure de 10 m (sol. 1 à 10) ; la tour de 100 m n'apparaît qu'à la solution 13.

- Parmi les solutions possibles, seules 3 sont relatives aux champs d'ouverture  $360^\circ$  (sol. 11, 14, 17) et aucune d'entre-elles ne se combine avec l'héliostat  $h_3$ .

- En ce qui concerne les récepteurs, nous pourrions envisager celui de (6m x 6m) 4fois, (sol. 5, 7, 12, 15). On peut constater qu'il faut, par contre, utiliser celui de (10m x 10m) d'ouverture 10 fois surtout dans les solutions les moins onéreuses. Ce résultat paradoxal vient du fait que le récepteur orienté de (6m x 6m) coûte plus cher que celui de (10m x 10m) ; il est possible, après tout, qu'il soit d'une technologie plus élaborée.

Ceci montre que sur l'exemple traité comme il vient de l'être, qu'il ne faut pas tout prendre au pied de la lettre et ne pas tirer des conclusions hâtives à partir des solutions.

Même si nous décidions d'introduire un second critère prédictif prenant effet sur les  $m$  états des  $n$  classes du système (ce pourrait être un rendement) de façon à résoudre le problème précédent ; nous voyons qu'il faut considérer que cette méthode permet simplement d'obtenir le nombre total de solutions possibles mais qu'il reste alors à faire une critique de ces solutions.

La brève analyse précédente n'a pour but que de servir d'exemple de façon à montrer quel type de travail il reste à faire quand on est en possession des solutions possibles. Certains noeuds n'ont pas pu être étudiés de façon approfondie (exemple : champ mobile) et les coûts ne sont que des valeurs estimées ; ce qui revient à dire que nous ne pourrions tirer, ici, aucune conclusion définitive sur les stations énergétiques solaires.

#### V.2.5. Introduction de relations n-aires

Nous allons maintenant introduire le 4ème tableau dans lequel vont apparaître des relations ternaires. Le tableau que nous allons utiliser sera peu différent du précédent, il se présentera sous la forme :

$h_1$ (7 x 7, 1500)	$h_2$ (7 x 7, 600)	$h_3$ (3,5 x 3,5, 1500)	$h_4$ (1x1,5000)	$h_5$ (1x1,500)
(2ème réflexion sur parabole)		(pas de 2ème réflexion)		
champ fixe (10m)	champ fixe (700m)	champ fixe (1500m)	(champ mobile)	
$T_{ext.}$ (10m)	$T_{ext.}$ (100m)	$T_{int.}$ (10m)	$T_{int.}$ (50m)	(pas de tour)
(Récepteur tronconique)		(Récepteur orienté 1)	(Récepteur orienté 2)	
(Récepteur fixe)		(Récepteur mobile)		

Nous noterons que le valuant relatif à la profondeur du champ d'héliostats est devenu une caractéristique de l'élément "champ fixe". Pour n'étudier que les concentrateurs à héliostats nous n'avons pas ici fait apparaître les éléments "cylindro-parabolique" et "paraboloïde". Ce sont les deux différences fondamentales qui existent entre le 3ème et le 4ème tableau. La première modification va faire apparaître :

- une relation entre les classes 1 et 3 sous la forme d'une relation :  
Surface du champ = Profondeur x ouverture  $\geq k$  x Surface de verre  
(l'ouverture sera supposé constante et donnée ;  $k > 1$ ) ;
- Une relation entre les classes 1, 3 et 5 qui prendra en compte la dimension de la tache par rapport à l'ouverture de la chaudière ;
- Une relation entre les classes 1, 3 et 4 qui prendra en compte la hauteur de la tour en fonction du nombre d'héliostats et de la profondeur du champ.

A part cela, nous retrouverons les mêmes relations que dans le tableau 3 en ce qui concerne la puissance thermique  $P_{th}$  et la concentration géométrique  $C_G$ .

Nous utiliserons les mêmes valeurs de coût que précédemment.

Nous allons maintenant montrer sous quelle forme se présentent les résultats :

Nombre de classes 6

Nombre d'éléments dans chaque classe 5 2 4 5 3 2

Matrice de compatibilité :

11	110	111	11
11	110	10	011
11	110	11	011
11	111	11111	100
11	111	11111	100
0011	11	11111	111
0111	11	11110	11
0011	11	111	11
0111	11	111	10
1111	11	111	10
01010	1111	111	10
01010	1111	11	10
01010	00110	11	11
11010	11111	11	11
11110	011		



## Solutions exclues :

1	0	2	0	3	0
2	0	5	0	2	0
2	0	5	0	3	0
3	1	2	0	3	0
4	0	2	0	3	0
4	0	3	0	3	0
5	0	2	0	3	0
5	0	3	0	3	0
1	0	3	1	0	0
1	0	3	3	0	0
2	0	2	1	0	0
2	0	2	3	0	0
2	0	3	1	0	0
2	0	3	3	0	0
3	1	3	1	0	0
3	0	3	3	0	0
4	0	2	1	0	0
4	0	2	3	0	0
4	0	3	1	1	0
4	0	3	3	0	0

## Modifications de structure :

1	48	2
1	49	2
1	48	3
1	49	3

## Ensemble de solutions :

NUMERUS	CONSTITUANTS						COUTS
1	5	2	1	1	2	1	0.43
2	5	2	1	3	2	1	0.43
3	5	2	2	1	2	1	0.43
4	5	2	2	3	2	1	0.43
5	5	2	3	1	2	1	0.43
5	5	2	3	3	2	1	0.43
7	5	2	1	4	2	1	1.40
8	5	2	2	4	2	1	1.40
6	5	2	3	4	2	1	1.40
10	5	2	1	1	2	2	1.43
11	5	2	3	1	2	2	1.43
12	5	2	3	1	2	2	1.43
13	4	2	2	4	3	1	3.20

14									
15	4	5	5	3	4	2	1		3.20
16	5	5	1	1	2	2	1		3.40
17	5	5	2	2	2	2	1		3.40
18	5	5	2	1	2	2	2		3.40
19	5	5	2	2	2	2	2		4.40
20	5	5	2	3	2	2	2		4.40
21	4	4	2	5	2	2	1		4.40
22	4	4	2	3	2	2	1		5.20
23	5	5	2	1	1	3	1		5.20
24	5	5	2	1	3	3	1		5.23
25	5	5	2	4	1	2	1		5.43
26	5	5	2	4	3	2	1		5.43
27	4	4	2	2	2	2	2		5.20
28	4	4	2	3	2	2	2		5.20
29	5	5	2	1	4	3	1		6.20
30	5	5	2	1	1	3	2		6.23
31	5	5	2	4	4	2	1		6.40
32	5	5	2	4	1	2	2		6.43
33	4	4	2	4	1	2	1		7.23
34	4	4	2	4	4	2	1		8.20
35	5	5	2	1	2	2	1		8.20
36	4	4	2	4	1	2	2		8.23
37	5	5	2	4	2	2	1		8.40
38	5	5	2	5	4	2	1		8.55
39	5	5	2	1	2	3	2		9.20
40	5	5	2	4	2	3	2		9.40
41	4	4	2	4	2	2	1		10.20
42	5	5	2	1	3	1	1		10.23
43	5	5	2	2	3	1	1		10.23
44	5	5	2	3	3	1	1		10.23
45	5	5	2	4	1	3	1		10.23
46	5	5	2	4	3	2	1		10.23
47	5	5	2	3	2	2	1		10.55
48	4	4	2	4	2	2	2		11.20
49	5	5	2	1	4	1	1		11.20
50	5	5	2	2	4	1	1		11.20
51	5	5	2	3	4	1	1		11.20
52	5	5	2	4	4	3	1		11.20
53	5	5	2	4	1	3	2		11.23
54	4	4	2	3	2	2	2		11.55
55	4	4	2	4	1	3	1		12.03
56	4	4	2	5	4	2	1		12.96
57	4	4	2	5	4	1	1		13.00
58	4	4	2	4	4	3	1		13.00
59	4	4	2	4	4	1	1		13.00
60	4	4	2	4	1	3	2		13.03
61	4	4	2	4	2	2	1		13.20
62	4	4	2	4	4	3	1		13.55
63	4	4	2	4	3	3	2		14.20
64	4	4	2	4	2	2	1		14.46
65	4	4	2	4	2	2	2		15.00

