CHAPITRE II

MODELISATION DES FACTEURS DE CONCENTRATION ET DES REPARTITIONS DE LUMINANCE OBSERVABLES SUR LES FACETTES REFLECTRICES

1) INTRODUCTION

Nous avons résumé dans le chapitre précédent l'état des connaissances actuelles sur les causes physiques d'erreur qui contribuent à dégrader les performances énergétiques des grandes installations solaires à facettes réflectrices. Parmi celles-ci, il en est une qui est encore quasiment inconnue et que nous avons placée au centre de nos recherches : l'erreur de réglage des facettes réflectrices. En général, il doit être possible de l'estimer en réappliquant purement et simplement une des méthodes de réglage classiques qui ont été décrites au chapitre précédent. Pratiquement cela a rarement été réalisé du fait de la lourdeur même de ces méthodes; nous avons donc développé une méthode d'évaluation originale des défauts de réglage, basée sur les idées exposées par Brumleve et Gibson [21] au sujet d'une application possible du système américain BCS (*).

Reportons-nous au schéma représentant celui-ci sur la figure I-18, et imaginons maintenant que la caméra numérique, au lieu de viser les répartitions de densité de flux formées sur la cible, est disposée derrière un trou percé dans celle-ci, et vise directement l'héliostat asservi sur le soleil (fig.II-1). Ce que l'on observe alors dans la caméra n'est plus une répartition d'éclairement mais une répartition de luminance vue d'un point particulier du plan-cible sur la surface réflectrice de l'héliostat. Cette répartition peut être considérée comme une "image" du disque solaire à travers l'héliostat; à chaque point de celui-ci paraissant éclairé correspond un point particulier du disque solaire (fig.II-2). En jouant sur le relief du soleil, qui est plus ou moins accentué suivant les longueurs d'onde (voir paragraphe 3.2), il devient possible de se servir pleinement des capacités de codage couleur du système BCS pour faire ressortir les zones de l'héliostat qui correspondent aux différentes couronnes du disque solaire. Cette nouvelle disposition des éléments du système BCS a été baptisée HCS (Heliostat Characterization System) [21], et le critère de qualité retenu pour l'héliostat focalisant est qu'en tout point P de la

(*) Ces deux auteurs parlent de "backward gazing techniques", terme que nous avons traduit par "méthodes de rétrovisée"

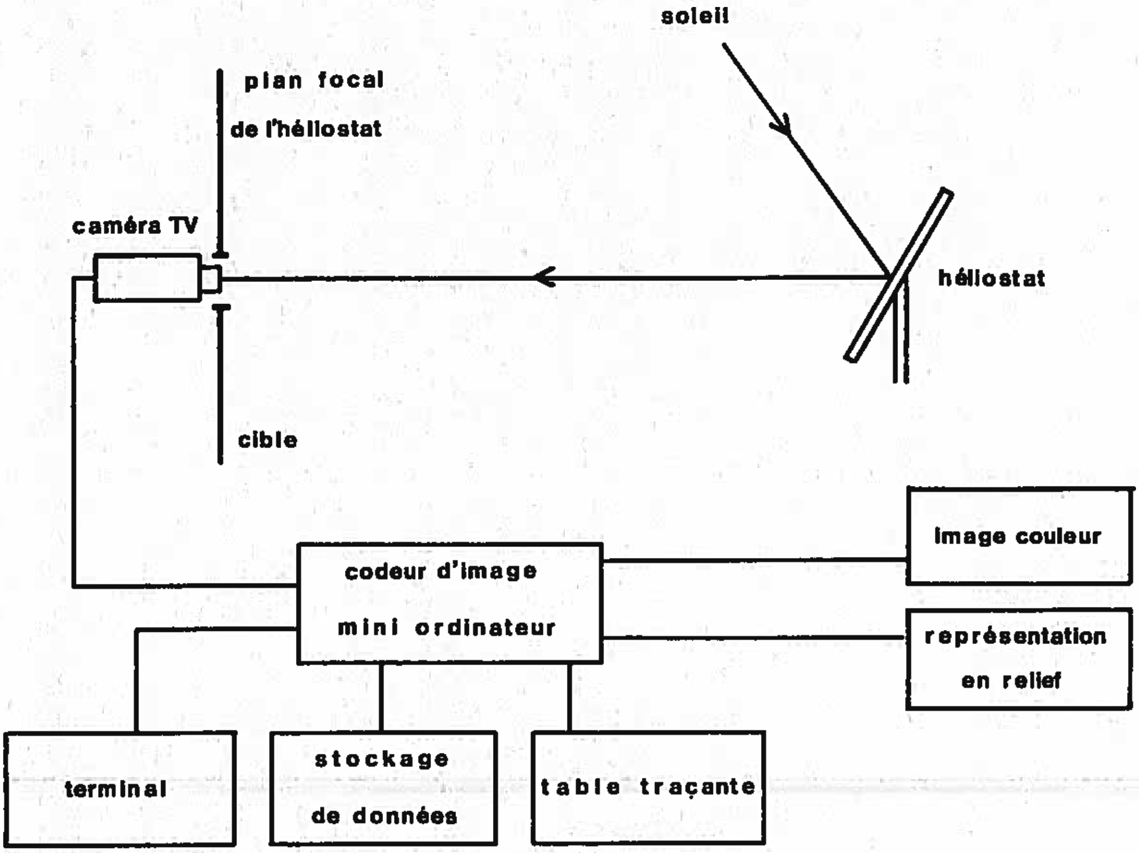


fig II-1 : Schéma de principe du système HCS.

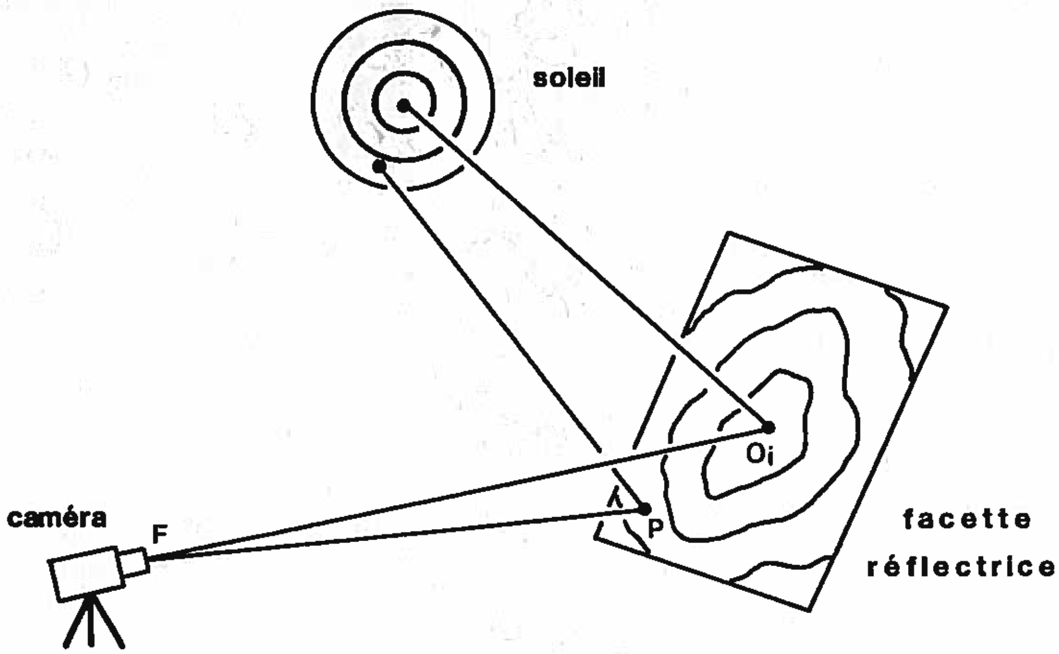


fig II-2 : Image du soleil à travers une surface réflectrice.

surface réflectrice le centre du soleil doit être visible, si l'on a installé la caméra au point focal nominal F de l'héliostat (fig.II-2). L'écart angulaire entre le rayon provenant du centre du soleil et effectivement réfléchi en P, et sa direction idéale, que l'on suppose confondue avec l'axe PF, est évalué en fonction de la couleur observée en P, et une estimation statistique de la qualité moyenne de la surface réflectrice peut alors être réalisée.

Une telle approche est insuffisante, car elle regroupe pêle-mêle les défauts spécifiques des installations solaires, et néglige les phénomènes purement géométriques liés aux types des facettes réflectrices, tel les défauts de mise au point ou les aberrations d'astigmatisme et de courbure de champ (ceux-ci ayant pour conséquence que la direction idéale des rayons provenant du centre du soleil et réfléchis en P est naturellement distincte de l'axe PF). Toutefois, il nous est apparu que cette méthode pouvait être adaptée à la mesure des défauts de réglage qui interviennent sur l'ensemble d'une facette réflectrice, quel que soit le relief de celle-ci, et ceci pour les trois types de surface support que nous considérons : héliostats focalisants, héliostats plans et concentrateurs fixes. Mais dans un premier temps, il était nécessaire de se munir d'un outil de calcul en vue d'effectuer des simulations de ces répartitions de luminance, ainsi que du facteur de concentration obtenu au point d'observation : les premières sont en effet indispensables à la détermination des défauts de réglage d'un ensemble de facettes réflectrices, et le second doit servir à la validation de ces mesures. Nous allons donc exposer dans ce chapitre les étapes des différents codes de calcul que nous avons conçus dans ce but, que ce soit pour les héliostats focalisants d'un système à simple réflexion, ou pour les héliostats plans et les concentrateurs fixes qui équipent les systèmes à double réflexion.

2) PRINCIPES DU CALCUL

Avant d'étudier les paramètres d'entrée des différents codes de calcul, nous rappelons brièvement ici leur principe commun. On cherche les répartitions de luminance observables sur les surfaces réflectrices d'une ou plusieurs facettes appartenant à l'installation considérée, et vues d'un point M' situé dans son volume focal. On cherche également à calculer le facteur de concentration C(M') en ce point.

On considère donc une facette réflectrice (ou module dans le cas d'héliostats focalisants) de centre Oi et de contour rectangulaire, que l'on rapporte à un repère orthonormé Roi (OiXoiYoiZoi) de la façon suivante : l'axe OiXoi est dirigé par la normale à la facette $\overrightarrow{N_{oi}}$, et les axes OiYoi et OiZoi sont parallèles aux deux directions principales définies par les contours du miroir (fig.II-3). Le point M' appartient à un plan récepteur (P') auquel est lié le repère R' (O'X'Y'Z') : le point O' est l'origine du repère choisi dans le plan récepteur, l'axe O'X' est dirigé par $\overrightarrow{N_o'}$, qui est la normale à (P'), et l'axe O'Y' appartient au plan horizontal, tandis que l'axe O'Z' est dirigé de manière à compléter le trièdre. Enfin on lie le repère Rri (OiXriYriZri) à la droite OiO', qui en constitue l'axe OiXri; $\overrightarrow{R_i}$ est le vecteur unitaire qui le dirige (fig.II-3), et les axes OiYri et OiZri sont définis de la même manière que pour le repère R'. On constate que les repères Roi et Rri sont mobiles dans l'espace, puisque leurs position et orientation dépendent de la facette considérée, alors que le repère R' reste fixe.

Repérons maintenant la direction du centre du soleil par le vecteur $\overrightarrow{S_o}$; il n'est pas du tout obligatoire que $\overrightarrow{R_i}$ soit lié à $\overrightarrow{S_o}$ et $\overrightarrow{N_{oi}}$ par la relation de Descartes. En général ce n'est pas le cas et $\overrightarrow{R_i}$ doit simplement être considéré comme le vecteur qui repère la direction de la droite joignant le centre de la facette réflectrice à l'origine du plan récepteur. De même, le repère Rri n'est que le repère où sont effectués la plupart des calculs.

Enfin on désigne par $\overrightarrow{N_p}$ la normale en P à la surface réflectrice, et par $\overrightarrow{R_{po}}$ un vecteur colinéaire au rayon réfléchi en P et provenant du centre du soleil. La quantité de flux $d^2\phi$ rayonnée sur un élément de surface dM', centré en M', par un élément de surface réflectrice dP centré sur un point P de la facette s'écrit, suivant la loi de l'étendue géométrique (fig.II-4) :

$$d^2\phi = L_R(\overrightarrow{PM'}) \cos\beta \, dM' \, d\Omega$$

où $d\Omega$ est l'angle solide sous lequel est vu, du point M', l'élément de surface dP, et $L_R(\overrightarrow{PM'})$ la luminance énergétique réfléchie suivant le rayon PM'. On a bien sûr :

$$d\Omega = \frac{\cos i \, dP}{D^2}$$

et la contribution d'éclairement en M' de l'élément de surface dP s'obtient par :

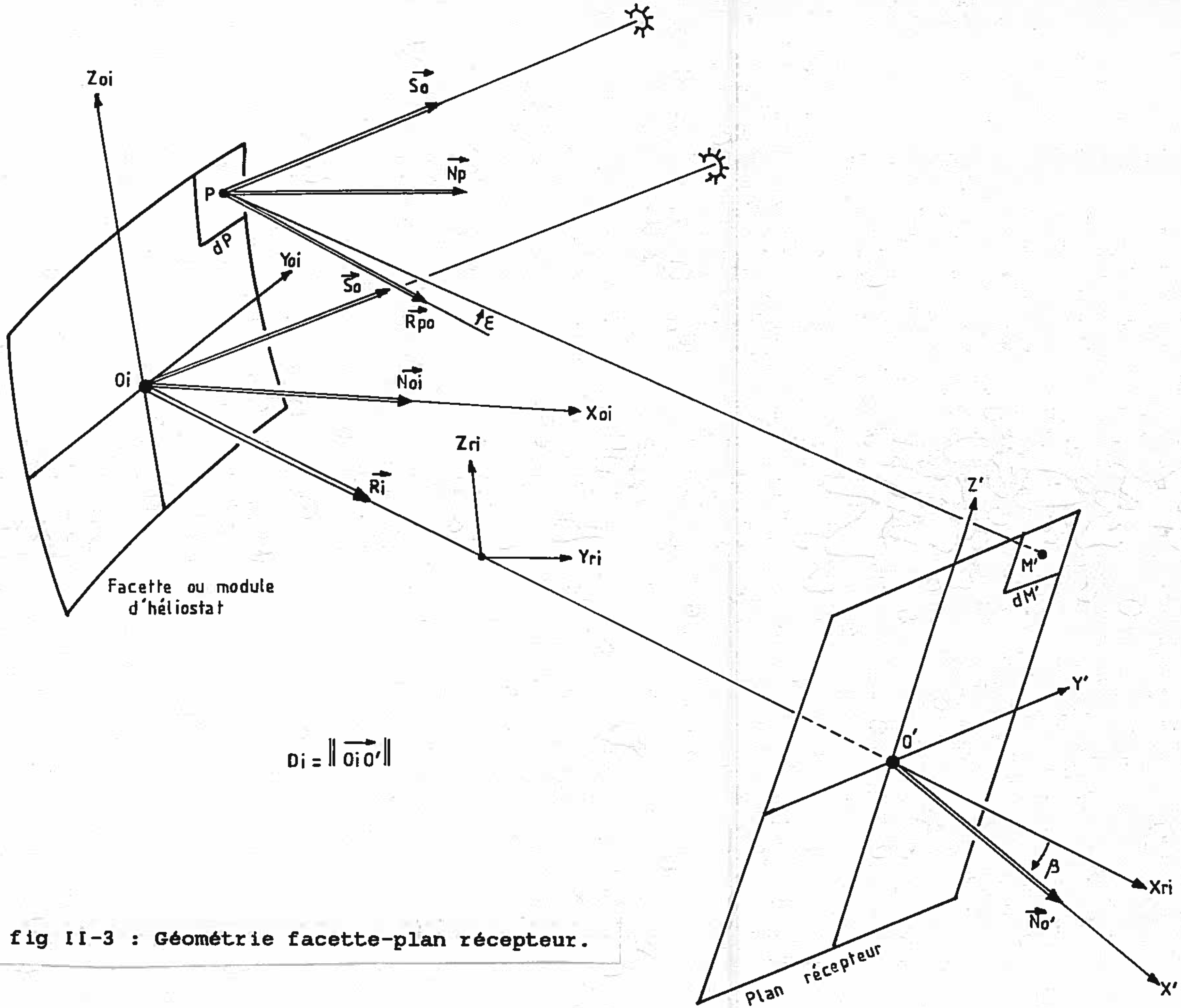


fig II-3 : Géométrie facette-plan récepteur.

$$dE(M') = \frac{d^2\phi}{dM'} = L_R(\overrightarrow{PM'}) \cos\beta \cos i \frac{dP}{D^2} \qquad \text{(II-1)}$$

On peut donner à cette relation une forme vectorielle; d'après les notations de la figure II-3 :

$$dE(M') = L_R(\overrightarrow{PM'}) \frac{(\overrightarrow{N_p}\,\overrightarrow{PM'})(\overrightarrow{N_o}\,\overrightarrow{PM'})}{||\overrightarrow{PM'}||^4}\, dP \qquad \text{(II-2)}$$