66	0	5	4	3	1	1	15.23
67	0	5	4	2	2	1	15.55
68	0	5	2	2	2	2	15.96
69	4	5	4	2	2	2	16.00
70	5	5	4	4	1	1	16.20
71	3	2	4	2	2	2	16.55
72	2	2	4	4	2	1	17.96
73	4	2	4	4	1	1	18.00
74	3	2	3	4	1	1	18.35
75	2	2	4	2	2	1	19.96
76	2	2	2	2	2	2	20.96
78	2	2	2	4	1	1	22.76
79	3	2	3	4	1	1	22.76
80	2	2	4	4	1	1	23.35
81	1	2	4	4	1	1	27.76
82	1	2	5	4	2	1	30.60
83	1	2	3	2	2	2	32.60
84	1	2	4	4	2	1	33.60
85	1	2	4	2	2	1	35.60
86	1	2	4	2	2	2	37.60
87	1	2	3	4	1	1	38.60
88	1	2	4	4	1	1	40.40
89	5	1	2	4	2	1	45.40
90	5	1	5	1	2	1	50.43
91	5	1	1	3	2	1	50.43
92	5	1	2	4	2	1	50.43
93	5	1	1	4	2	1	51.40
94	5	1	3	4	2	1	51.40
95	4	1	2	4	2	1	51.40
96	4	1	5	4	2	1	53.20
97	5	1	1	5	4	1	53.20
98	5	1	1	3	4	1	55.23
99	5	1	1	4	2	1	55.43
100	5	1	4	4	3	1	56.20
101	4	1	4	4	2	1	56.40
102	3	1	5	4	2	1	58.20
103	5	1	4	4	3	1	58.55
104	5	1	4	4	3	1	60.23
105	2	2	2	4	2	1	61.20
106	4	1	4	4	3	1	62.96
107	3	1	4	4	2	1	63.00
108	2	1	4	4	2	1	63.55
109	1	1	5	4	2	1	67.96
110	1	1	4	4	2	1	69.60
							55.60

(nombre de combinaisons : 1200)

Le système étant équivalent à celui du tableau 3, on devra obtenir de façon générale les mêmes résultats. Pourtant, comme on a quand même modifié le niveau 3 :

- Nous ne pourrons pas directement comparer les résultats des tableaux 3 et 4 ;

- Et surtout, du fait de cette augmentation du nombre de noeuds d'une classe, le nombre de solutions associées au tableau 4 sera supérieur à celui du tableau 3 (110 au lieu de 50).

De fait, nous aurons donc ici un plus grand choix mais certainement aussi plus de solutions "inférieures" qu'avec le tableau 3. Ces solutions pourraient être exclues lors de l'analyse critique qui est à effectuer à partir des résultats.

#### V.2.6. Utilisation des valuants dans un sous-programme de traitement

Nous allons maintenant introduire un sous-programme de traitement des valuants comme cela a été annoncé à la fin du chapitre IV. Ainsi donc, seules les incompatibilités dues aux arguments de compatibilité seront introduites en tant que données du problème. Les arguments de valuation seront utilisés dans un sous-programme spécifique au problème traité qui aura pour objectif de générer de nouvelles incompatibilités qui seront soumises au programme principal sous formes de modifications.

Une première application a été actuellement envisagée en ce qui concerne les concentrateurs à héliostats. La matrice de compatibilité structurelle prenant en compte les arguments de compatibilité est donnée en début d'étude.

Les valuants sont introduits dans le sous-programme de traitement qui, au moyen des arguments de valuation et de certains critères prédicatifs, permet de calculer les modifications à apporter à la matrice précédente.

Certains critères prédictifs, en particulier ceux prenant effet sur des arguments de valuation communs à tous les éléments, permettent d'ordonner et de sélectionner les solutions possibles. Dans le cas où plusieurs critères prédictifs sont communs à toutes les classes, on peut alors envisager l'utilisation d'un multi-critère, à chaque critère pouvant être associé un coefficient de pondération.

Nous trouverons en Annexe 7, la première version du sous-programme de traitement envisagé.

Devant l'intérêt conceptuel d'une telle approche, nous pensons poursuivre ce travail en étudiant l'intérêt d'un sous-programme de traitement plus élaboré.

## CONCLUSION

Une étape importante est celle de l'obtention de la matrice de compatibilité ; sa forme définitive sera obtenue après vérification de la validité des premiers résultats relatifs à un système.

L'introduction d'arguments permet de systématiser cette approche morphologique. Un point de vue quantitatif apparaît grâce aux arguments de valuation et aux critères prédictifs.

Le programme, grâce aux possibilités apportées par les modifications de structure et de coût et par les relations n-aires, est d'un manière aisée. Il est rapide puisque les résultats du tableau 3, par exemple, ont été obtenus en moins de 1,5s sur un ordinateur IBM 360. Ceci peut être mis à profit pour multiplier les modifications, tests et changements de valuations et donc de faire de nombreux passages de façon à simuler comme on le désire la structure que peut prendre un système.

Sur l'exemple des concentrateurs solaires, il semble que l'approche formulée soit bien adaptée et puisse donner des résultats intéressants dès qu'on utilise des valuations.

Une prochaine étape va être d'effectuer une valuation suffisamment réaliste et précise de façon à pouvoir envisager d'utiliser les résultats fournis par cette méthode.

Un deuxième exemple, en préparation actuellement, est une tentative de modélisation d'une centrale à photopiles (Annexe 8).

Cette approche a été appliquée à des systèmes énergétiques mais elle a été élaborée dans un objectif plus vaste d'aide à la conception d'un système technologique. Comme des approches assez voisines sont utilisées en architecture, il pourrait être intéressant d'aborder un exemple dans ce domaine.



BIBLIOGRAPHIE

## CHAPITRE V

- 1 R. SAINT-PAUL, P.F. TENIERE-BUCHOT  
(cf. référence 2 du chapitre 2)
  
- 2 P. DELATTRE  
Système, structure, fonction, évolution.  
Essai d'analyse épistémologique. Maloine-Doin éditeurs Paris 1971.
  
- 3 M. GRENON, B. LAPILLONE  
The WELMM approach to energy strategies and options.  
Rapport de recherche 76-19 IIASA - 1976.
  
- 4 RAMAMOHAN L. TUMMALA, HARRY J. CONNOR  
Mass-energy based economic models.  
IEEE Transactions on systems man and cybernetics Vol. SM.C 3, n° 6,  
November 1973.





## CONCLUSION



Prévoir l'avenir a toujours été un des rêves de l'homme. A une époque, où la technique tient une place importante dans le déroulement de nos activités, on a tout de suite cherché à appréhender notre "futur technologique". Ceci a donné naissance aux méthodes de prévision technologique et, en particulier, à l'Analyse Morphologique.

Déjà bien connue sous sa forme qualitative, elle n'avait pas reçu à notre connaissance d'expression suffisante, en tout cas pouvant convenir au type de problèmes posés par la conception de systèmes utilisant des technologies de pointe. C'est à cet aspect que nous avons voulu contribuer. De plus, une quantification de l'Analyse Morphologique a été abordée au moyen d'arguments de valuation qui, associés à des critères prédicatifs, permettent d'ordonner les solutions dans le cas où un argument est commun à toutes les classes du système.

Parmi les filières de conversion de l'énergie solaire, filières en pleine expansion technologique, les concentrateurs à héliostats semblent présenter un réel intérêt en tant qu'exemple d'application de l'Analyse Morphologique du fait du grand nombre d'éléments nécessaires à les caractériser.

Les filières de conversion photothermiques n'ont pas toutes justifié d'être abordées sous cet angle "structurel" ; certaines, telle le collecteur-plan, ne nécessitant pas une telle approche. La première partie de ce mémoire leur est consacrée et ainsi, après un bref chapitre qui veut être une introduction au rayonnement solaire et au rayonnement thermique, deux chapitres ont pour but de présenter le collecteur plan et les concentrateurs par réflexion. En ce qui les concerne, ce mémoire présente surtout un travail de synthèse, d'actualisation des connaissances bien que nous puissions revendiquer certains points non sans importance tel, par exemple, le synoptique général des filières d'utilisation de l'énergie solaire.

Ce n'est pas sur une seule application, aussi intéressante soit-elle, qu'il faut tabler pour conclure à l'intérêt conceptuel d'une méthodologie telle l'Analyse Morphologique dans sa version quantitative. Il est donc nécessaire d'envisager d'autres applications ; ceci a déjà été fait en ce qui concerne les concentrateurs photovoltaïques. De façon à ne pas se cantonner à l'analyse des filières énergétiques, il serait également très instructif de chercher des exemples d'application dans des domaines différents comme l'architecture par exemple.

Un effort devrait également être fait d'un point de vue formel. Il semble que l'Analyse Morphologique aurait beaucoup à gagner à ce que le formalisme ébauché dans ce mémoire soit développé. Il ne faudrait pas tomber dans l'excès contraire et toujours garder à l'esprit que l'Analyse Morphologique se veut être, avant tout, un outil de conception et doit donc garder un aspect pratique.

## ANNEXES





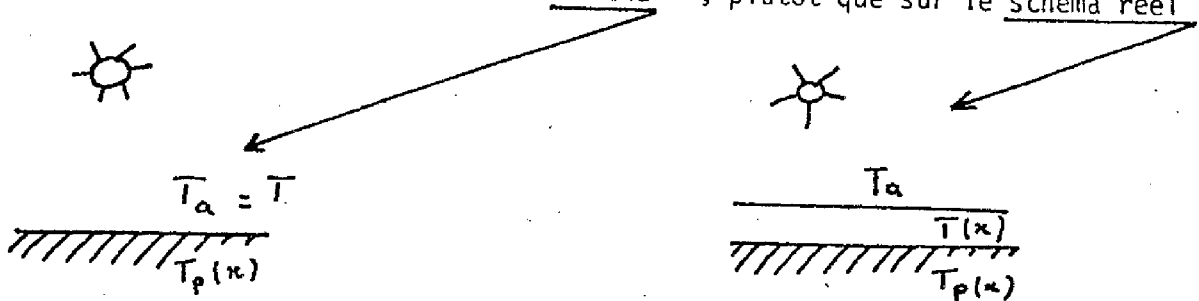


comme

$$ch b x = \frac{1}{2} (e^{bx} + e^{-bx})$$

$$T_p(x) = T_t \left( \frac{ch b x}{ch b L} \right) + \left( T_a + \frac{q_s - \epsilon R'}{U_L} \right) \left( 1 - \frac{ch b x}{ch b L} \right)$$

Voici donc déterminée la température  $T_p(x)$ . Il faut signaler qu'ici on a un corps directement exposé au soleil sans l'intermédiaire d'un vitrage. C'est à dire qu'on a travaillé sur le schéma , plutôt que sur le schéma réel :

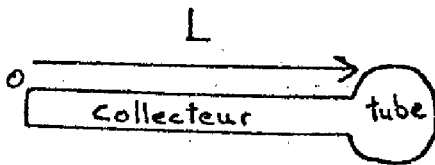


N'apparaissent donc pas les phénomènes liés à la différence de température  $(T - T_a)$ .

comme :  $q_u = q_{u-x}$

On va maintenant déterminer le  $q_u$  moyen =  $q_{um} = \frac{Q_{u=L}}{L \Delta y}$  ← quantité d'énergie fournie au tube.  
 on suppose que l'énergie est répartie uniformément entre :  $x=0$  et  $x=L$

L : Longueur du collecteur entre l'origine choisie 0 et le tube transportant le liquide.



On a donc  $\frac{Q_{u=L}}{L \Delta y} = -\frac{kM}{L} \frac{dT_p}{dx} \Big|_{x=L}$

d'où en utilisant la valeur

de  $T_p$  trouvée précédemment :

$$q_u = \frac{thbL}{bL} \left[ q_s - \epsilon R' - U_L (T_t - T_a) \right] = \text{Quantité moyenne de chaleur /s récupérée par le corps.}$$

$$T_{p\text{moyen}} = \frac{1}{L} \int_0^L T_p(x) dx = T_t \frac{thbL}{bL} + \left( T_a + \frac{q_s - \epsilon R'}{U_L} \right) \left( 1 - \frac{thbL}{bL} \right)$$

On peut exprimer le transfert de chaleur à travers la cale par :

$$q_{u-plaque} = \frac{d}{w} U_c (T_c - T_r)$$

et entre le tube et le fluide par :

$$q_{u-tube} = \frac{\pi d_o h_c}{w} (T_r - T_w)$$

↓

$$q_{um} = q_{u-tube m} + q_{u-plaque m}$$

On veut avoir une équation de la forme :

$$q_{um} = F_c \left( q_s - \varepsilon R' - U_L (T_{w moy} - T_a) \right)$$

$$\Rightarrow F_c = \frac{c_2 (U_c + U_L) + c_1 U_c}{\frac{U_L}{c_3} (c_2 (U_L + U_c) + c_1 U_c) + U_c + \frac{c_2 U_L}{c_1}}$$

avec

$$c_1 = \frac{d}{w} \quad c_2 = \left(1 - \frac{d}{w}\right) F \quad c_3 = \frac{\pi d_o h_c}{w}$$

$$\Rightarrow F_c = \frac{1}{\frac{w U_L}{\pi d_o h_c} + \frac{1}{\frac{d}{w} + \frac{1}{\frac{w U_L}{d U_c} + \frac{1}{\left(1 - \frac{d}{w}\right) F}}}}$$

Si on veut exprimer  $q_u$  en fonction de  $T_{w0}$ , température du fluide à la sortie du collecteur au lieu de  $T_{w moy}$ .