On admet maintenant qu'il y a réflexion spéculaire en P : cela revient à négliger les défauts microscopiques des facettes réflectrices, dont on a vu au chapitre précédent (paragraphe 3.2.1) que leur ordre de grandeur restait faible devant le rayon apparent ϵ_o du disque solaire; de plus leur prise en compte nous obligerait à utiliser un soleil fictif, ce qui compliquerait inutilement les calculs. Dans ces conditions le disque solaire présente une répartition de luminance $L(\epsilon)$ symétrique par rapport à son centre, et $L_R(\overrightarrow{PM'})$ n'est plus lié qu'à ϵ, angle entre $\overrightarrow{PM'}$ et $\overrightarrow{R_{po}}$ (fig.II-3), et au coefficient de réflexion du miroir au point P, noté R(P). Alors :

$$L_R(\overrightarrow{PM'}) = R(P)\, L(\epsilon) \qquad \text{(II-3)}$$

Si l'on suppose le coefficient de réflexion homogène sur la facette considérée, les répartitions de luminance $L_R(\overrightarrow{PM'})$ dépendent essentiellement de l'angle ϵ, que l'on peut considérer, pour un point d'observation M' donné, comme une fonction du point P visé sur la surface réflectrice. ϵ s'obtient par la relation :

$$\epsilon^2 \approx \sin^2\epsilon = \frac{||\overrightarrow{R_{po}} \wedge \overrightarrow{PM'}||^2}{||\overrightarrow{PM'}||^2} \qquad \text{(II-4)}$$

$\overrightarrow{R_{po}}$ est déterminé par la loi de Descartes pour la réflexion spéculaire :

$$\overrightarrow{R_{po}} = 2(\overrightarrow{S_o}\overrightarrow{N_p})\, \overrightarrow{N_p} - \overrightarrow{S_o} \qquad \text{(II-5)}$$

Par ailleurs, l'éclairement formé en M' par l'ensemble des facettes réflectrices qui constituent l'installation étudiée s'obtient par une somme continue sur tous les points P d'une facette, puis par une somme discrète sur les Nt facettes que comprend l'installation. On arrive alors à l'expression la plus générale de la densité de flux en M' :

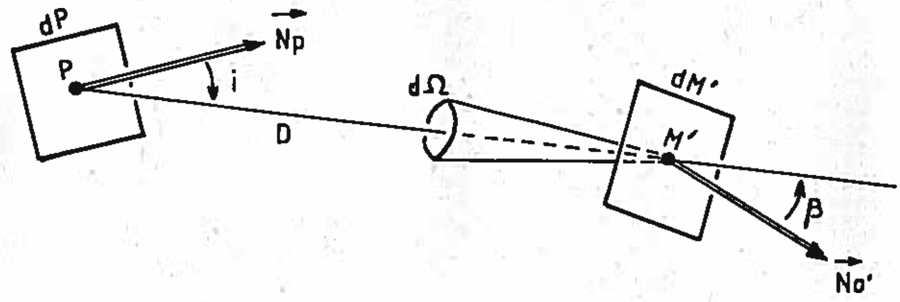


fig II-4 : Loi de l'étendue géométrique.

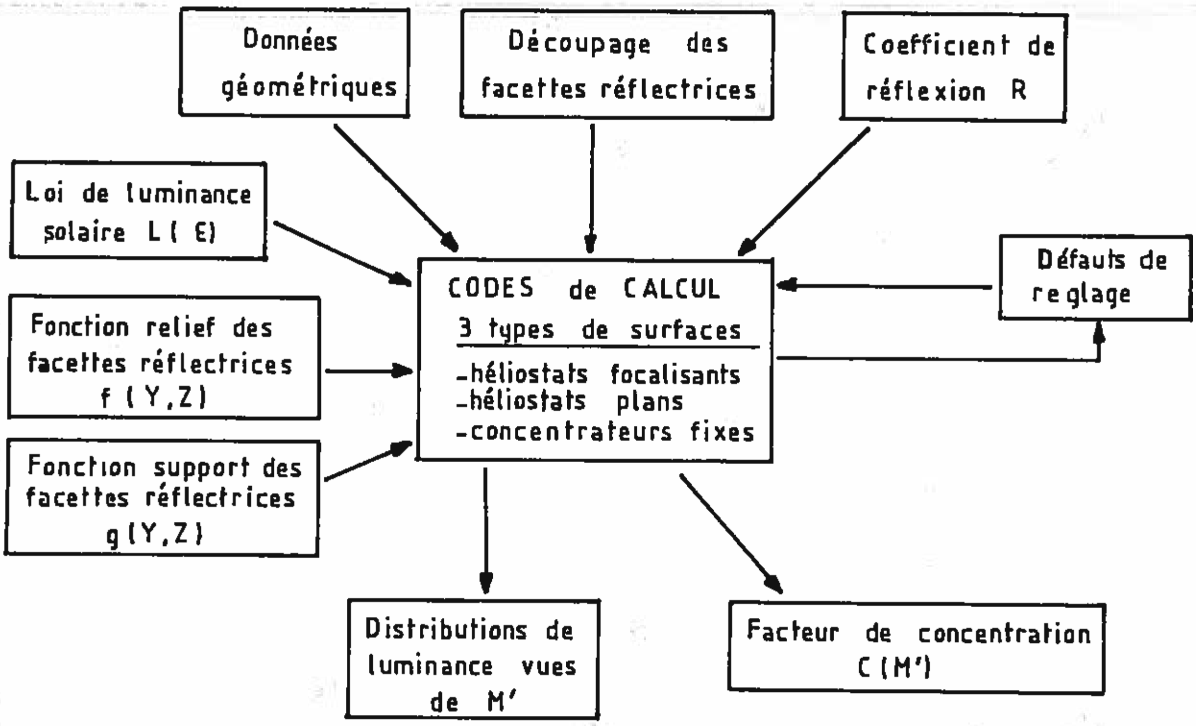


fig II-5 : Paramètres d'entrée/sortie des codes de calcul.

$$E(M') = \sum_{i=1}^{Nt} \iint_{\substack{\text{ième facette}\\ \text{réflectrice}}} R(P)\, L(\epsilon)\, \frac{(\overrightarrow{N_p}\,\overrightarrow{PM'})(\overrightarrow{N_o'}\,\overrightarrow{PM'})}{||\overrightarrow{PM'}||^4}\, dP \qquad \text{(II-6)}$$

Cette relation signifie que l'éclairement en M' est une somme directionnelle des répartitions de luminance observées dans tous les miroirs. Le facteur de concentration C(M') est alors donné par la relation (I-1).

Le principe de nos codes de calcul découle de ce qui précède : il consiste à découper la surface d'une facette réflectrice en un certain nombre de surfaces élémentaires dP pour lesquelles les angles ϵ sont déterminés individuellement par les relations (II-4) et (II-5), et les luminances correspondantes par la relation (II-3). Il est alors possible d'obtenir une simulation graphique des répartitions de luminance vues de M' (voir paragraphe 8). L'intégrande de la relation (II-6) est ensuite calculé pour chaque point P, et la somme des résultats donne l'éclairement formé en M' par une facette réflectrice. Ces opérations sont répétées pour toutes les facettes considérées, et l'on arrive finalement ainsi au facteur de concentration C(M').

Il s'agit en fait de la méthode d'intégration point par point la plus élémentaire, mais la précision de ses résultats est excellente si l'on choisit un découpage des miroirs suffisamment fin. Dans la mesure où les pas d'intégration deviennent infiniment petits, on peut même parler de codes de calcul "exacts". De plus, ils sont encore à ce jour inédits, sans doute parce qu'ils sont inadaptés aux longs calculs des répartitions d'éclairement formées par des installations comprenant un très grand nombre de miroirs. Mais ils nous ont semblé particulièrement intéressants pour la modélisation des répartitions de luminance vues d'un point.

Nous récapitulons maintenant les divers paramètres d'entrée de ces codes de calcul, que l'on a représentés schématiquement sur la figure II-5. Certains d'entre eux ont été disposés en blocs interchangeables, notamment en ce qui concerne le relief du soleil et les caractéristiques géométriques de l'installation. Il existe sept types principaux de ces paramètres d'entrée, auxquels vient s'adjoindre éventuellement un huitième. Ce sont, dans l'ordre :

1) les coordonnées géométriques du point d'observation M' par rapport à un repère fixe, ainsi que l'orientation du vecteur normal au plan récepteur (P'). Il importe en effet d'obtenir les répartitions de luminance observables sur les surfaces réflectrices de tout point du volume focal.

2) la zone d'intégration considérée sur la surface réflectrice, ainsi que la finesse du découpage des facettes, à laquelle est liée la précision des résultats.

3) la loi de luminance solaire $L(\epsilon)$. Elle sera définie par une des fonctions analytiques données au paragraphe 3.2.

4) la fonction caractéristique du relief des facettes réflectrices. Elle est également définie par une fonction analytique $f(Y,Z)$ plus ou moins complexe. Il est notamment possible d'introduire des facettes planes, cylindriques, sphériques, etc....

5) la fonction caractéristique de la structure qui supporte les facettes réflectrices $g(Y,Z)$, qui dépend du type des surfaces étudiées. On introduira par exemple un relief plan pour un héliostat plan, ou sphérique pour un héliostat focalisant, etc... De même, on se sert de cette fonction pour définir le relief de la structure support d'un concentrateur fixe.

6) le coefficient de réflexion des facettes, noté R. On suppose celui-ci homogène sur l'ensemble des facettes étudiées; en conséquence, il ne dépend plus de la position du point P.

7) les défauts de réglage des facettes réflectrices : ceux-ci peuvent être tirés aléatoirement ou bien introduits individuellement pour chaque facette.

8) les défauts de surface des facettes réflectrices : de même que pour les défauts microscopiques, il semble difficile de les introduire sans faire appel à des calculs complexes de soleil fictif. Toutefois, lorsqu'ils ne sont pas aléatoires, ce qui est le cas par exemple des défauts de courbure, il est possible de les regrouper dans les fonctions relief des facettes $f(Y,Z)$.

Enfin, on rappelle que les défauts microscopiques des facettes réflectrices sont négligés, d'une part, et que les défauts de pointage d'héliostats peuvent être pris en compte par une simple translation du point M' dans le plan récepteur, d'autre part.

Il nous faut maintenant exposer en détail certaines de ces entrées, ainsi que les différentes étapes de nos codes de calcul.

3) CARACTERISTIQUES DU SOLEIL, SOURCE DE RAYONNEMENT

Le soleil nous apparaît comme un disque de diamètre angulaire moyen $2\epsilon_O = 32'$. Ce diamètre varie au cours de l'année en fonction de la distance terre-soleil entre 31'31" et 32'35", soit de 1,7% environ [66]. Ces variations se répercutent sur la constante solaire E_O qui est liée à $\epsilon_O{}^2$ par la relation (I-3). On considère habituellement que la constante solaire hors atmosphère a pour valeur moyenne 1351 W/m^2 [24]. A. Le Phat Vinh et F.Trombe ont montré que les variations de ϵ_O, qui sont déjà très faibles, ne modifient pas le facteur de concentration à l'intérieur de l'image de Gauss d'un paraboloïde de révolution [66]. Plus généralement, dans le cas d'un système quelconque, on conçoit que l'augmentation de E_O (qui se produit en hiver dans notre hémisphère) sera en partie compensée, au niveau du facteur de concentration C(M'), par l'augmentation de E(M') due à l'élargissement des répartitions de luminance observables à travers les miroirs du point M'. En pratique nous négligerons donc ces variations et donnerons à $2\epsilon_O$ sa valeur moyenne de 32'.

De nombreux auteurs ont donné différentes valeurs de la température de surface du soleil, qui s'échelonnent entre 5800 et 6000°K. Nous reproduisons figure II-6 le spectre d'émission du soleil, mesuré hors atmosphère et au niveau de la mer, ainsi que la courbe théorique du corps noir à 5900°K. La transmission atmosphérique a pour effet d'introduire de nombreuses bandes d'absorption moléculaire dues à la présence d'ozone, de gaz carbonique, d'oxygène et de vapeur d'eau, ainsi qu'une diminution globale de la constante solaire au niveau du sol. Ces effets dépendent bien sûr de la longueur du trajet atmosphérique, qui est lui-même lié à la hauteur apparente du soleil dans le ciel. Il est d'usage dans les calculs de facteurs de concentration de normaliser l'éclairement solaire direct E_O à 1000 W/m^2, ce qui revient à écrire, dans l'hypothèse d'un soleil à luminance uniforme :

$$E_O = \pi L_O \epsilon_O^2 = 1000 \text{ W/m}^2$$

Ce chiffre de 1000 W/m^2 est typique de l'éclairement solaire direct qui peut être observé à Odeillo (1600m d'altitude) par de bonnes conditions d'air sec et de ciel pur (bleu foncé).

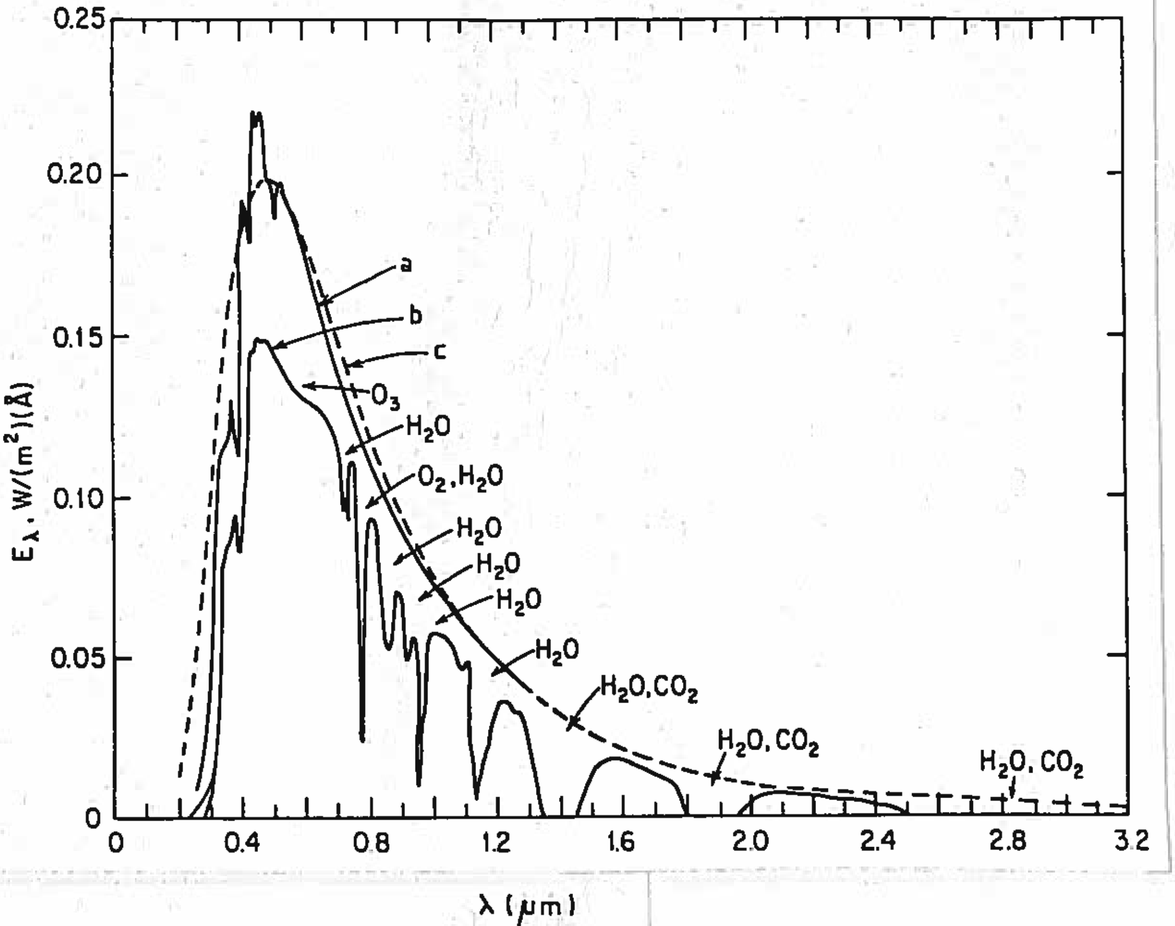


fig II-6 : Le spectre solaire : a) spectre hors atmosphère. b) spectre au niveau de la mer. c) courbe du corps noir à 5900oK.