Si on introduit  $T_{w0}$  et  $F_R$ , on a : (hyp:  $T_{w in} = T_a$ .)

$$q_{um} = F_R \left( q_s - \varepsilon R' - U_L (T_{w0} - T_a) \right)$$

$F_R$  étant calculé comme suit :

$$q_{u,x} = F_c \left[ q_s - \varepsilon R - U_L (T_w - T_a) \right]$$

$$\Rightarrow dq_{u,x} = - F_c U_L dT_w$$

pour le transfert de chaleur entre le système et le fluide, on a :

$$q_{u,x} \Delta y dx = \underbrace{G L \Delta y}_{\text{quantité de liquide circulant dans } \Delta y dx \text{ en g/s}} dT_w$$

accroissement de la quantité de chaleur associée à l'aire  $\Delta y dx$  = accroissement de la quantité de chaleur gagnée par le fluide en mouvement dans cette aire.

$$\Rightarrow \frac{dq_{u,x}}{q_{u,x}} = - \frac{F_c U_L}{G C L} dx$$

$$\Rightarrow q_{u,x} = q_{u,0} e^{-\left(\frac{F_c U_L x}{G C L}\right)}$$

$$\Rightarrow q_{u,moy} = q_{u,m} = \frac{1}{L} \int_0^L q_{u,x} dx = q_{u,0} \frac{1}{L} \int_0^L e^{-\frac{F_c U_L x}{G C L}} dx$$

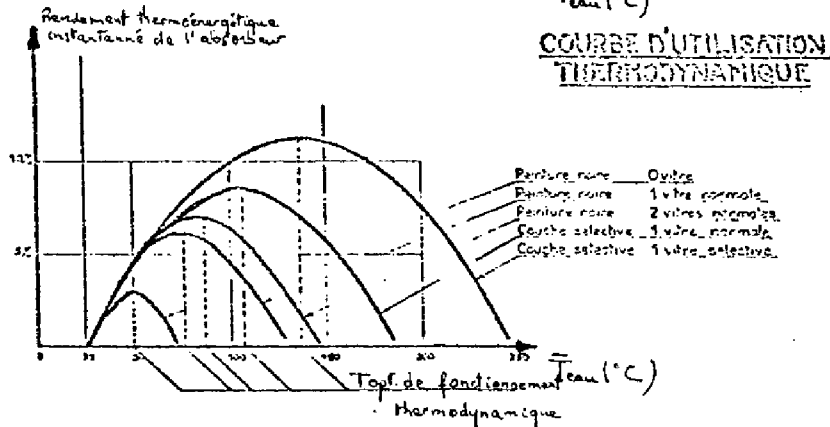
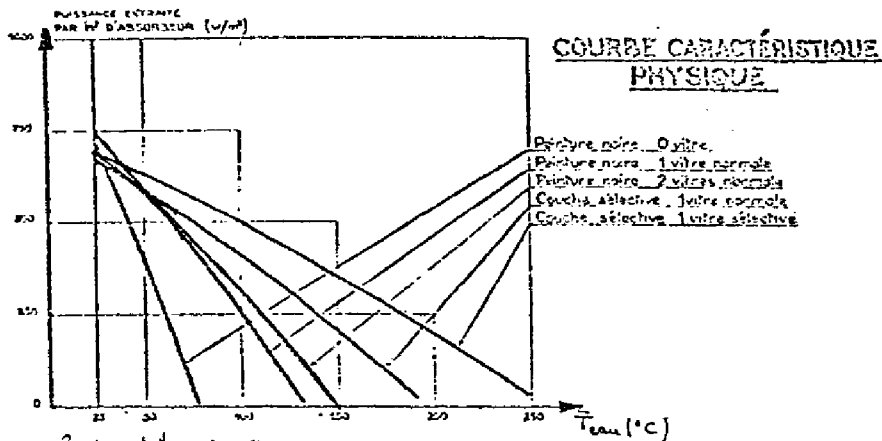
$$\text{et } q_{u,0} = F_c \left( q_s - \varepsilon R' - U_L (T_{w,0} - T_a) \right)$$

$$q_{u,m} = \frac{F_c G C}{F_c U_L} \left( 1 - e^{-\frac{F_c U_L}{G C}} \right) \left( q_s - \varepsilon R' - U_L (T_{w,0} - T_a) \right)$$

$$F_R = \frac{G C}{U_L} \left( 1 - e^{-\frac{F_c U_L}{G C}} \right)$$

**CAPTEURS SOLAIRES PLANS SPÉCIAUX**  
**VARIATION DU NOMBRE DE VITRES**  
**REVÊTEMENT SÉLECTIF**  
**VITRE SÉLECTIVE**

Incidence normale, débit élevé, position horizontale, vent nul  
 Flux solaire  $1000 \text{ w/m}^2$   
 Couche sélective  $\epsilon_{\text{sr}} = 0,25$  et  $0,95$   
 Vitre sélective  $\epsilon_{\text{sr}} = 0,1$



Comparaison des rendements des différents collecteurs.

[ Flux,  $946 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  ]

Collecteur	Température d'entrée $T_1 (^{\circ}\text{K})$		
	302	333	366
Rendement $\eta$			
3glaces, revêtement "noir nichel"	0,71	0,63	0,50
- , revêtement noir nat	0,73	0,60	0,42
2Tedlar, revêtement "noir nichel"	0,53	0,43	0,29

Paramètres de performance des collecteurs.

Collecteur	Température moyenne du collecteur $T_p$ ( $^{\circ}K$ )								$\alpha_T$
	311		366		311		366		
	Facteur d'efficacité du collecteur $F'$		Efficacité du transfert de chaleur $F_R$		coefficient global de pertes $U_L$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]				
				Expé- rience	Théorie	Expé- rience	Théorie		
① 2glaces, revêtement noir nickel	0,96	0,97	0,94	0,94	3,00	2,10	3,38	3,12	0,75
② - , revêtement noir mat	0,97	0,97	0,93	0,95	4,10	3,63	4,92	4,72	0,73
③ 2 Tedlar, "noir nickel"	1,00	0,99	0,95	0,95	3,74		4,08		0,56

Propriétés radiatives des collecteurs.

collecteur	absorptivité $\alpha$		Emissivité $\epsilon$	Transmittance $\tau$
	mesurée	calculée		
①	0,95	0,92	0,08	0,78
②	0,95	0,93	0,95	0,78
③	0,73	0,79		0,68

Températures de l'absorbeur, le liquide ne circulant pas.