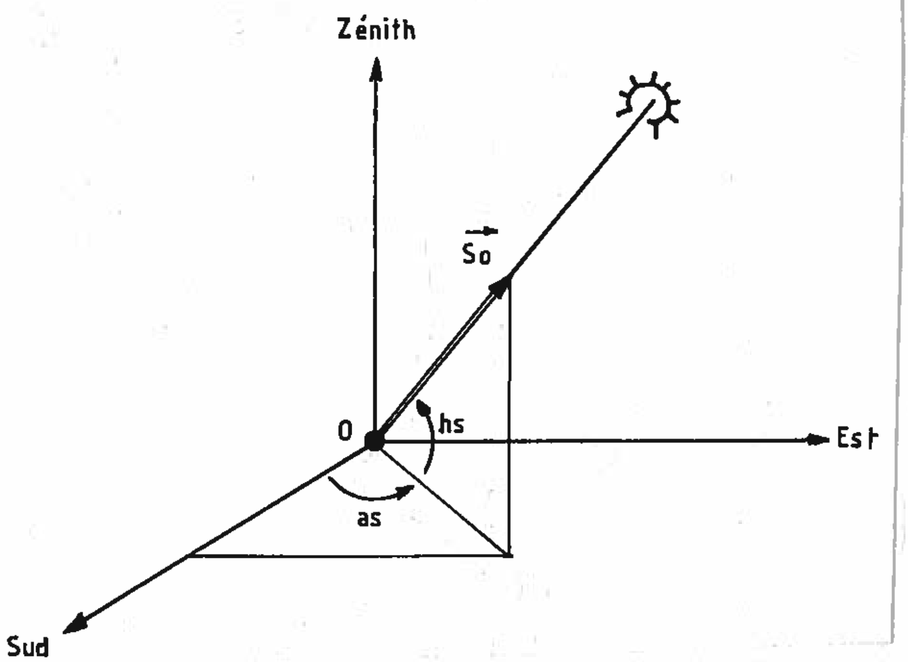


fig II-7 : Repérage du vecteur soleil $\vec{S_o}$ dans Rinst.

Il reste encore deux points à préciser : le calcul de la position du soleil dans le ciel, et le choix de la loi de luminance solaire.

3.1) Position du soleil dans le ciel

Dans le cas où la surface réflectrice étudiée est un héliostat plan ou focalisant, il est indispensable de déterminer la direction du centre du soleil avec suffisamment de précision. Pour notre part, nous nous sommes fixés comme marge d'erreur le dixième du diamètre angulaire du disque solaire, soit 0,05 degré. Les calculs sont effectués dans un repère horizontal Rinst (OXinstYinstZinst) que l'on lie à un point O de la surface terrestre. Celui-ci est caractérisé par sa latitude et sa longitude comptée positivement à l'ouest du méridien de Greenwich. L'axe OZinst repère la verticale du lieu, ou zénith, et les axes OXinst et OYinst sont contenus dans le plan horizontal, et respectivement dirigés vers le sud et l'est. Le vecteur $\vec{S_O}$ pointé vers le centre du disque solaire est alors repéré par ses angles d'azimut et de hauteur a_s et h_s (fig.II-7), et ses composantes s'écrivent dans Rinst :

$$\vec{S_O} = \begin{cases} \cos a_s \cos h_s = \alpha_s \\ \sin a_s \cos h_s = \beta_s \\ \sin h_s = \gamma_s \end{cases} \qquad \text{(II-7)}$$

Le problème est donc de calculer les angles a_s et h_s, en fonction des latitude et longitude du lieu, et des heure et date locales considérées. Nous avons utilisé dans ce but le sous-programme de calcul publié par R.Walraven dans Solar Energy en 1978 [67]. Basé sur une simplification des équations qui sont à l'origine de l'Almanach Nautique américain, il permet en théorie d'obtenir une précision de 0,01 degré sur a_s et h_s. Mais ce sous-programme ayant été ensuite le sujet d'une longue polémique dans les colonnes du journal, il nous est apparu nécessaire de le tester en comparant ses résultats avec des valeurs références fournies par le Bureau des Longitudes, pour le site d'Odeillo, au long de trois journées types de l'année 1986. Des erreurs de l'ordre de 1 degré ayant été constatées, nous avons dû introduire de nombreuses corrections, en modifiant certaines des étapes du sous-programme de Walraven, jusqu'à arriver finalement à un sous-programme original, qui remplit largement les conditions requises; en effet l'erreur maximale sur a_s et h_s ne dépasse jamais 0,01 degré pour les trois journées test de l'année 1986. Une description détaillée de ce sous-programme, appelé SOLEIL, est donnée dans l'annexe II.

3.2) Variations de luminance à l'intérieur du disque solaire

Nous avons vu au chapitre précédent (paragraphe 3.1.1) que les conditions atmosphériques avaient une grande influence sur la loi de luminance solaire $L(\epsilon)$. Elles modifient également les valeurs de la constante solaire, qui s'obtient par la relation :

$$E_o = 2\pi \int_0^{\epsilon_m} L(\epsilon) \cos \epsilon \sin \epsilon \, d\epsilon \qquad \text{(II-8)}$$

où ϵ_m est l'angle maximum au delà duquel les luminances peuvent être considérées comme nulles.

E_o est donc fortement dépendant de la loi $L(\epsilon)$ et peut également être lié au taux circumsolaire T défini par la relation (I-5). En pratique T est une fonction décroissante de E_o [59] : c'est par temps clair que la constante solaire atteint ses valeurs les plus élevées, tandis qu'on observe en même temps des taux circumsolaires très faibles, de l'ordre de 1 ou 2%. On considère [42] qu'au delà de 900 W/m^2, les variations de la loi de luminance solaire jouent très peu sur les performances énergétiques d'une installation. En s'imposant une constante solaire de 1000 W/m^2, on suppose donc implicitement que les conditions atmosphériques sont suffisamment bonnes pour que leur influence soit négligée, et que le taux circumsolaire T reste faible.

Mais il subsiste même ainsi un assombrissement de la luminance vers les bords du disque solaire; cela est dû au fait que les rayons qui sont émis sur sa périphérie ont un trajet plus long à effectuer à travers la photosphère, qui est la source du rayonnement solaire, que les rayons en provenance du centre du disque solaire; ceux-ci subissent moins d'absorption et peuvent donc provenir de couches plus profondes; il en résulte un assombrissement naturel du soleil sur sa périphérie, qui est beaucoup plus marqué dans les courtes longueurs d'onde, alors que la luminance du disque solaire est quasiment constante dans l'infrarouge [66].

Plusieurs auteurs ont proposé des formes analytiques empiriques pour caractériser la loi de luminance solaire $L(\epsilon)$. On peut citer par exemple Kamada [68], qui a fait l'hypothèse que la loi de luminance énergétique est proche de la loi de luminance spectrale obtenue pour $\lambda = 6702$ Å (fig.II-8). Cette dernière peut être approximée par la fonction :

$$L(\epsilon) : L_K \cos (m\ \epsilon^2) \qquad \text{(II-9)}$$

où m est un paramètre qui vérifie la relation :

$$\cos (m\ \epsilon_o^2) = 0,55$$

La normalisation de la constante solaire E_o, calculée par la relation (II-8), à 1000 W/m^2 impose que :

$$E_o = \pi\ L_K \frac{\sin(m\ \epsilon_o^2)}{m} = 1000\ W/m^2$$

soit, pour la luminance L_K de Kamada : $L_K = 1,7391.10^7\ W/m^2.st$.

Une autre forme analytique, qui fut abondamment reprise par la suite, a été donnée par P.José [69]. Elle a pour origine la loi empirique de Minnaert :

$$L(\epsilon) = L_J \frac{1 + 1,5641 \cos \beta}{2,5641}$$

où l'angle β est caractéristique du point considéré sur la surface du soleil (fig.II-9).

En tenant compte de ce que :

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \frac{r^2}{r_o^2}} \qquad r_o = R \sin \epsilon_o \quad \text{et} \quad r \approx R \sin \epsilon$$

on arrive à l'expression la plus utilisée pour la représentation de la loi de luminance solaire, que l'on appelle, semble-t-il à tort, la loi de José :

$$L(\epsilon) = L_J(a_J + b_J \sqrt{1 - \frac{\sin^2\epsilon}{\sin^2\epsilon_o}}) \qquad \text{(II-10)}$$

où $a_J = 0,39$ et $b_J = 0,61$

La normalisation de E_o à 1000 W/m^2 permet de calculer la valeur de L_J : en effet d'après la relation (II-8) :

$$E_o = \pi\ L_J \sin^2\epsilon_o\ (a_J + \frac{2}{3}\ b_J)$$

et $L_J = 1,8445.10^7\ W/m^2.st$

Il est bon de comparer ces valeurs de L_K et L_J à la valeur de luminance L_o d'une répartition uniforme sur le disque solaire, et

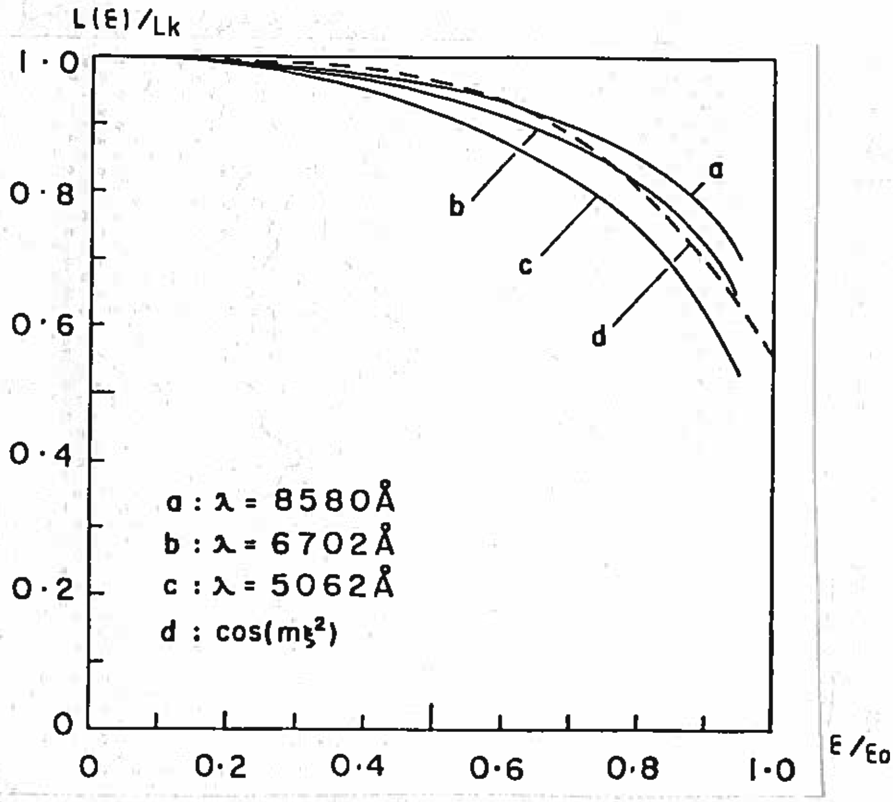


fig II-8 : La loi de luminance solaire de Kamada.

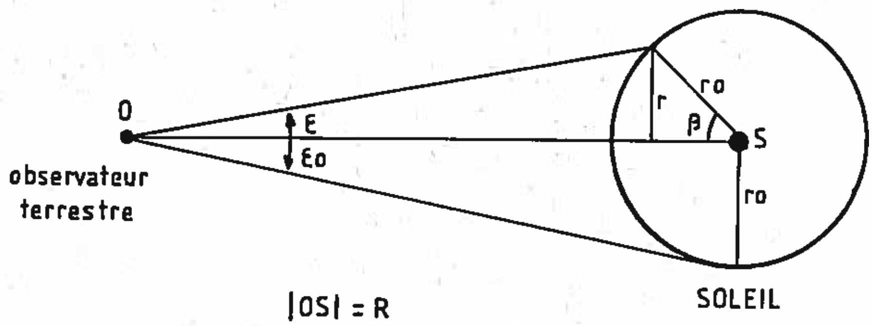


fig II-9 : Passage de la loi de Minnaert à l'expression donnée par P.José pour la loi de luminance solaire.

normalisée à 1000 W/m².

On trouve : $L_O = \frac{E_O}{\pi \, \epsilon_O^2} = 1,4695.10^7$ W/m².st

On voit donc que pour une même valeur de la constante solaire, plusieurs représentations du relief du soleil sont possibles. Celles-ci donneront évidemment des répartitions de luminance et des facteurs de concentration différents, en un même point et pour une même surface réflectrice; c'est pourquoi il importe de bien les choisir. Nous avons finalement opté pour la loi de José, qui est représentée sur la figure II-10. Outre qu'elle est simple analytiquement, elle permet de jouer sur deux paramètres différents, qui sont a_J et ϵ_O (b_J étant lié à a_J par la relation $a_J + b_J = 1$) : c'est ainsi que les chercheurs américains [59] ont pu retrouver, à l'aide de cette loi, les répartitions de luminance mesurées avec leur télescope circumsolaire, pour des conditions atmosphériques typiques de ciels purs et dégagés, et des valeurs de E_O correspondantes supérieures à 900 W/m². Choisir la loi de José comme fonction caractéristique du relief solaire semble donc légitime, mais il faut garder à l'esprit que cette représentation n'est valable que par d'excellentes conditions de ciel pur et de temps sec.

4) GEOMETRIE DES INSTALLATIONS ETUDIEES

4.1) La centrale solaire expérimentale THEMIS

4.1.1) Vue d'ensemble

La construction de la centrale expérimentale THEMIS fut officiellement décidée en juin 1979. Le Commissariat à l'Energie Solaire (COMES), dont les attributions furent reprises en 1982 par l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie (AFME), le CNRS et EDF proposèrent de construire ensemble un Centre National d'Essais Solaires (CNESOL), situé à Targassonne, village proche d'Odeillo et de Montlouis, et dont THEMIS serait la première réalisation. EDF fut désignée comme maître d'ouvrage et maître d'oeuvre de l'ensemble des travaux, tandis que le CETHEL, groupement d'intérêt économique créé par 4 sociétés françaises montrant de l'intérêt pour ce type d'installation, était associé au projet : on lui doit notamment la réalisation, en collaboration avec le CNRS, de quatre prototypes

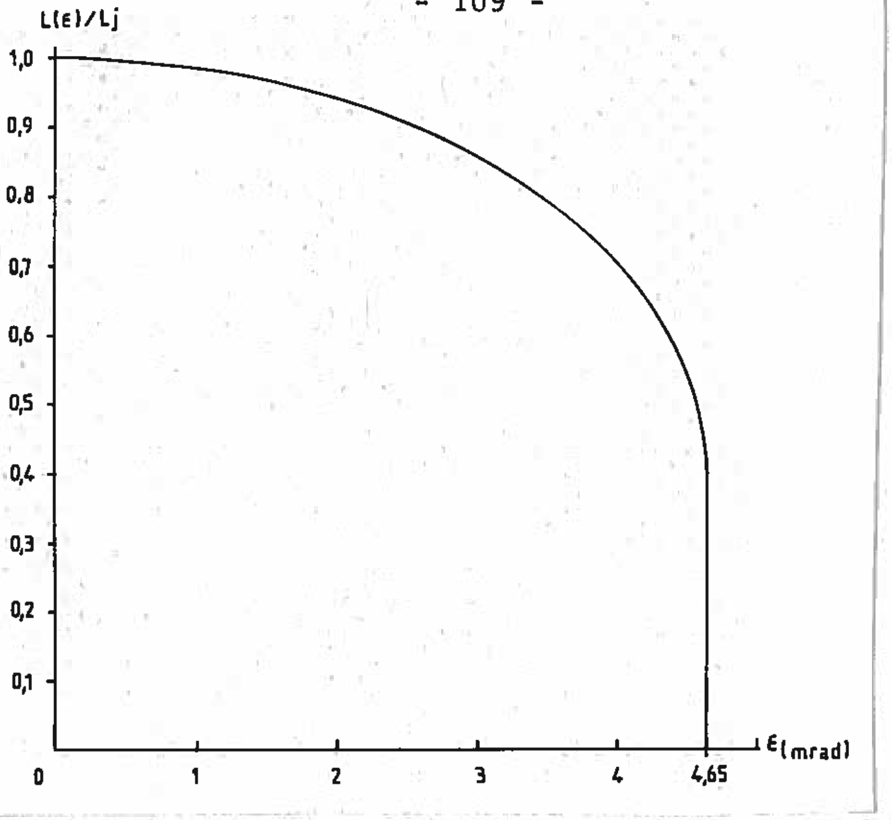


fig II-10 : La loi de luminance solaire de José.