[ Radiation directe incidente =  $946 W \cdot m^{-2}$   
Température ambiante =  $302^{\circ}K$  ]

Collecteur	Temp.
①	480
②	436
③	430

ANNEXE 4 (Chapitre II)

- Pour une dépense  $D_1$  (1), à la fin de la première année, le coefficient est  $\frac{1}{1+i}$  (avec  $i$  = Taux d'actualisation exprimé en %).

- La valeur actualisée de cette dépense est donc :

$$\frac{1}{1+i} \cdot D_1$$

- Pour une dépense  $D_n$  ; à la fin de l'année  $n$  ; le coefficient  $(\frac{1}{1+i})^n$  ; et la valeur actualisée de cette dépense est donc :  $(\frac{1}{1+i})^n D_n$ .

remarque :

Dans le cas où les frais ne sont pas constants chaque année ; c'est à dire si nous introduisons un taux de croissance des coûts instantanés ; nous aurons dans le cas où ce taux de croissance est exponentiel :

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-it} \cdot e^{\alpha t} = C_0 \cdot e^{(\alpha - i)t} = C_0 \cdot e^{-rt}$$



### ANNEXE 5 [3] (Chapitre III)

On peut associer le coût de chaque sous-système de la station énergétique solaire avec le coût actualisé de sa maintenance pendant sa durée de vie :

$$\text{Coût global} = C = \sum_j (I_j + e_j S_n)$$

avec

- $I_j$  = Coût d'investissement du sous-système  $j$
- $e_j$  = Coût d'entretien annuel du sous-système  $j$
- $S_n$  = Terme d'actualisation à l'année  $n$ .

Le but sera de minimiser la somme  $(I_j + e_j S_n)$ .

Dans le cas où  $e_j$  n'est pas constant dans le temps, on recherche

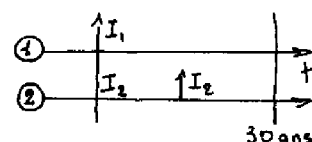
$$\text{le min} \left( I_j + \sum_i \frac{e_{ij}}{(1+\alpha)^i} \right)$$

avec  $\alpha$  = Taux d'intérêt.

L'impact réduit des dépenses futures peut conduire à limiter la durée de vie de certains sous-systèmes, si de cette manière on réduit sensiblement leur coût initial.

Si on considère deux cas couvrant l'un ou l'autre une vie totale de 30 ans, le premier avec un sous-système d'une durée de vie de 15 ans (1 remplacement), le second avec un sous-système d'une durée de vie de 10 ans (2remplacements).

- 1) On compare la solution 1 ;  $n = N = 30$   
et la solution 2 ;  $n = 15$



$$I_1 = (R_1 - D_1) \cdot S_{\alpha, 30} \quad ; \quad I_2 + \frac{I_2}{(1+\alpha)^{15}} = (R_2 - D_2) \cdot S_{\alpha, 30}$$

avec

- $\left\{ \begin{array}{l} R = \text{Recettes} \\ D = \text{Dépenses} \end{array} \right.$



La solution 2 sera compétitive si :

$$R_2 - D_2 \geq R_1 - D_1 \quad ; \quad I_2 \left(1 + \frac{1}{(1+\alpha)^{15}}\right) \geq I_1$$

$$I_2 \leq k_2 I_1$$

avec  $k_2 = \frac{(1+\alpha)^{15}}{1+(1+\alpha)^{15}}$

$\alpha$	0.05	0.1	0.12	0.15	0.2
$k_2$	0.67	0.8	0.84	0.89	0.93

Pour  $\alpha = 0, 1$ , la réduction de la durée de vie par un facteur 2 est acceptable si le prix est réduit de 20 %.

2) Si on compare la solution 1 avec une solution 3 ( $n = 10$ ) la solution 3 sera compétitive si :

$$I_3 + \frac{I_3}{(1+\alpha)^{10}} + \frac{I_3}{(1+\alpha)^{20}} \geq I_1$$

$$I_3 \leq k_3 I_1$$

avec  $k_3 = \frac{(1+\alpha)^{20}}{1+(1+\alpha)^{10}+(1+\alpha)^{20}}$

$\alpha$	0.05	0.1	0.12	0.15	0.2
$k_3$	0.5	0.65	0.7	0.76	0.84

pour  $\alpha = 0.1$ , la réduction de la durée de vie par un facteur 3 est acceptable si le prix est réduit de 35 %.

De façon plus générale, si on a un sous-système de durée  $p$  et un autre de durée  $n$ . La solution de durée de vie  $n$  sera compétitive si :

$$I_n \leq I_p \cdot \frac{(1+\alpha)^p}{(1+\alpha)^{p-1}} \cdot \frac{(1+\alpha)^{n-1}}{(1+\alpha)^n}$$

DMPILER

/\* ENERGIE SOLAIRE:CENTRALE HELIOTHERMODYNAMIQUE \*/<sup>11</sup>

## SOURCE LISTING

```

0000010      /* ENERGIE SOLAIRE:CENTRALE HELIOTHERMODYNAMIQUE */
0000020      ENRSOL:PROC OPTIONS(MAIN) ;
0000030      DCL (N,I,J,KI,KJ,KL,L,M,MP) BIN FIXED ,
0000040      (QA,QB,O,E) POINTER ,
0000050      CMAX FLOAT(6) ,
0000060      W BIT(30) VAR ;
0000070      DCL (K(*),P(*)) BIN FIXED CTL ,
0000080      C(*) FLOAT(6) CTL,
0000090      V(*) BIT(30) VAR CTL ;
0000100      DCL 1 SA BASED , 2 IL BIN FIXED , 2 QL(KL REFER(IL)) POINTER ;
0000110      DCL 1 LA BASFD , 2 CO FLOAT(6) ,
0000120      2 LI BIN FIXED, 2 LISTE(N REFER(LI)) BIN FIXED ;
0000130      GET LIST(N) ;
0000140      ALLOCATE P(N),K(N) ;
0000150      GET LIST((P(I) DO I=1 TO N)) ;
0000160      K(1)=0 ;DO I=2 TO N ;
0000170      K(I)=K(I-1)+(N-I+1)*P(I-1) ; END ;
0000180      M=K(N) ;
0000190      ALLOCATE V(M) ;GET LIST((V(I) DO I=1 TO K(N))) ;
0000200      MP=0 ; DO J=1 TO N ; MP=MP+P(J) ;END ;
0000210      ALLOCATE C(MP) ; GET LIST((C(J) DO J=1 TO MP)) ;
0000220      GET LIST(CMAX) ;
0000221      PUT SKIP(2) EDIT('NOMBRE DE CLASSES',N,
0000222      'NOMBRE D ELEMENTS DANS CHAQUE CLASSE',(P(J) DO J=1 TO N))
0000223      (X(5),A,X(5),F(3),SKIP,X(5),A,(N)(X(3),F(3))) ;
0000224      PUT SKIP(2) EDIT('MATRICE DE COMPATIBILITE',(V(J) DO J=1 TO K(N)))
0000225      (X(5),A,(K(N))(X(3),B,SKIP,X(3))) ;
0000226      PUT SKIP(2) EDIT('COUT DES ELEMENTS',(C(J) DO J=1 TO MP),
0000227      'COUT TOTAL MAXIMUM',(CMAX)(X(5),A,(MP)(X(3),F(3)),
0000228      SKIP,X(5),A,X(3),F(3)) ;
0000229
0000230      RECHER: BEGIN ;
0000231      /* INITIALISATION */
0000240      KJ=0 ;KL=P(1)*P(2) ; MP=P(1) ;
0000250      ALLOCATE SA SET(QA) ; QA->QL(*)=NULL() ;
0000260      DO I=1 TO P(1) ; W=V(I) ;
0000270      A2: KI=INDEX(W,'1'B) ; IF KI=0 THEN GO TO A1 ;
0000280      KJ=KJ+1 ;
0000290      ALLOCATE LA SET(O) ; QA->QL(KJ)=O ;
0000300      O->LISTE(*)=O ;O->LISTE(1)=I ;O->LISTE(2)=KI ;
0000310      O->CO=C(I)+C((MP+KI)) ;
0000320      SUBSTR(W,KI,1)='0'B ;GO TO A2 ; A1: END ;
0000330      /* ITERATION M */
0000340      DO M=1 TO N-2 ; MP=MP+P(M+1) ;
0000350      KL=KJ*P(M+2) ; L=KJ ; KJ=0 ;
0000360      ALLOCATE SA SET(QB) ; QB->QL(*)=NULL() ;

```

COMPILER

/\* ENERGIE SOLAIRE:CENTRALE HELIOTHERMODYNAMIQUE \*/

```

00000370      DO I=1 TO L ; /*BOUCLE SUR LES ANCIENNES LISTES */
00000380      O=QA->QL(I) ;
00000390      W=V((M*P(1))+O->LISTE(1)) ;
00000400      DO J=2 TO M+1 ;
00000410      W=W&V(K(J)+((M+1-J)*P(J))+O->LISTE(J)) ;
00000420      END ; A3:KI=INDEX(W,'1'B) ;
00000430      IF KI=0 THEN GO TO A4 ; KJ=KJ+1 ;
00000440      ALLOCATE LA SET(E) ; QB->QL(KJ)=E ;
00000450      E->LISTE(*)=O->LISTE(*) ;
00000460      E->LISTE(M+2)=KI ;
00000461      E->CO=O->CO+C((MP+KI)) ;
00000470      IF (E->CO>CMAX) THEN DO ; KJ=KJ-1 ; FREE E->LA ; END ;
00000480      SUBSTR(W,KI,1)='0'B ; GO TO A3 ;
00000490      A4: FREE O->LA ; END ;
00000500      FREE QA->SA ; QA=QB ;
00000510      IF KJ=0 THEN DO ;
00000520      PUT SKIP EDIT('ENSEMBLE DE SOLUTIONS VIDE')(X(15),A) ;
00000530      GO TO F1 ;
00000540      END ; END ; /*FIN DE L'ITERATION M */
00000541      DO I=1 TO KJ-1 ; O=QA->QL(I) ; L=I ;
00000542      DO J=I+1 TO KJ ; E=QA->QL(J) ;
00000543      IF (E->CO)<(O->CO) THEN DO ; O=E ; L=J ; END ;
00000544      END ;
00000545      QA->QL(L)=QA->QL(I) ; QA->QL(I)=O ;
00000546      END ;
00000550      PUT SKIP(5) EDIT('ENSEMBLE DE SOLUTIONS:')(X(30),A) ;
00000560      PUT SKIP(3) ;
00000570      DO I=1 TO KJ ; PUT SKIP EDIT(I)(X(5),F(3),X(5)) ;
00000580      DO J=1 TO N ; O=QA->QL(I) ; L=O->LISTE(J) ;
00000590      PUT EDIT(L)(X(1),F(3)) ; END ;
00000600      XSI=O->CO ; PUT EDIT(XSI)(X(3),F(6,2)) ;
00000610      END ;
00000620      F1: END RECHER ;

00000630      DCL MOT CHAR(30) VAR , BR BIT(1) ;
00000640      GET LIST(MOT) ; IF MOT='FIN' THEN GO TO FIN ;
00000650      IF MOT='MODIF STRUC' THEN DO ; GET LIST(J) ;
00000660      PUT SKIP(5) EDIT('MODIFICATION DE STRUCTURE:')(X(5),A) ;
00000670      DO I=1 TO J ; GET LIST(BR,KI,KJ) ;
00000680      PUT SKIP EDIT(BR,KI,KJ)(X(20),B,X(5),F(3),X(5),F(3)) ;
00000690      SUBSTR(V(KI),KJ,1)=BR ; END ;
00000700      GO TO RECHER ; END ;
00000710      IF MOT='MODIF COUT' THEN DO ;
00000711      MP=MP+P(N) ;
00000720      GET LIST((C(J) DO J=1 TO MP),CMAX) ;
00000730      PUT SKIP(5) EDIT('MODIFICATION DES COUTS:',(C(J) DO J=1 TO MP),
00000740      CMAX)(X(5),A,X(5),(MP) F(3),X(3),X(3),F(4)) ;
00000750      GO TO RECHER ; END ;
00000760

```

A) On entre les modifications sous la forme :

- 1) "MODIF STRUC"      Nombre de modifications
- a) '1' B    X    Y      →       $\left\{ \begin{array}{l} X = \text{ligne concernée dans la matrice} \\ Y = \text{colonne} \quad " \quad " \quad " \quad " \end{array} \right.$
- b) '0' B    X    Y
- ( matrice sous la forme donnée en résultat par le programme. )

explications : a) On met un 1 dans la matrice entre la Xième ligne et la Yième colonne.

b) On met un 0 dans la matrice entre la Xième ligne et la Yième colonne.

Dans le cas où il y aurait déjà un 1 (a) ) ou un 0 (b) ) dans la matrice, le système est "transparent".

- 2) "MODIF COUT" suivi de l'ensemble des coûts (y compris  $C_{\max}$ ).

Les coûts modifiés apparaissent dans cette liste.

On peut mettre autant de modifications ( ' ' ) que l'on veut dans l'ordre qu'on veut.

On termine les modifications en mettant la carte 'FIN'.

Cette carte apparaît également après les données dans le cas où il n'existe aucune modification.

### B) Relations "N-aires"

On va pouvoir ainsi éliminer de l'ensemble des solutions possibles toutes les solutions d'ordre N (nombre de niveaux) que nous jugerons inacceptables.

Ces nouvelles données seront entrées sous la forme :

Nombre de modifications      modifications

On doit mettre 0 dans le cas où il n'y en a aucune.

Cette carte est à placer après celle des coûts (après  $C_{\max}$ ).

Les modifications se présentent sous la forme :

par exemple : 1 0 2 0 veut dire qu'on veut éliminer toutes les solutions passant { par le noeud 1 du 1er niveau, } quelques soient  
 { et le noeud 2 du 3ème niveau }

les noeuds des niveaux 2 et 4 par lesquels passent ces mots.

#### Applications :

Nous allons présenter les résultats relatifs à l'exemple appelé "Exemple Algo" (voir chapitre IV)

Nous avons effectué 3 modifications de structure.