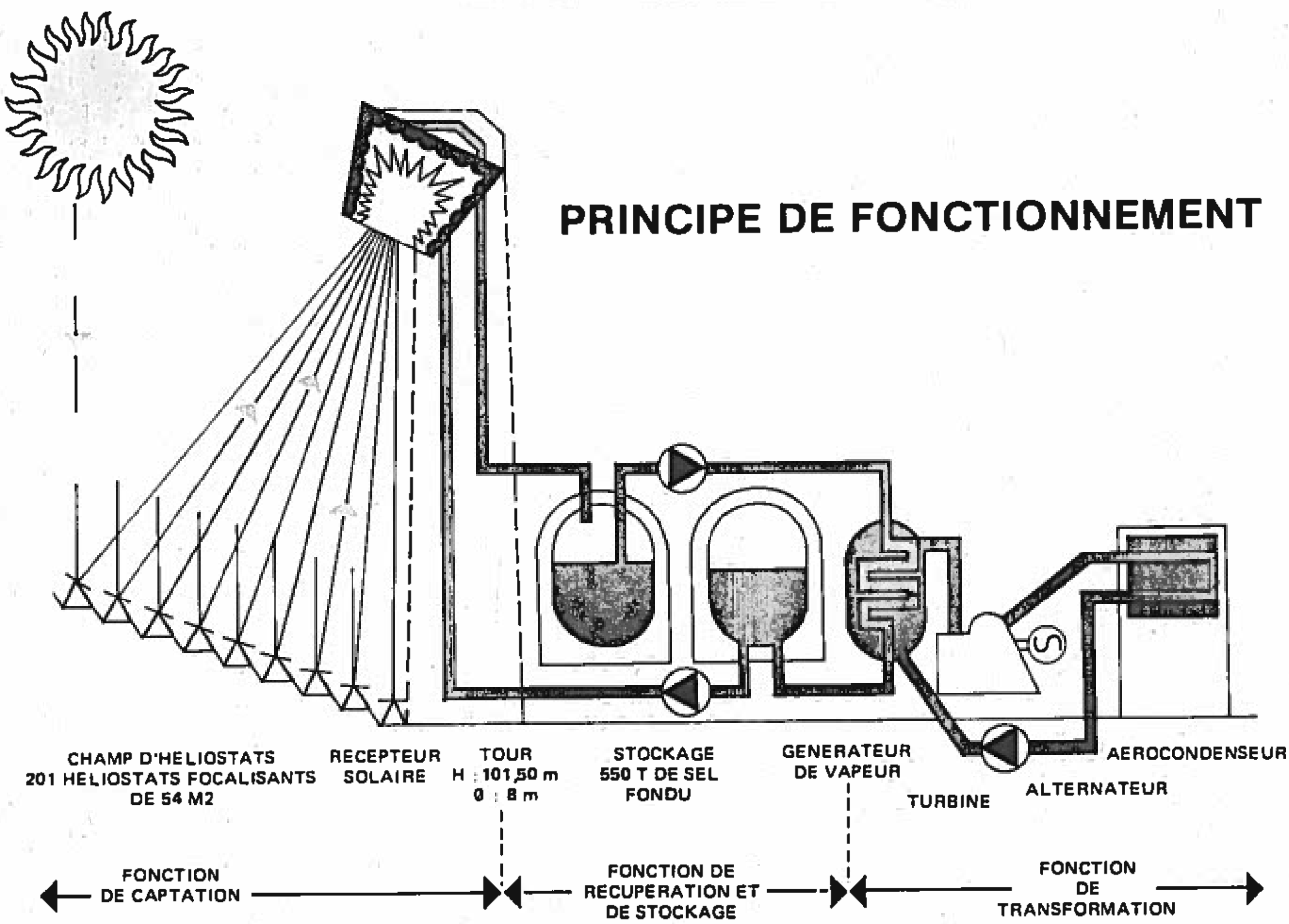


fig II-11 : La centrale solaire expérimentale THEMIS.

d'héliostats focalisants destinés à équiper le champ de THEMIS. La version qui fut retenue est l'héliostat CETHEL III bis.

La centrale elle-même (fig.II-11) est constituée d'un champ d'héliostats qui concentre le rayonnement solaire dans une cavité en forme de parallélépipède rectangle (4 x 4 x 3,5 m). Cette chaudière est montée sur la tour, à 80 mètres de hauteur, et est inclinée de 30° par rapport à l'horizontale (fig.II-12). La concentration théorique maximale est de l'ordre de 800 [70], et permet d'atteindre de fortes températures au fond de la cavité, où la chaleur est recueillie par un mélange de sels fondus qui circulent à l'intérieur de celle-ci, puis dans toute la boucle primaire : cette dernière comprend en outre deux bacs de stockage (chaud et froid) et un générateur de vapeur, qui constitue l'interface avec la boucle secondaire à eau. La vapeur d'eau à haute pression et haute température qui est ainsi produite est détendue dans une turbine, puis condensée avant de retourner au générateur de vapeur. Cet aperçu du fonctionnement de la centrale est évidemment très grossier, mais nous allons maintenant nous attarder sur le champ d'héliostats.

Celui-ci est constitué de 201 héliostats focalisants, de type sphérique, c'est-à-dire réglés sur leur axe, le but étant de donner à l'héliostat une distance focale égale à la distance qui le sépare du récepteur. Cette focalisation est particulièrement importante pour de courtes distances héliostat-chaudière.

Les héliostats sont exclusivement implantés au nord de la tour, sur un terrain dont la pente moyenne est de 15%, et sont répartis sur des terrasses disposées en arcs de cercle. L'implantation optimale du champ consiste à trouver le meilleur compromis entre la puissance totale réfléchie et le nombre d'héliostats (le champ d'héliostats de THEMIS représente en effet le quart du coût global de la centrale). Elle a été réalisée en tenant compte de deux facteurs antagonistes :

1) Les ombres et les blocages (*), d'une part : une grande partie de l'énergie solaire incidente risque d'être perdue lorsque deux héliostats sont trop proches l'un de l'autre.

(*)<u>ombre</u> : un masque s'interpose entre les rayons solaires incidents et l'héliostat : une partie de celui-ci est "ombrée".
<u>blocage</u> : un masque s'interpose entre l'héliostat et certains des rayons qu'il réfléchit : il y a blocage de ces derniers.

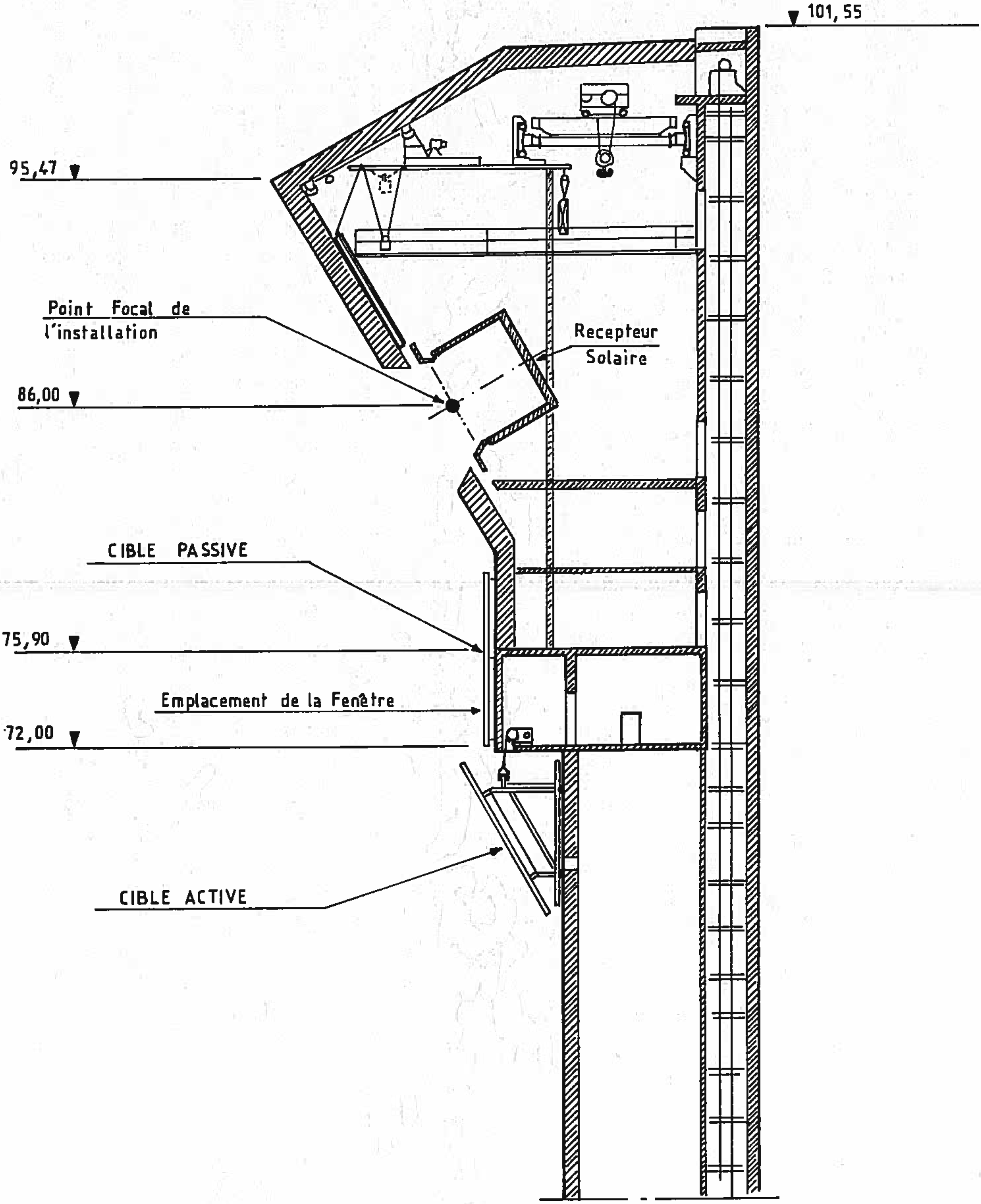


fig II-12 : Vue en coupe Nord-Sud de la partie supérieure de la tour de THEMIS.

2) L'effet "cosinus", d'autre part : lorsque l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'héliostat devient trop grand, sa surface apparente vue de la chaudière diminue. On peut alors observer des "trous noirs" importants entre deux héliostats voisins.

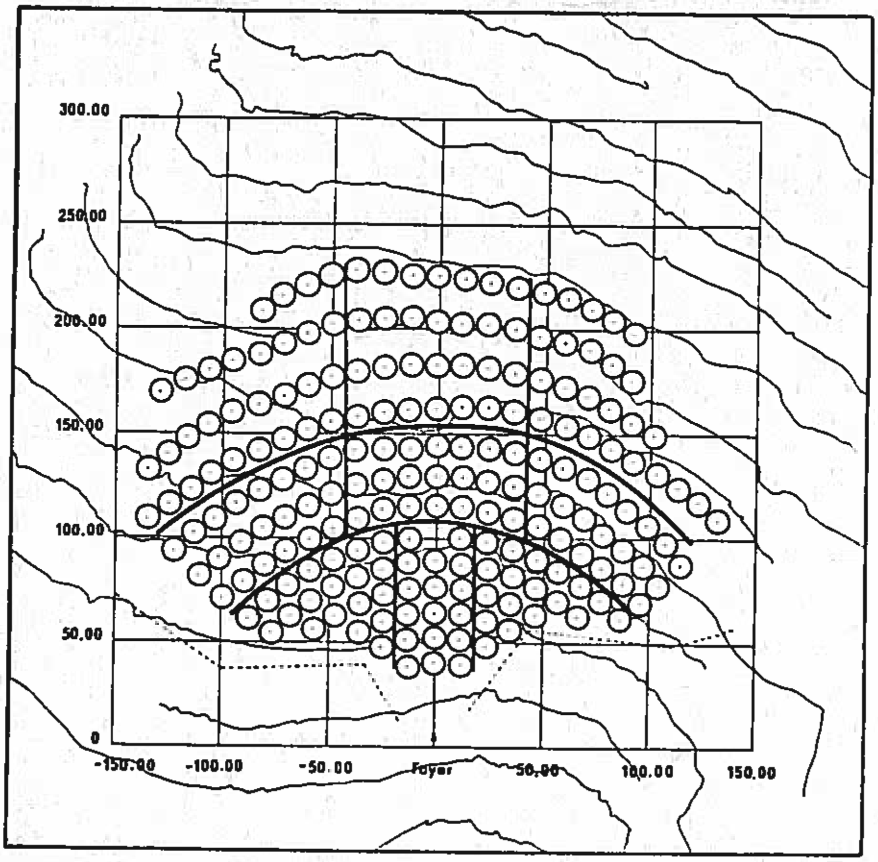
A THEMIS, où les blocages ont été minimisés, la puissance collectée par les héliostats est de 11170 kW au maximum, pour 2400 heures d'ensoleillement par an [70].

Le système d'asservissement qui a été adopté est du type boucle ouverte, suivant un système de commande hiérarchisé à trois niveaux logiques (microprocesseurs d'héliostats, contrôleurs de groupes, calculateur central). L'analyse précise des calculs de position du soleil, qui sont effectués par les contrôleurs de groupes [71], a révélé une erreur de pointage non aléatoire qui dégrade périodiquement les performances du champ. Mais ce défaut ne devrait pas modifier sensiblement les répartitions de densité de flux formées par un héliostat, comme on le verra plus loin.

L'étude de l'héliostat CETHEL III bis sera abordée dans le paragraphe suivant. Nous reproduisons figure II-13 le plan détaillé du champ de THEMIS, qui est divisé en 9 groupes, ainsi que la numérotation que nous avons adoptée pour ses héliostats. Les coordonnées des centres de chacun d'eux ont fait l'objet de relevés topographiques très précis; elles ont été publiées dans [72], où elles sont exprimées dans un repère Est-Nord-Nadir rapporté au "point focal" de l'installation, que l'on situe au centre de la face d'entrée de la chaudière. Ces coordonnées, ainsi que deux autres paramètres caractéristiques des héliostats (focale de réglage de l'héliostat, et focale des modules) ont été mises sur fichier; elles nous permettent de situer, au millimètre près, le centre de rotation de n'importe quel héliostat du champ de THEMIS.

<u>4.1.2) L'héliostat CETHEL III bis : description-relief des modules</u>

Les figures II-14 présentent une vue générale des faces avant et arrière de cet héliostat (voir aussi la photographie I) dont le tableau I résume quelques caractéristiques. Le bloc "mécanismes", situé au centre de l'héliostat, est un dispositif à monture altazimutale qui assure la liaison entre le fût support et l'ensemble de la surface réflectrice. La structure porteuse arrière, tridimensionnelle en treillis métallique, est fixée sur les brides



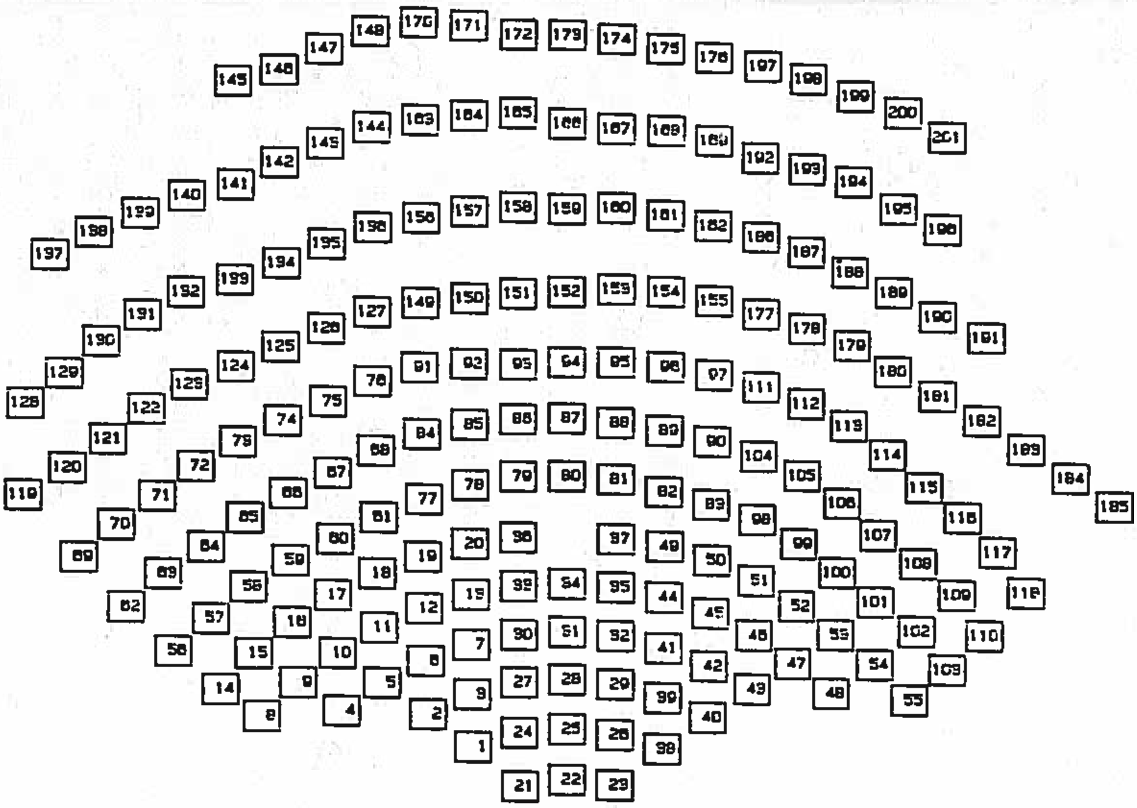
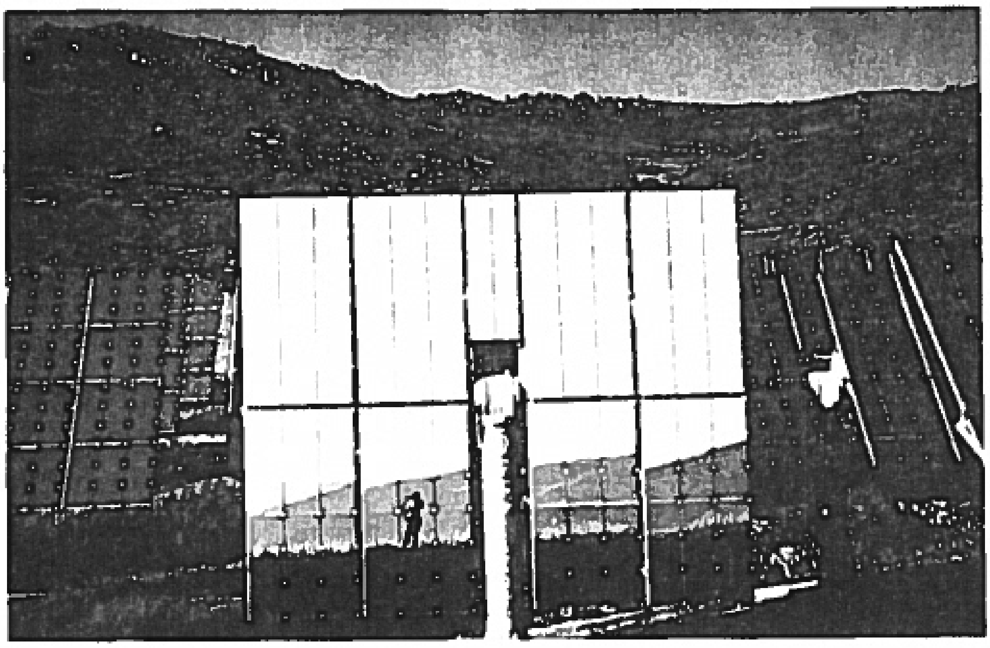


fig II-13 : Le champ d'héliostats de THEMIS.



Photographie I Héliostat CETHEL III bis, vue de face.

du bloc "mécanismes", et supporte elle-même les neuf modules auxquels sont attachés les miroirs. Sur chaque héliostat, il y a huit modules de série, ou courants, de 1842 x 3620 mm, et un module complémentaire de 852 x 2560 mm situé à l'aplomb du bloc "mécanismes" (la surface réflectrice totale est de 53,93 m^2). Chacun d'eux est lié de manière isostatique, par trois points d'accrochage, à la structure arrière de l'héliostat. Ces points d'accrochage sont en même temps les trois points de réglage en orientation des modules : l'alignement de l'héliostat CETHEL III bis consiste en effet à rendre les neuf modules tangents à une sphère de rayon $2f_H$ (f_H est la focale de réglage de l'héliostat). En principe f_H doit être rigoureusement égale à la distance héliostat-chaudière, ce qui signifie qu'il y aurait vraisemblablement, pour 201 héliostats, 201 valeurs de f_H différentes sur tout le champ. En fait ce nombre a été réduit à 36, d'une part parce que les modules eux-mêmes n'ont pas la focale exacte, et afin de ne pas avoir trop de calculs différents d'orientation des modules à effectuer, d'autre part : on a vu en effet dans le premier chapitre (paragraphe 3.2.4.2), que le réglage

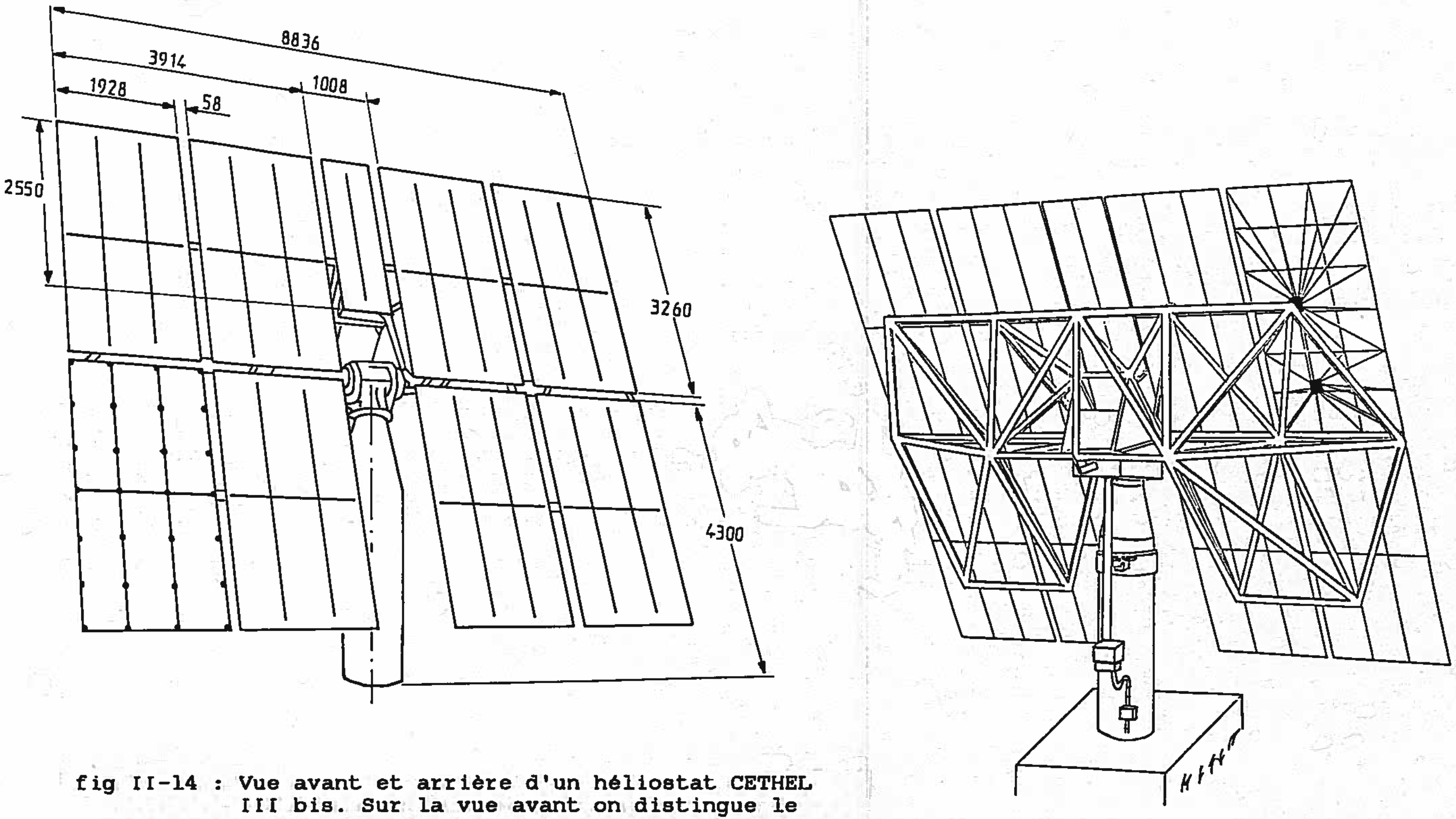


fig II-14 : Vue avant et arrière d'un héliostat CETHEL III bis. Sur la vue avant on distingue le bloc "mécanismes" et les neuf modules réflecteurs de l'héliostat. Le maillage des plots de fixation des miroirs élémentaires sur la face avant des modules est indiqué sur le module inférieur gauche. Sur la face arrière on distingue la structure porteuse de l'héliostat ainsi que l'armature métallique d'un module (traits fins).

des héliostats CETHEL III bis consiste à incliner chaque module suivant des pentes prédéterminées dans deux directions perpendiculaires, en fonction du rayon de la sphère idéale tangentée par les modules. En pratique, les 36 valeurs de f_H retenues permettent toujours de s'approcher à moins de 4 mètres de la distance réelle héliostat-chaudière.

Les erreurs de réglage des normales aux modules seront donc systématiquement rapportées à cette orientation idéale, définie par les normales à une surface sphérique de rayon $2f_H$. En outre, c'est cette surface que nous choisirons comme support des centres des modules pour notre modèle numérique. Son équation est donnée par :

$$X = g(Y,Z) = 2f_H \left[1 - \sqrt{1 - \frac{Y^2 + Z^2}{4f_H^2}}\right] \qquad \text{(II-11)}$$

avec le système d'axes qui est représenté sur la figure II-15, et la surface sphérique étant rapportée à son sommet. On donne également l'expression des dérivées partielles de g(Y,Z) :

$$\frac{dg}{dY}(Y,Z) = \frac{Y}{\sqrt{4f_H^2 - (Y^2+Z^2)}}$$

$$\frac{dg}{dZ}(Y,Z) = \frac{Z}{\sqrt{4f_H^2 - (Y^2+Z^2)}} \qquad \text{(II-12)}$$

Les modules d'héliostats eux-mêmes définissent le relief réel de la surface réflectrice. Ils sont fabriqués sous forme de treillis mécanosoudés, dont le plan avant correspond au maillage de supportage des verres [73]. Considérons seulement le cas d'un module courant : celui-ci est constitué de 6 miroirs cylindriques élémentaires de 598 x 1810 mm (fig.II-14 et II-17), qui sont de type sandwich : il s'agit en fait de deux lames de verre float (le substrat et le miroir, qui ont respectivement pour épaisseur 5mm et 2mm), dont l'une (le miroir) est argentée sur sa face arrière et collée sur l'autre. Le coefficient de réflexion solaire de cette surface réflectrice est de 0,90 en moyenne.

Les miroirs sont maintenus sur le plan avant du module par des pinces d'accrochage qui enserrent un joint de caoutchouc, et qui sont disposées suivant un maillage carré de 60 cm de côté (fig.II-14 et II-16). La courbure des miroirs, et leur inclinaison les uns par rapport aux autres, est réalisée par la mise en place de plots de

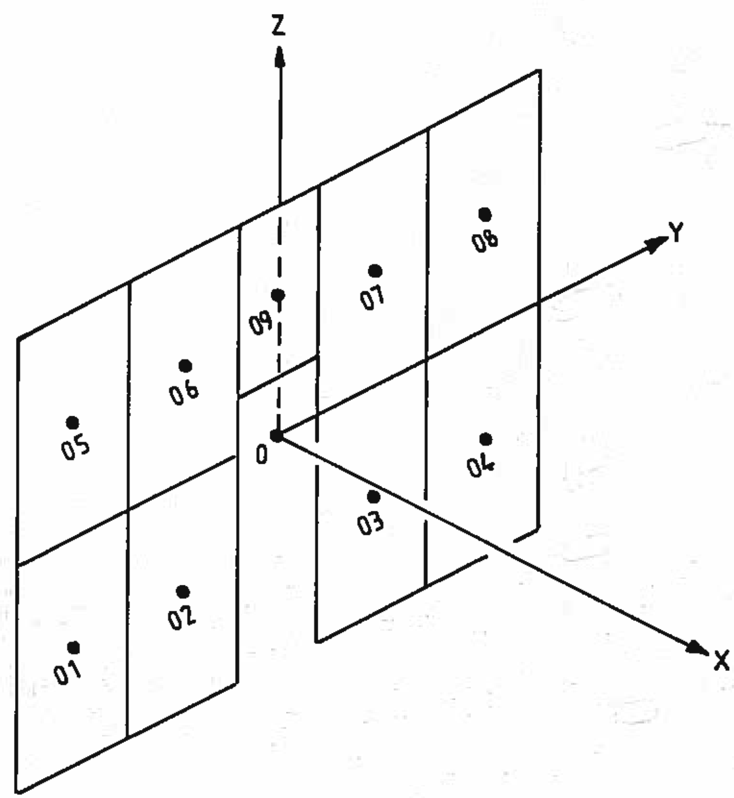
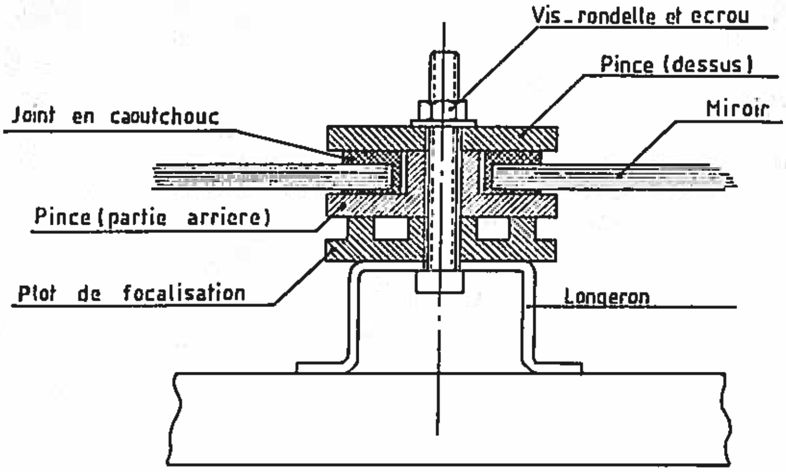


fig II-15 : Système d'axes OXYZ rapporté à l'héliostat CETHEL III bis. O est le centre de la surface réflectrice.

Surface réfléchissante		53,71 m² répartis en 9 modules (huit modules identiques et un module supplémentaire).
Dimensions principales		Longueur hors-tout 8,836 m Hauteur du réflecteur 7,340 m Hauteur hors-tout 7,970 m
Masse de l'appareil monté		Réflecteur et mécanisme 3.700 kg Appareil et fondation 21.260 kg
Débattements angulaires		Site — 90° à + 90° Azimut — 115° à + 115°
Vitesse de rotation		Grande vitesse (ralliement) 0,0332 tr minute
Tolérances de pointage		L'écart entre la position idéale de la normale au réflecteur et la position réelle est assimilable globalement à une variable aléatoire, pour les conditions normales de fonctionnement en poursuite du soleil, et qui provient de : • un jeu mécanique de positionnement du panneau, de distribution rectangulaire, • une imprécision dans le calcul des coordonnées, de distribution gaussienne.
Conditions d'utilisation	Fonctionnement	Entre — 10 °C et + 30 °C de température d'ambiance.
	Survie	Assurée à l'arrêt entre — 30 °C et + 60 °C.
	Neige	Fonctionnement jusqu'à 0,50 m de neige.
Comportement au vent	Vitesse $\leqslant V_1$ V_1 = 32 km h	L'héliostat fonctionnant en "poursuite", les spécifications optiques sont satisfaites (précision de pointage de 2,2 mrad).
	V_1 < Vitesse $\leqslant V_2$ V_2 = 50 km h	L'héliostat peut fonctionner en "poursuite", sans dommage, bien que les spécifications optiques ne soient plus entièrement satisfaites.
	Vitesse V_3 V_3 = 160,9 km h	Vitesse "extrême" au sens des normes Neige et Vent pour l'héliostat placé en position de survie. Il ne subit que des déformations élastiques.