" " " 2 " " solutions.

Nombre de classes

Nombre d'éléments dans chaque classe : 3 3 3 3

Matrice de compatibilité :

	{ 110 }	456	110 veut dire que 1 est comp avec 4, 5
	{ 111 }		111. " " " 2 " " " 4,5, 6
	{ 010 }		010 " " " 3 " " " 5.
123	{ 011 }	789	
	{ 111 }		
	{ 111 }		
	{ 100 }		
	{ 010 }	10 11 12	
	{ 110 }		
456	{ 110 }	789	
	{ 010 }		
	{ 001 }		
	{ 111 }		
	{ 111 }	10 11 12	
	{ 111 }		
789	{ 100 }		
	{ 010 }	10 11 12	
	{ 001 }		

```

/* ENER-117 SOLAIRE:CENTRALE HELIOTHERMODYNAMIQUE */
ENR:PROC OPTIONS(MAIN) ;
  DCL VAR CHAR(4) VAR,(NOUV,NV) BIN FIXED;
  DCL (HC(*),HN(*),CH(*),TH(*),TS(*),RN(*),RS(*))
    DEC FLOAT CTL ;
  DCL (N,I,J,KI,KJ,KL,L,M,MP,NLE) BIN FIXED ,
    (QA,QB,C,E) POINTER ,
  CMA: FLOAT(6) *
  W BIT(30) VAR ;
  DCL (R(*),P(*)) BIN FIXED CTL ,
  C(*) FLOAT(6) CTL, LE(*,*) BIN FIXED CTL ,
  V(*) BIT(30) VAR CTL ;
  GET LIST (N) COPY;
  ALLOC P(N) , K(N);
  GET LIST (P) COPY;
  ALLOCATE HC(P(1)),HN(P(1)),CH(P(3)),TH(P(4)),TS(P(4)),RN(P(5)),
    RS(P(5)) ;
  GET LIST (HC,HN,CH,TH,TS,RN,RS) COPY;
  DCL I SA BASED , 2 IL BIN FIXED , 2 QL(KL REFER(IL)) POINTER;
  DCL I LA BASED , 2 CO FLOAT(6) ,
    2 LI BIN FIXED, 2 LISTE(N REFER(LI)) BIN FIXED ;
  MATRIX : PROC ;
  DCL (C,A,B,NK) BIN FIXED ;
  DCL RT LABEL ,(SV(10),SCH(10)) DEC FLOAT ;
  DCL LAB1(5) LABEL INITIAL (S,SP13,S ,SP15,S) ;
  DCL LAB2(4) LABEL INITIAL (S22,SP24,SP25,SP26);
  DCL LAB3(3) LABEL INITIAL (S33 ,SP35,S33 ) ;
  DCL LAB4(2) LABEL INITIAL (SP45,SP46 ) ;
  DCL LAB5(1) LABEL INITIAL (SP56) ;
  K(1)=0,DO I=2 TO N:K(I)=K(I-1)+(N-I+1)*P(I-1);END;
  M=K(N);ALLOCATE V(M);
  L=0;
  DO J=1 TO N-1;
  DO NCC=J TO N-1 ;
  DO I=1 TO P(J);
  NB= P(1+NCC);
  L=L+1;
  V(L)=REPEAT('1'B,NB-1);
  IF L=M THEN GOTO SUITE;
  END;END;END; SUITE:
  DO A = 1 TO N-1 ;
  IF A=1 THEN GO TO S2;
  DO B = A+1 TO N ;
  GO TO LAB1(B-A);
  S2: DO I= 1 TO P(A);
  DO J= 1 TO P(B) ;
  PY=3.1416 ;
  SV(I) = HC(I)*hC(I)*HN(I);
  SCH(J) =CH(J)*CH(J)*PY;
  IF SV(I)>=SCH(J)/5
  THEN CALL MODIF ;
  END: END: GO TO LAB1(1);
  MODIF:PROC ; KJ=J;K(1)=0; IF A=1 THEN DO;KI=I+P(A)*(B-2);END;
  ELSE DO:DO NK=1 TO A;

```

```

      K(NK+1)=K(NK)+P(NK)*(N-NK) ;END ;
      KI=K(A)+I+P(A)*(B-A-1) ; END ;
      SUBSTR (V(KI),KJ,1) = '0'B ; END MODIF ;
SP15:   DO I=1 TO P(A) ;
        DO J=1 TO P(B) ;
          IF RN(J)<=HC(I) THEN CALL MODIF ;
        END;END;GO TO LAB1(1) ;
S:     END ;
S2:    IF A ^=2 . THEN GO TO S3 ;
        DO B = A+1 TO N ; GO TO LAB2(B-A) ;
SP24:  DO I=1 TO P(A) ;
        DO J=1 TO P(B) ;
          IF TS(J)=0&I=1 THEN CALL MODIF ;
        END ;END ;GO TO LAB2(1) ;
SP25:  I=1 ; J=1 ; RET=S22 ; CALL MODIF ;GOTO RET ;
SP26:  I=1 ; J=2 ; RET=S22 ; CALL MODIF ;GOTO RET ;
S22:   END ;
S3:    IF A ^=3 THEN GO TO S4 ;
        DO B = A+1 TO N ;
          GO TO LAB3(B-A) ;
SP35:  I=4 ; J=1 ; CALL MODIF ;
S33:   END ;
S4:    IF A ^=4 THEN GO TO S5 ;
        DO B = A+1 TO N ;
          GO TO LAB4(B-A) ;
SP45:  DO I=1 TO P(A) ;
        DO J=1 TO P(B) ;
          RET = IA ;
          IF TS(I)=0 & J=1 THEN DO ; CALL MODIF ; GOTO RET;END ;
          IF TS(I)=1 & J^=1 THEN CALL MODIF ; GOTO RET ;
        END ;END ;GO TO S44 ;
SP40:  DO I=1 TO P(A) ;
        DO J=1 TO P(B) ;
          IF (TS(I)=1 & J=2) THEN CALL MODIF ;
        END;END;S44;END ;
S5:    IF A ^=5 THEN GO TO FIN ; B=A+1 ;
SP36:  I=1 ; J=2 ; RET=FIN ;CALL MODIF ;
        END;END ; PUT SKIP EDIT((V(I) DO I=1 TO K(N))
        (X(5),X(4))(X(25),B,SKIP,X(9))) ;
LOCATE; LE(40,6) ;
LE=1 ;NLE=0.
SP134: A=1 ;B=3 ;C=4 ;
        DO I=1 TO P(A) ;DO J=1 TO P(B) ;DO NK=1 TO P(C) ;
          IF TS(NK)=1 THEN DO ;SCH(J)=SCH(J)/3 ;
            IF SV(I)>SCH(J)/5 THEN DO ;
              NLE=NLE+1 ;LE(NLE,A)=I ;LE(NLE,B)=J ;LE(NLE,C)=NK ; END ;
            END ;
          END ;
        END ;
SP135: C=5 ;
        DO I=1 TO P(A) ;DO J=1 TO P(B) ;DO NK=1 TO P(C) ;
          IF HC(I)+CH(J)/100>RN(NK) THEN DO ;
            NLE=NLE+1 ;LE(NLE,A)=I ;LE(NLE,B)=J ;LE(NLE,C)=NK ; END ;
          END ;
        END ;
        PUT SKIP LIST (LE) ;
        END MATRIX ;
SP=0 ; DO J=1 TO N ; MP=MP+P(J) ;END ;
ALLOCATE C(MP) ; GET LIST((C(J) DO J=1 TO MP)) ;
GET LIST(CMAX) ;
PUT SKIP(2) EDIT('NOMBRE DE CLASSES',N,
'NOMBRE D ELEMENTS DANS CHAQUE CLASSE',(P(J) DO J=1 TO N))
(X(5),A,X(5),F(3),SKIP,X(5),A,(N)(X(3),F(3))) ;
PUT SKIP(2) EDIT('MATRICE DE COMPATIBILITE:',(V(J) DO J=1 TO K(N)
(X(5),A,(K(N))(X(3),B,SKIP,X(30))) ;
PUT SKIP(2) EDIT('COUT DES ELEMENTS:',(C(J) DO J=1 TO MP),
'COUT TOTAL MAXIMUM:',CMAX)(X(5),A,(MP)(X(3),F(6,2)),
SKIP,X(5),A,X(3),F(6,2)) ;
PUT SKIP(2) EDIT('CONSTITUANTS EXCLUS:',LE)
(X(5),A,(NLE),SKIP,X(25),B,SKIP,X(9))) ;