Tableau I



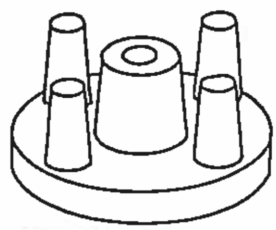


fig II-16 : Coupe des points d'accrochage des miroirs et vue en perspective d'un plot de focalisation.

focalisation en alliage léger (fig.II-16), rivetés sur le module en dessous de chaque pince de fixation [73]. Ces plots doivent bien sûr avoir une hauteur variable en fonction de leur emplacement sur le module. Ils sont obtenus en usine par fraisage sur un gabarit où ils sont montés sur des cales d'épaisseur. Une vérification de leurs dimensions peut être effectuée à l'aide d'un niveau à lunette, permettant ainsi de juger de la précision finale de ces plots de focalisation, et de s'assurer qu'ils satisfont aux tolérances de fabrication. A celles-ci viennent s'ajouter les tolérances sur les épaisseurs des joints en caoutchouc et des pinces d'accrochage; il y a là trois facteurs d'imprécision qui peuvent se cumuler, et modifier éventuellement le relief de la surface du module réflecteur. En supposant que celui-ci soit idéal, les 6 miroirs, regroupés deux à deux dans le sens vertical, devraient en principe reconstituer 3 sections cylindriques d'axes parallèles aux largeurs des miroirs (fig.II-17), et dont la courbure suivant l'axe OZ est caractérisée par la "distance focale" f_M du module. De plus, ces trois sections cylindriques sont disposées de manière à tangenter une sphère de rayon $2f_M$, afin de réaliser la focalisation suivant l'axe OY. Cet arrangement particulier des miroirs élémentaires du module conduit finalement à une surface réflectrice assez complexe, dont l'équation caractéristique X=f(Y,Z) est établie dans l'annexe III. Celle-ci s'exprime donc :

$$X=f(Y,Z) = 2f_M + \frac{n_1 Y}{n_2} - \frac{1}{n_2}\sqrt{4f_M^2 - Z^2} \qquad \text{(II-13)}$$

$$\text{avec} \begin{cases} n_1 = -\dfrac{a + a_o/2}{f_M} & \text{si } -3a - a_o \leqslant Y \leqslant -a - a_o \\ n_1 = 0 & \text{si } \quad -a \leqslant Y \leqslant a \\ n_1 = \dfrac{a + a_o/2}{f_M} & \text{si } \quad a + a_o \leqslant Y \leqslant 3a + a_o \end{cases}$$

d'après les notations de la figure II-17, et avec $n_2 = \sqrt{1 - n_1^2}$

L'expression des dérivées partielles de f(Y,Z) est :

$$\begin{aligned} f'_Y &= \frac{\partial f}{\partial Y}(Y,Z) = \frac{n_1}{n_2} \\ f'_Z &= \frac{\partial f}{\partial Z}(Y,Z) = \frac{Z}{n_2\sqrt{4f_M^2 - Z^2}} \end{aligned} \qquad \text{(II-14)}$$

Chaque valeur différente de f_M nécessitant l'emploi d'un gabarit particulier pour l'usinage des plots de focalisation, la fabrication de 201 ou même 36 types de modules différents aurait conduit à des coûts de réalisation excessifs : seules quatre valeurs de focales f_M ont finalement été retenues pour les modules qui équipent les héliostats du champ de THEMIS (soit respectivement 100, 140, 200 et 240 m). Evidemment, du fait des différences entre la distance de travail d'un héliostat et les valeurs de f_H et f_M, d'une part, et du relief cylindrique des miroirs élémentaires, d'autre part, la focalisation "ponctuelle" du rayonnement solaire n'est guère envisageable. Toutefois l'objectif n'est pas ici de former des images parfaites du soleil, mais de concentrer son rayonnement sur une surface de 4 x 4 m. En pratique les débordements chaudière doivent rester inférieurs à 5% [11] dans le cas d'héliostats bien réglés et de modules de bonne qualité.

Le module complémentaire de l'héliostat CETHEL III bis est construit suivant le même principe que les modules courants, bien qu'il ne soit composé que de deux miroirs cylindriques élémentaires.

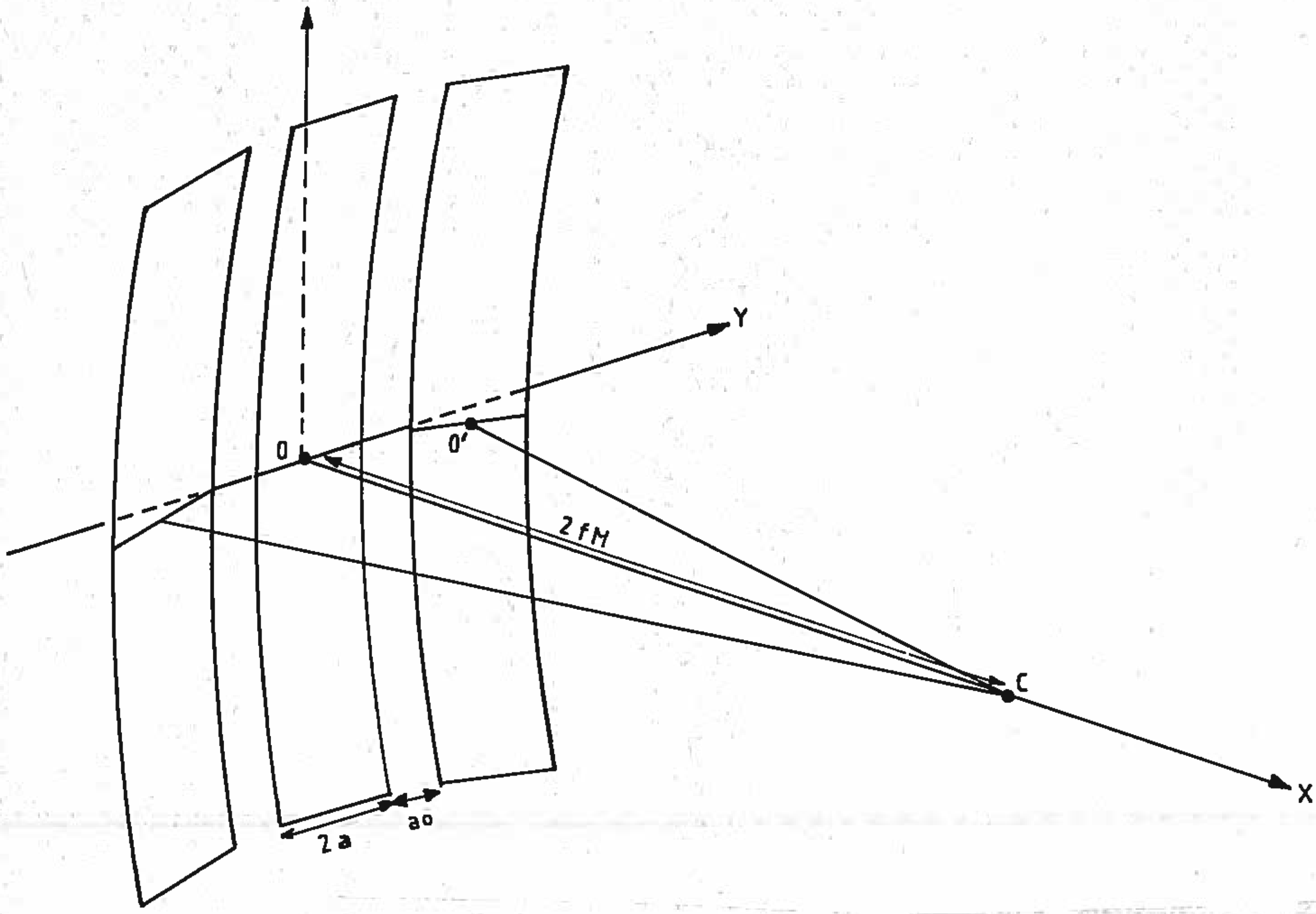


fig II-17 : Système d'axes OXYZ rapporté à un module réflecteur de l'héliostat CETHEL III bis. O est le centre du module.

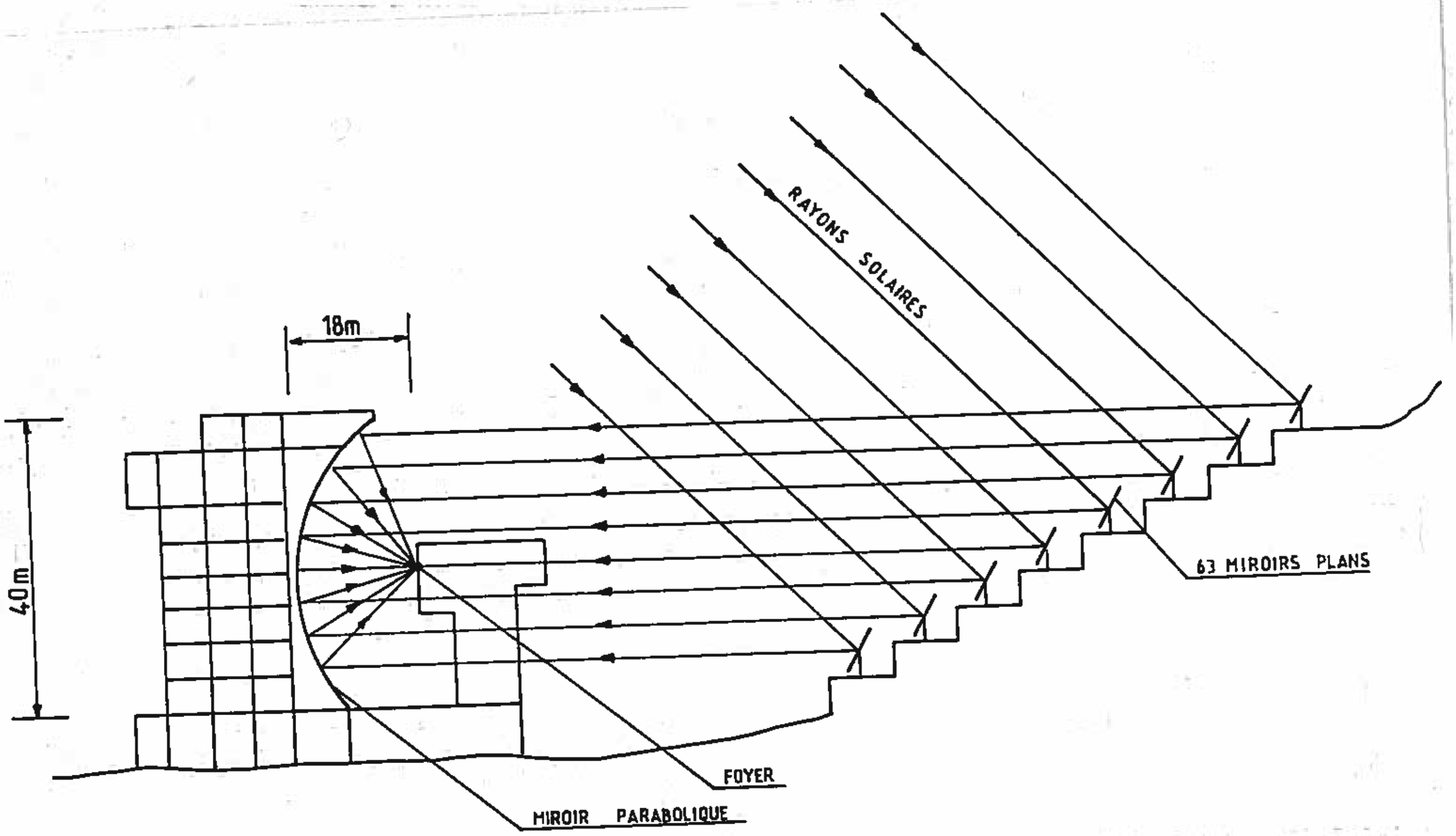


fig II-18 : Le four solaire de 1000 kW d'Odeil lo - principe.

L'équation caractéristique de son relief est du même type que celle qui est donnée par la relation (II-13). On trouvera dans l'annexe III la démonstration de cette relation, ainsi que les cotes précises des modules, qui prennent en compte les interstices entre les surfaces réflectrices.

4.2) Le four solaire de 1000 kW d'Odeillo

4.2.1) Description d'ensemble

Nous ne revenons pas sur le principe des fours solaires à double réflexion, qui a été exposé dans l'introduction générale. Par ailleurs, certaines des caractéristiques de l'installation d'Odeillo y figurent également (voir le tableau III). Mais il nous faut insister ici sur ce qui fait l'originalité de ce système concentrateur d'énergie solaire géant.

Situé à 1600 mètres d'altitude, le four solaire de 1000 kW d'Odeillo (Pyrénées-Orientales) a été en grande partie conçu suivant les principes et les enseignements tirés de l'expérience acquise à Montlouis (Pyrénées-Orientales) : dès 1952, un four solaire maquette de 50 kW y avait été construit par le CNRS, à l'initiative de F.Trombe [16]. Mais Odeillo doit être considéré comme une installation d'échelle industrielle, un prototype très performant qui concentre 1000 kW de puissance sur un cercle de 80 cm de diamètre, et permet d'atteindre des températures de 3200°C [1]. La concentration maximale réalisée est de 12000 environ, pour une concentration moyenne (rapportée à l'image de Gauss, qui mesure 18 cm de diamètre) de l'ordre de 2000. Le four solaire lui-même peut se décomposer en trois parties principales (fig.II-18 et II-19):

1) Au nord, un champ d'héliostats plans qui assurent le suivi du soleil grâce à un asservissement en boucle fermée.
2) Au sud, un concentrateur fixe de 54 x 40 m, en forme de paraboloïde de 18 m de focale, tronqué en sa base et supporté par le bâtiment qui abrite l'ensemble du Laboratoire.
3) Au voisinage du foyer, un bâtiment four permettant l'accès à la zone de travail.

On se reportera aux photographies II, III et IV, et à l'an-

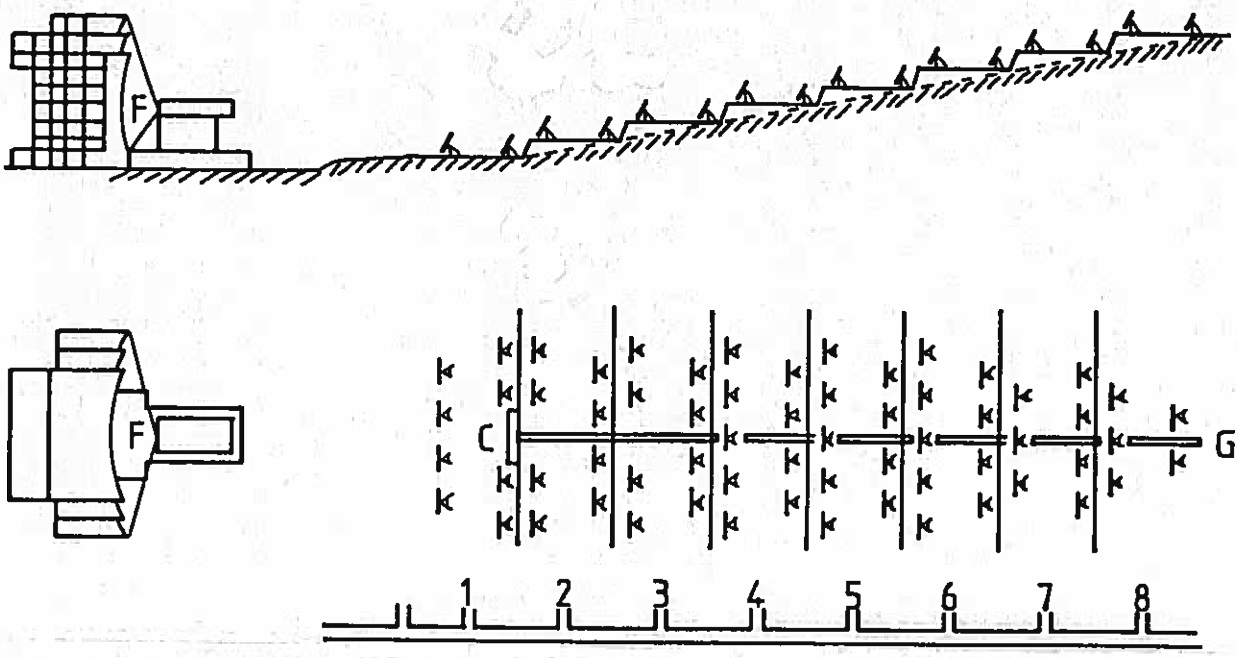


fig II-19 : Le four solaire de 1000 kW d'Odeillo - vue d'ensemble.

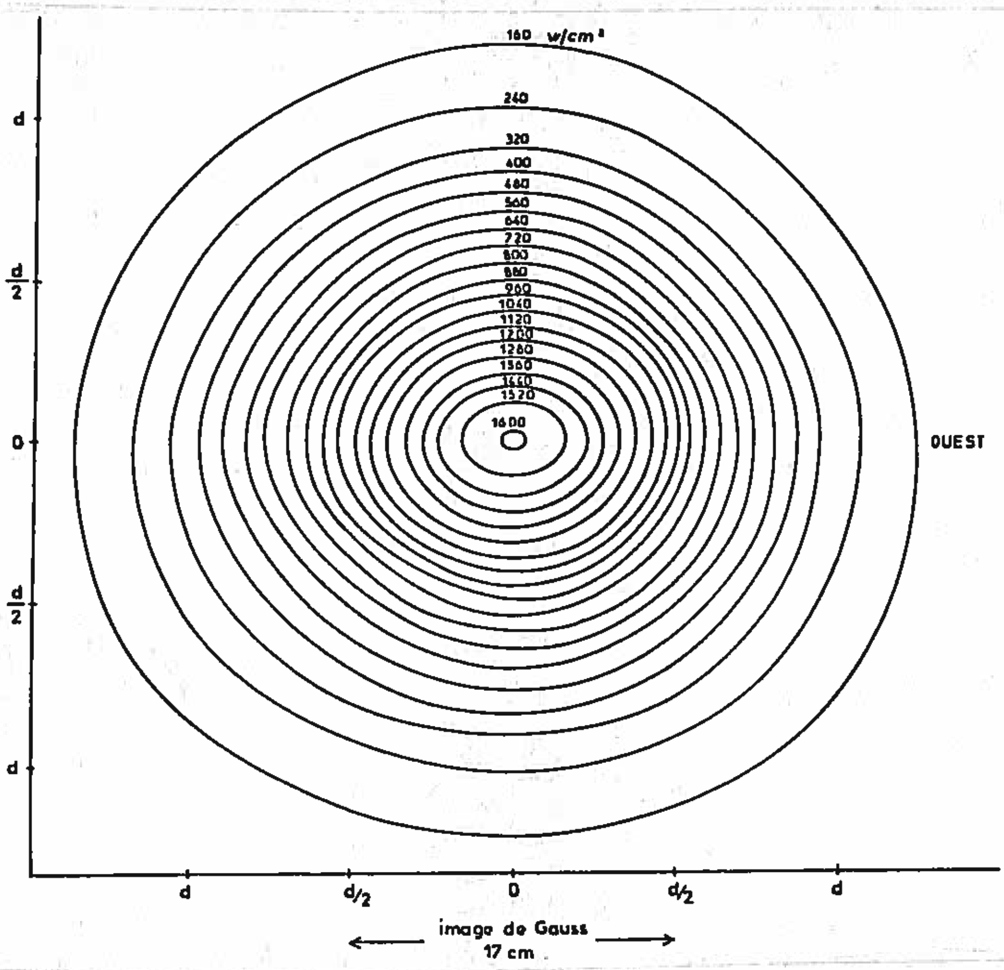
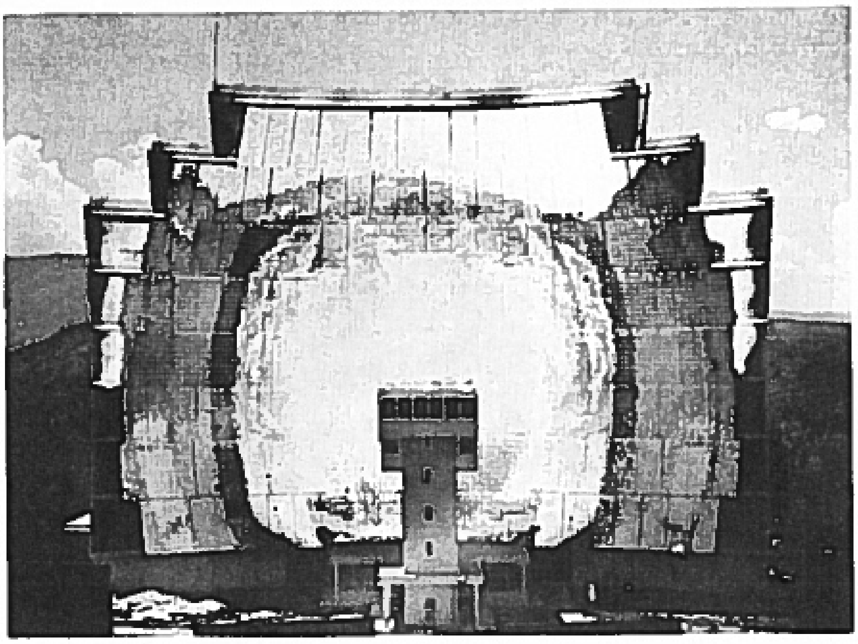
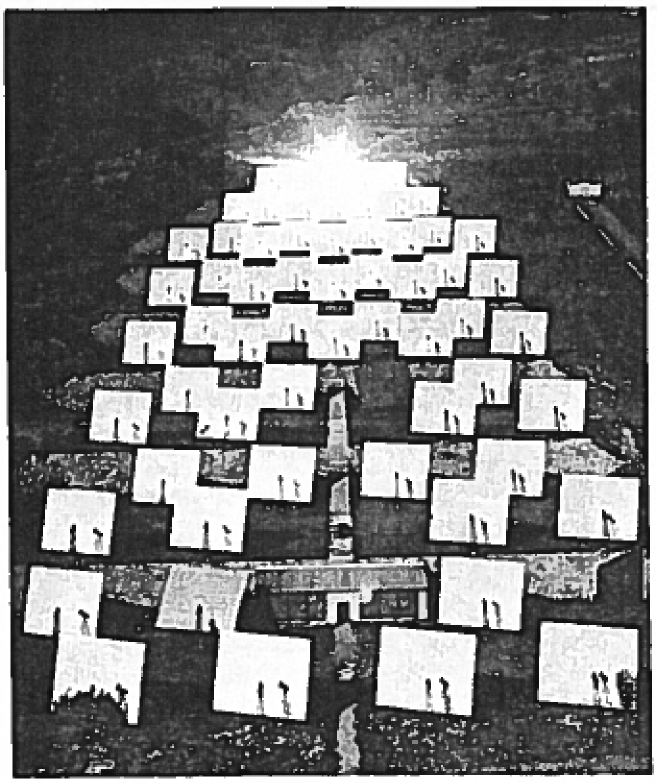


fig II-20 : Répartitions de densité de flux obtenues dans le plan focal du paraboloide (mesures d'origine).

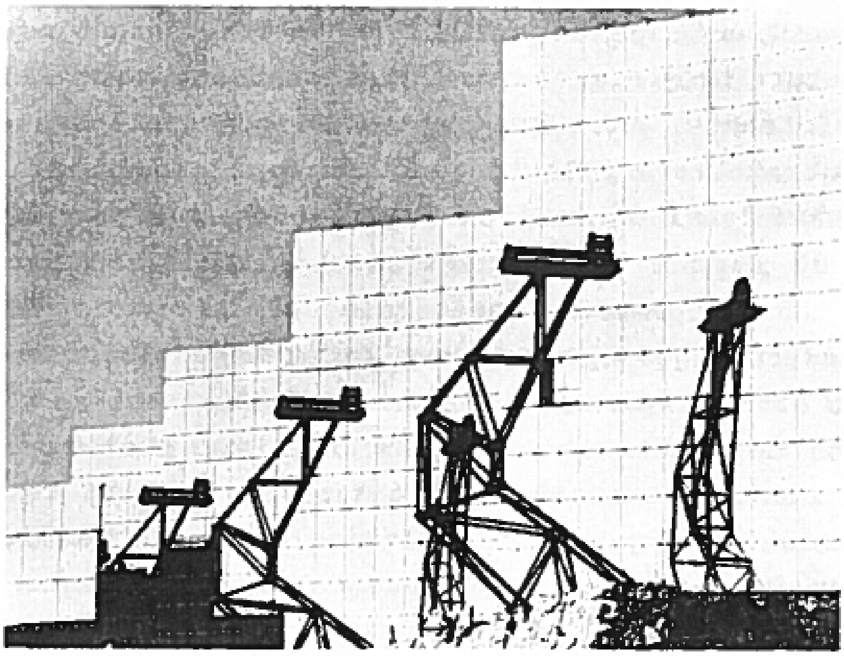
Photographie II Vue d'ensemble du four solaire de 1000 kW.



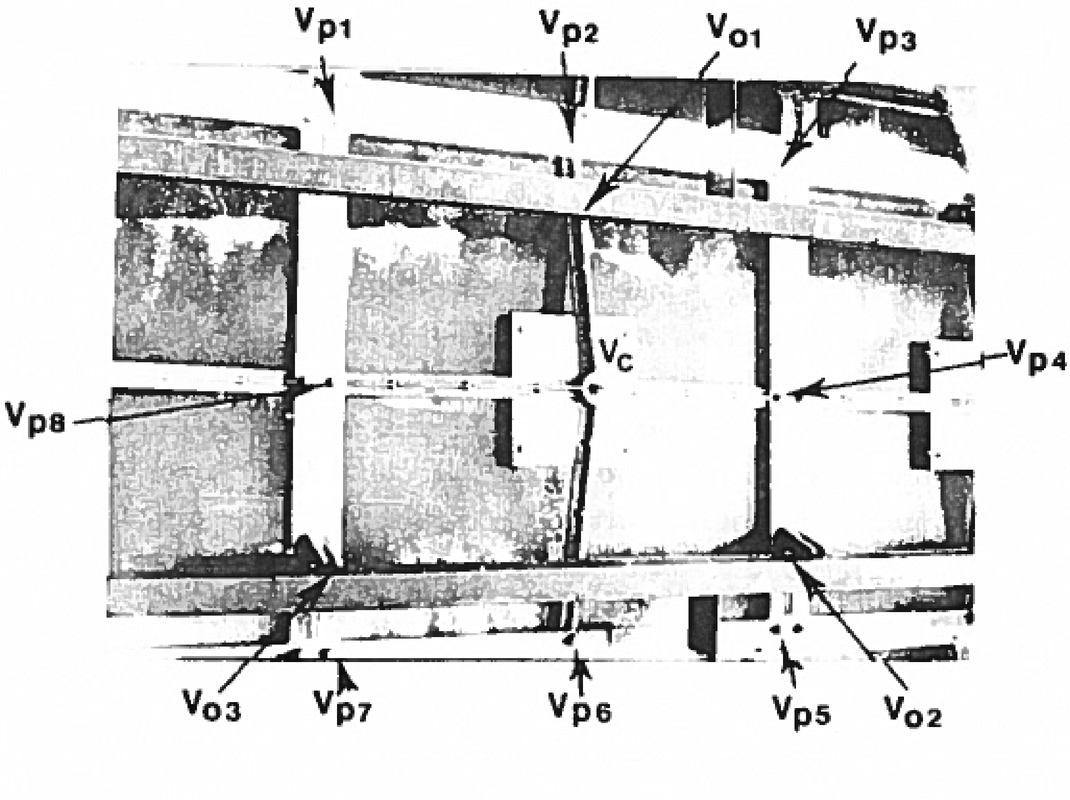
Photographie III Le concentrateur du four solaire de 1000 kW.



Photographie IV Le champ d'héliostats vu du concentrateur.



Photographie V   Une rangée d'héliostats équipés de leurs lunettes de guidage.



Photographie VI   Vue arrière d'une facette réflectrice du concentrateur. On distingue la vis centrale de focalisation (V_c), les vis extérieures de focalisation (V_{p1} à V_{p8}), et les 3 points de fixation et de réglage en orientation (V_{o1} à V_{o3}).

nexe I pour se faire une idée plus précise de l'installation. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, son atout majeur n'est pas la température très élevée qui est atteinte au foyer (3200°C est une belle performance, mais qui peut être ponctuellement réalisée sur des concentrateurs à pièce unique, du type miroirs de DCA), mais le fait que des densités de flux importantes sont concentrées sur des surfaces de dimensions significatives; cela est particulièrement important dans le domaine des essais de matériaux.

Les réglages optiques des facettes réflectrices des héliostats plans et du concentrateur fixe, qui dépassent au total le nombre de 20000, ont été décrits au chapitre précédent (paragraphe 3.2.4.2). 2 ans de travail ont été nécessaires pour leur réalisation complète, de sorte que l'installation n'a pu être mise en service que le 1er Octobre 1970. Heureusement, ces réglages sont stables dans le temps, faute de quoi la maintenance d'un tel système serait une gageure. Mais d'autres problèmes ont contribué à altérer les performances energétiques d'origine : au bout de dix ans des effets d'intempéries sur le site, la détérioration des films réflecteurs des héliostats plans était telle qu'une partie des miroirs était devenue transparente [1]. Les revêtements arrière des facettes des héliostats ont été refaits en 1978 et 1979, permettant ainsi à l'installation de retrouver des performances voisines de celles d'origine. Ce même inconvénient menace à présent les facettes réflectrices du concentrateur.

Pour en finir avec cette vue d'ensemble, nous reproduisons figure II-20 la cartographie d'origine des éclairements obtenus dans le plan focal : F.Trombe et A. Le Phat Vinh ont attribué son aspect elliptique à la troncature du bas du concentrateur [17]. Des distributions d'éclairement sensiblement identiques ont d'ailleurs été retrouvées dans un plan de travail centré au foyer et incliné de 25° par rapport à la verticale [17].

4.2.2) Le champ d'héliostats

Le champ d'héliostats du four de 1000 kW d'Odeillo se compose de 63 héliostats plans de 7,5 x 6 m. Chacun d'eux est équipé de 15 x 12 miroirs plans de section carrée de 50 cm de côté et de 8 mm d'épaisseur. Il y a donc 180 facettes réflectrices par héliostat, et 11340 sur tout le champ.

Les miroirs ont été fabriqués suivant l'ancien procédé, qui consiste à recouvrir d'une couche réflectrice d'argent, puis de deux couches protectrices de cuivre et de vernis, la face arrière d'une lame de verre obtenue par laminage, puis doucissage et polissage. Ce procédé a depuis été abandonné au profit de la technique du verre float, qui est nettement moins coûteuse.

La planéité des miroirs a été contrôlée par des méthodes d'autocollimation, et la dispersion des normales aux facettes réflectrices a pu être chiffrée par un écart type voisin de 0,4 mrad. Le coefficient de réflexion nominal de la surface est de 0,8.

Chaque héliostat est monté sur une charpente particulièrement rigide, puisqu'aucune déformation des structures n'a, à ce jour, pu être mise en évidence. Ils sont répartis sur une série de 8 terrasses horizontales étagées tous les 5 m de hauteur, et disposés en quinconce suivant deux alignements Est-Ouest à chaque niveau (fig.II-19). Chaque terrasse d'héliostats illumine bien sûr un étage différent du concentrateur et les distances qui les séparent de celui-ci varient entre 105 et 280 mètres, tous les 25 mètres. Cette disposition particulière résulte de l'optimisation du champ d'héliostats, qui ne repose pas sur les mêmes critères que pour une centrale à tour : dans le cas d'un four solaire, il importe en effet que la surface du concentrateur soit entièrement et uniformément éclairée, à toute heure de la journée et pour toutes les périodes de l'année. Les blocages sont donc inévitables et les dimensions des héliostats doivent être calculées en fonction des jour et instant les plus défavorables, lorsque les angles d'incidence du rayonnement solaire sont importants. Par contre, la disposition en terrasses et en quinconce permet d'éliminer les ombres, ce qui réduit ainsi la surface inutile des héliostats. La figure II-21 représente ceux-ci en projection, vus du concentrateur.

L'asservissement sur le soleil se fait en boucle fermée; il faut signaler ici que la plage d'orientation des héliostats limitée à $\pm 45^{o}$ en azimut ne leur permet pas de suivre le soleil durant la totalité de sa course en été. Mais même ainsi, il reste possible de travailler 9 heures d'affilée.

Les déplacements angulaires de l'héliostat s'effectuent autour de deux axes, l'un horizontal et l'autre vertical (monture altazimutale), et sont assurés par des vérins hydrauliques à pression d'huile. L'alimentation des circuits passe par une galerie

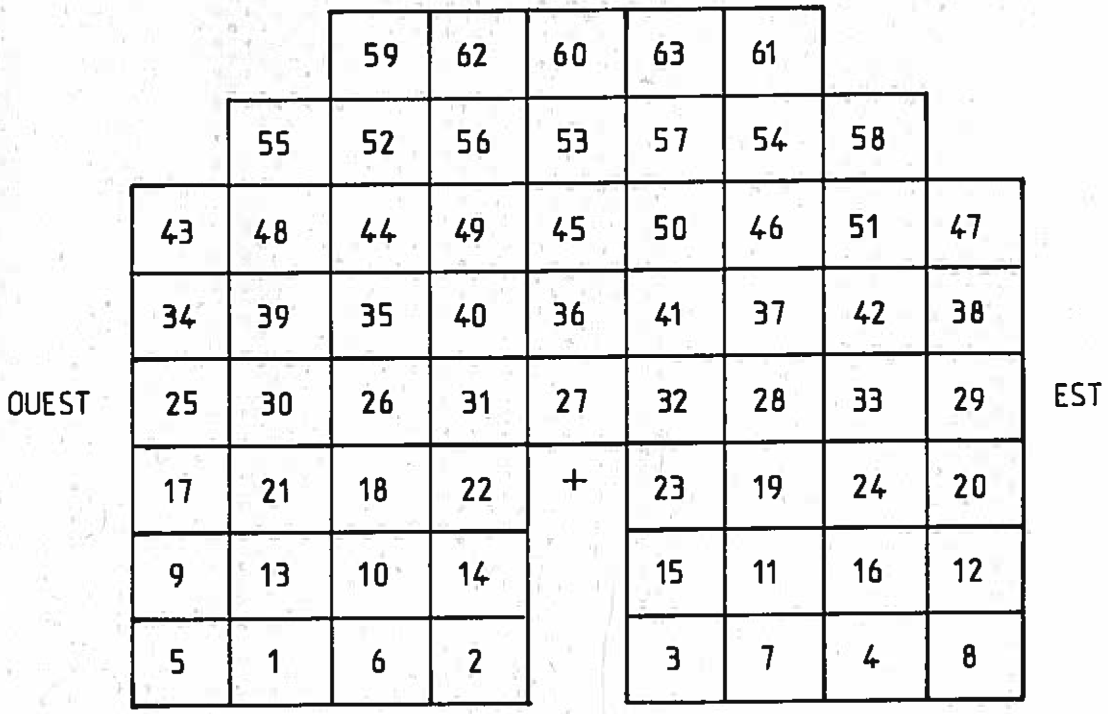
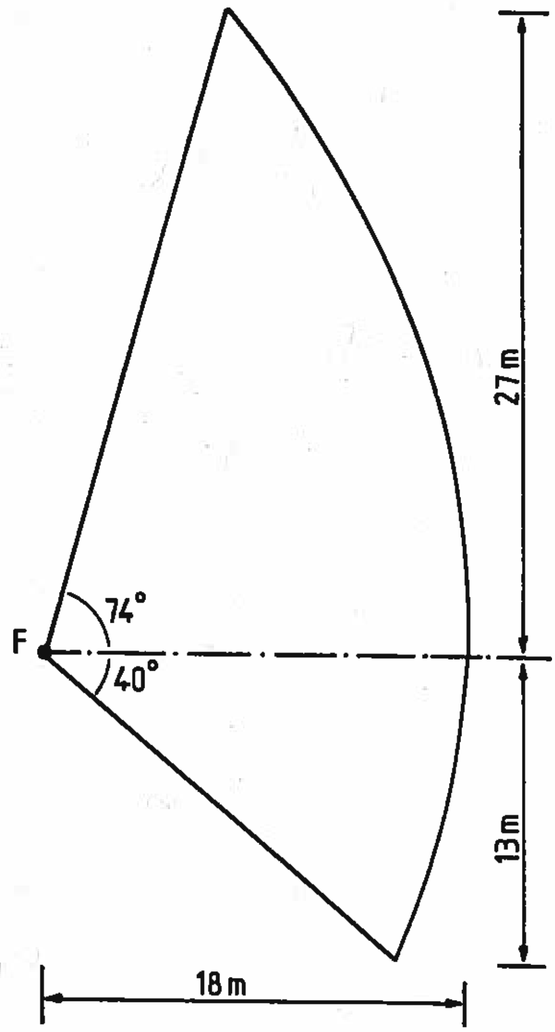


fig II-21 : Le champ d'héliostats plans vu du concentrateur.

fig II-22 : Coupe verticale schématique du concentrateur.