```

ANNEXE 8 (Chapitre V)

Le tableau morphologique retenu pour les dispositifs photovoltaïques est le suivant :

Matériaux de base	S i	C d S	Ga As	Cd Te	Ge
Traitement	tirage	évaporation	épitaxie	Spray	rubans
technologie	homojonction	hétérojonction	Schottky	gap variable	
concentrat. 1	Sans	lentilles	héliostat	parabole	cylindro parabolique
concentrat. 2	Sans	"	"	"	"
Refroidis.	Sans	air	eau	fluide spéc.	
Guidage	Sans	mono pivot	bi pivot		
Stockage	Sans	Accus	E. pot. (pompage)	Inertie mécanique	





## TABLE DES MATIÈRES

---

INTRODUCTION	1
--------------	---

### PREMIÈRE PARTIE

#### LES FILIÈRES PHOTOTHERMIQUES DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

-:-

#### CHAPITRE I - RAYONNEMENT SOLAIRE ET RAYONNEMENT THERMIQUE

Introduction	10
I.1 - Le rayonnement solaire	11
I.1.1 - Généralités	11
I.1.2 - Rayonnement solaire direct et diffus	12
I.1.3 - Ensoleillement et irradiation	14
I.2 - Le rayonnement thermique	17
I.2.1 - Notions générales relatives au rayonnement thermique	17
I.2.1.1 - Energie rayonnée sur l'ensemble des longueurs d'onde	17
I.2.1.2 - Répartition spectrale de l'énergie	20
I.2.2 - Processus d'absorption, de réflexion et de transmission	21
I.2.3 - Cas particulier du corps noir	22
I.2.3.1 - Définition	22
I.2.3.2 - Loi de Planck	22
I.2.3.3 - Loi de Stéphan Boltzmann	23
I.2.4 - Emissivité d'un corps	24
I.2.5 - Application - Effet de serre - Filières d'utilisation de l'énergie solaire	24
Conclusion	27
Bibliographie	29

## CHAPITRE II - LE COLLECTEUR PLAN

Introduction	33
II.1 - Rappels d'optique géométrique, prise en compte de l'angle d'incidence	33
II.1.1 - Transmittance et pertes par réflexion de plusieurs plaques parallèles d'un collecteur solaire - formules et tables pour $n = 1,5$	33
II.1.2 - Variation de l'émissivité en fonction de l'angle d'incidence courbes pour plusieurs matériaux	39
II.1.3 - Recherche de l'inclinaison optimale du collecteur	40
II.2 - Rappels de thermique	41
II.3 - Etude qualitative du collecteur plan à 1 vitrage	42
II.4 - Amélioration du rendement des capteurs	44
II.4.1 - Diminution des pertes par rayonnement	44
II.4.2 - Diminution des pertes par conduction et convection	45
II.4.3 - Coefficient global des pertes énergétiques $U_L$	45
II.5 - Utilisation	47
II.5.1 - Utilisation d'un fluide caloporteur	47
II.5.2 - Equations régissant le transfert au fluide	48
II.6 - Paramètres spécifiques du collecteur plan	55
II.7 - Applications	58
II.7.1 - Installation interne	58
II.7.2 - Introduction des notions de coût et de système auxiliaire	65
II.7.2.1 - Détermination des différentes fonctions de coût	67
II.7.2.2 - Recherche de l'investissement optimal pour le chauffage solaire	68
Conclusion	77
Bibliographie	79

## CHAPITRE III - LES CONCENTRATEURS

Introduction	83
III.1 - Introduction à la concentration	84
III.1.1 - Concentration ponctuelle C	84
III.1.2 - Les divers type de concentration	86
III.1.3 - Les divers concentrateurs	88
III.2 - Introduction aux stations énergétiques solaires	89
III.3 - Approche succincte des concentrateurs	93
III.3.1 - Le cylindro-parabolique - Le paraboloïde	93
III.3.2 - La concentration par héliostats	110
III.3.3 - Introduction aux problèmes thermiques	120
Conclusion	122
Bibliographie	123

## DEUXIÈME PARTIE

### AIDE A LA CONCEPTION, APPLICATION DANS LE DOMAINE DE L'ENERGIE SOLAIRE

-:-

## CHAPITRE IV - ESSAI MÉTHODOLOGIQUE D'AIDE À LA CONCEPTION

Introduction	129
IV.1 - Définitions	129
IV.2 - L'analyse morphologique	131
IV.2.1 - Introduction	131
IV.2.2 - La technique de l'analyse morphologique	132
IV.2.3 - Les difficultés de mise en oeuvre de l'analyse morphologique	135
IV.3 - Formulation et formalisation du problème	137
IV.4 - Problème de valuation	142
IV.5 - Algorithmique	143
IV.5.1 - Problème du cheminement dans une arborescence	143
IV.5.2 - Problème posé par les arguments de valuation	146
IV.5.3 - L'algorithme et sa programmation	147
Conclusion	149
Bibliographie	151

## CHAPITRE V - APPLICATION DE L'ANALYSE MORPHOLOGIQUE

Introduction	155
V.1 - Le synoptique, le collecteur plan	155
V.2 - Applications aux concentrateurs du rayonnement solaire	157
V.2.1 - Obtention du tableau morphologique de départ	157
V.2.2 - Introduction de valuants qualitatifs	162
V.2.3 - Introduction de valuants quantitatifs	164
V.2.4 - Type d'analyse sur laquelle peut déboucher une telle approche	173
V.2.5 - Introduction de relations n-aires	174
V.2.6 - Utilisation des valuants dans un sous programme de traitement	179
Conclusion	180
Bibliographie	183
CONCLUSION	184
ANNEXES	189