G qui aboutit à la centrale d'huile C (fig. II-19). Les vérins sont contrôlés par des signaux électriques en provenance de deux lunettes de guidage placées devant l'héliostat. Celles-ci sont essentiellement constituées d'une optique de focalisation et de 4 photodiodes diamétralement opposées, situées dans le plan image de part et d'autre de l'axe de visée de la lunette. Ce dernier matérialise la direction idéale du faisceau réfléchi par l'héliostat, qui doit être parallèle à l'axe du concentrateur. Si ce n'est pas le cas, l'image du soleil n'est plus centrée dans le plan focal de la lunette et les différences des signaux émis par deux photodiodes antagonistes sont renvoyées aux commandes de l'héliostat, suivant un montage d'asservissement électronique; la lunette à courte focale sert essentiellement à la recherche du soleil, tandis que la lunette de poursuite, une fois qu'elle a pris le relais, assure une précision de guidage qui est estimée à 0,3 mrad. Les deux lunettes sont montées en face d'une facette particulière qui est la glace-pilote de l'héliostat. Elle se distingue des autres par une plus forte épaisseur (10 mm) et des défauts de planéité moindres, qui résultent d'une soigneuse sélection. La photographie V nous présente une série d'héliostats équipés de leurs lunettes de guidage individuelles. On trouvera par ailleurs d'autres schémas, photographies, et renseignements sur les héliostats plans dans l'annexe I.

4.2.3) Le concentrateur paraboloïdal

Celui-ci épouse en principe la forme d'un paraboloïde de 18 m de focale, et dont l'axe est dirigé suivant une direction horizontale Sud-Nord. Sa largeur maximale est de 54 m pour une hauteur de 40 m, mais sa section est assez complexe comme on peut s'en rendre compte sur la photographie III : chacun des huit étages présente une largeur différente et il convient de tenir compte de l'ombre du bâtiment four. De plus, le concentrateur présente une dissymétrie dans le plan vertical : l'axe du paraboloïde n'étant qu'à 13 m du sol pour une hauteur totale de 40 m, l'ouverture maximale inférieure n'atteint que 40°, contre 74° pour l'ouverture maximale supérieure (fig.II-22); cette troncature inférieure a entrainé un surcoût considérable pour résoudre les problèmes de surplomb dans la partie supérieure, mais elle permet de travailler aussi bien dans un plan incliné de 25° par rapport à la verticale que dans le plan focal du paraboloïde.

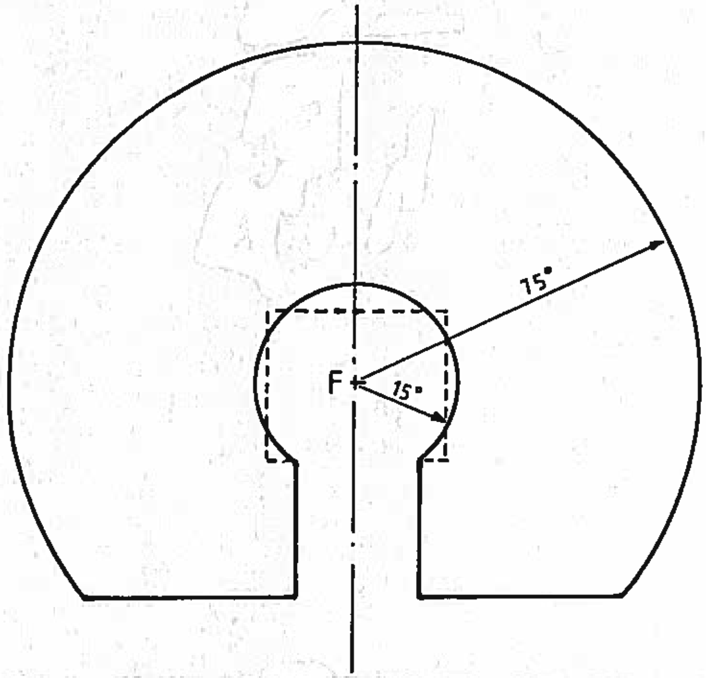


fig II-23 : Modélisation de la surface du concentrateur du four solaire de 1000 kW d'Odeillo suivant Alcayaga [54].

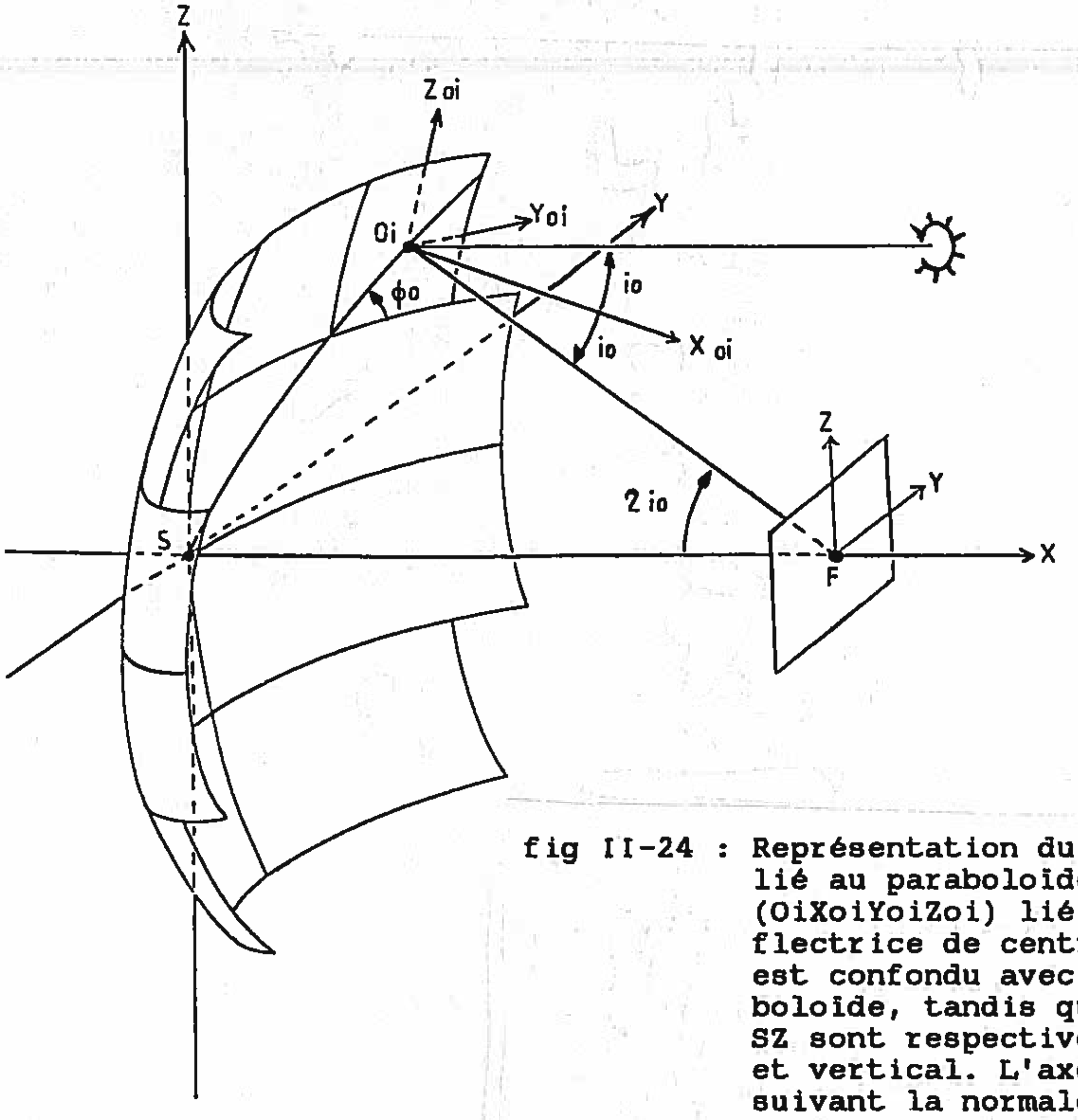


fig II-24 : Représentation du repère (SXYZ) lié au paraboloïde et du repère (OiXoiYoiZoi) lié à la facette réflectrice de centre Oi. L'axe SFX est confondu avec l'axe du paraboloïde, tandis que les axes SY et SZ sont respectivement horizontal et vertical. L'axe OiXoi est dirigé suivant la normale à la facette réflectrice et l'axe OiYoi reste contenu par construction dans un plan horizontal.

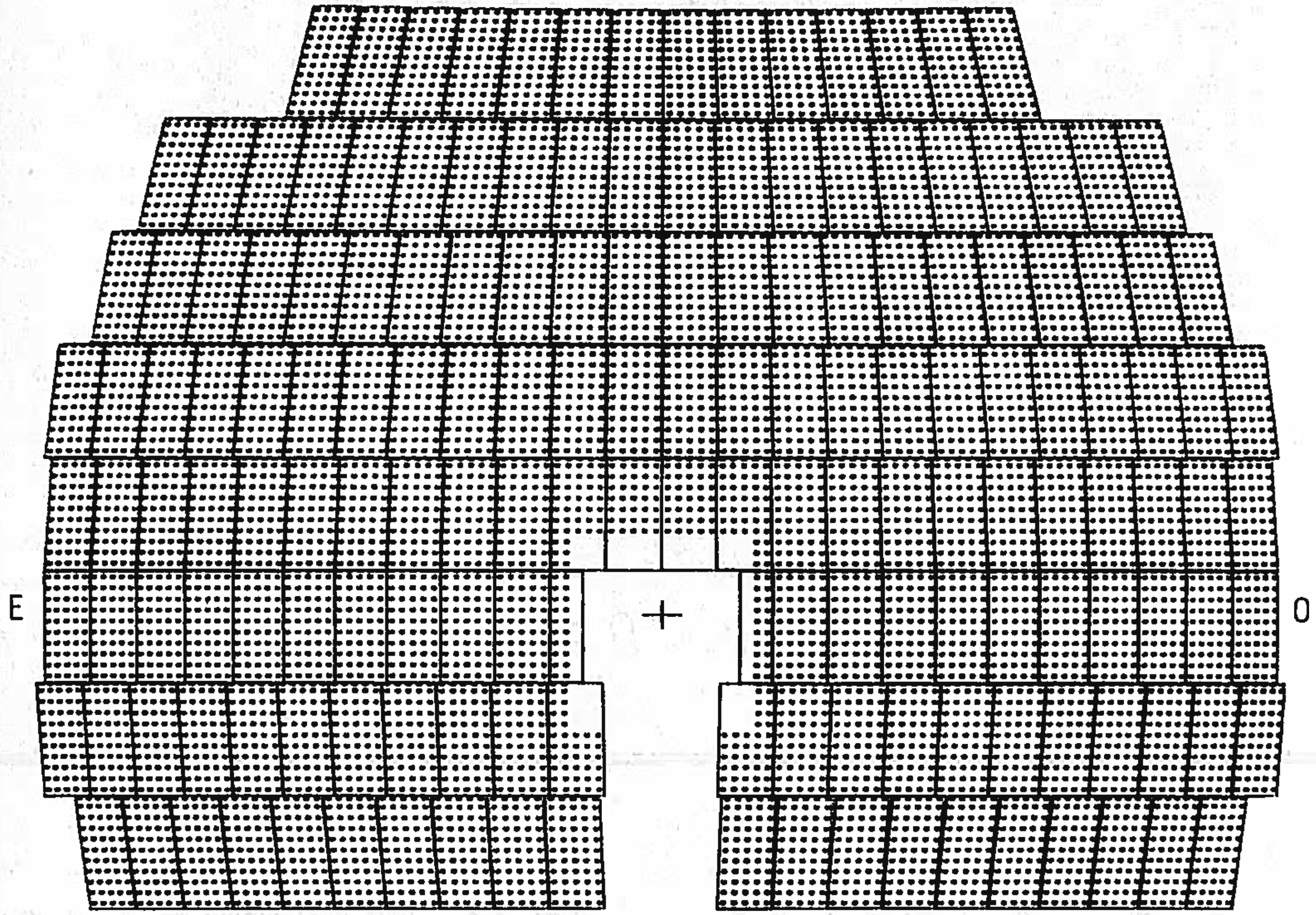


fig II-25 : Modélisation du concentrateur d'Odeillo.

Alcayaga [54] a pour sa part modélisé la surface réflectrice du concentrateur en la limitant par deux angles d'ouverture, et en tenant compte de la troncature inférieure du paraboloïde, ainsi que de celles qui résultent de l'ombre du bâtiment four (fig.II-23), le problème des interstices entre les facettes étant par ailleurs résolu par la multiplication d'un facteur correctif. Une telle approche ne pouvait nous satisfaire, puisque nous désirons, comme sur le champ d'héliostats de THEMIS, connaître précisément les coordonnées des centres de chacune des 9500 facettes qui constituent cette surface réflectrice, par rapport à un repère fixe. Dans ce but, nous avons entrepris la réalisation d'une modélisation plus fine, dont le principe est exposé en annexe IV; celui-ci repose sur quelques observations un peu plus fouillées de la surface du concentrateur :

1) Les 9500 facettes de l'installation sont disposées sur 168 panneaux rectangulaires de 5 m de hauteur. Chaque panneau supporte en général 55 ou 60 facettes réflectrices, réparties en 5 colonnes, et présente un relief en V, différent du relief paraboloïdal.

2) Comme il n'est pas possible de découper une surface paraboloïdale en sections rigoureusement rectangulaires, certains panneaux sont biseautés (voir annexe IV); cela se répercute sur la largeur des facettes des première ou cinquième colonnes, qui est variable en fonction de la hauteur du miroir sur le panneau. Ainsi le concentrateur n'est pas constitué uniquement de facettes standard (qui mesurent 48,5 x 48,5 cm) : 5% d'entre elles environ sont rectangulaires, et représentent une trentaine de types différents.

3) D'un étage à l'autre, il y a une discontinuité des surfaces supportées par les panneaux. Cela implique que les focales théoriques des huit tranches horizontales de paraboloïde sont légèrement différentes, d'une part, et que les facettes réflectrices supérieures des panneaux sont ombrées par les panneaux de l'étage supérieur, d'autre part : ces facettes ont donc en général des hauteurs moindres que la hauteur standard de 48,5 cm.

Ces idées de base nous ont servi, avec quelques simplifications, à reconstituer facette par facette, puis panneau par panneau, la surface réflectrice du concentrateur paraboloïdal. Nous avons ainsi réalisé un code de calcul (décrit dans l'annexe IV) qui détermine, pour chaque facette, ses dimensions et les coordonnées Y_{oi} et Z_{oi} de son centre Oi dans un repère (SXYZ) lié au paraboloïde (voir figure II-24). La figure II-25 représente la projection du concentrateur sur un plan vertical Est-Ouest (plan SYZ). La surface réflectrice a finalement été assimilée à un paraboloïde continu, de focale f égale à 18 m, et dont l'équation est classique :

$$X_{oi} = g\,(Y_{oi}, Z_{oi}) = \frac{Y_{oi}^2 + Z_{oi}^2}{4f} \qquad \text{(II-15)}$$

On donne également l'expression des dérivées partielles de g :

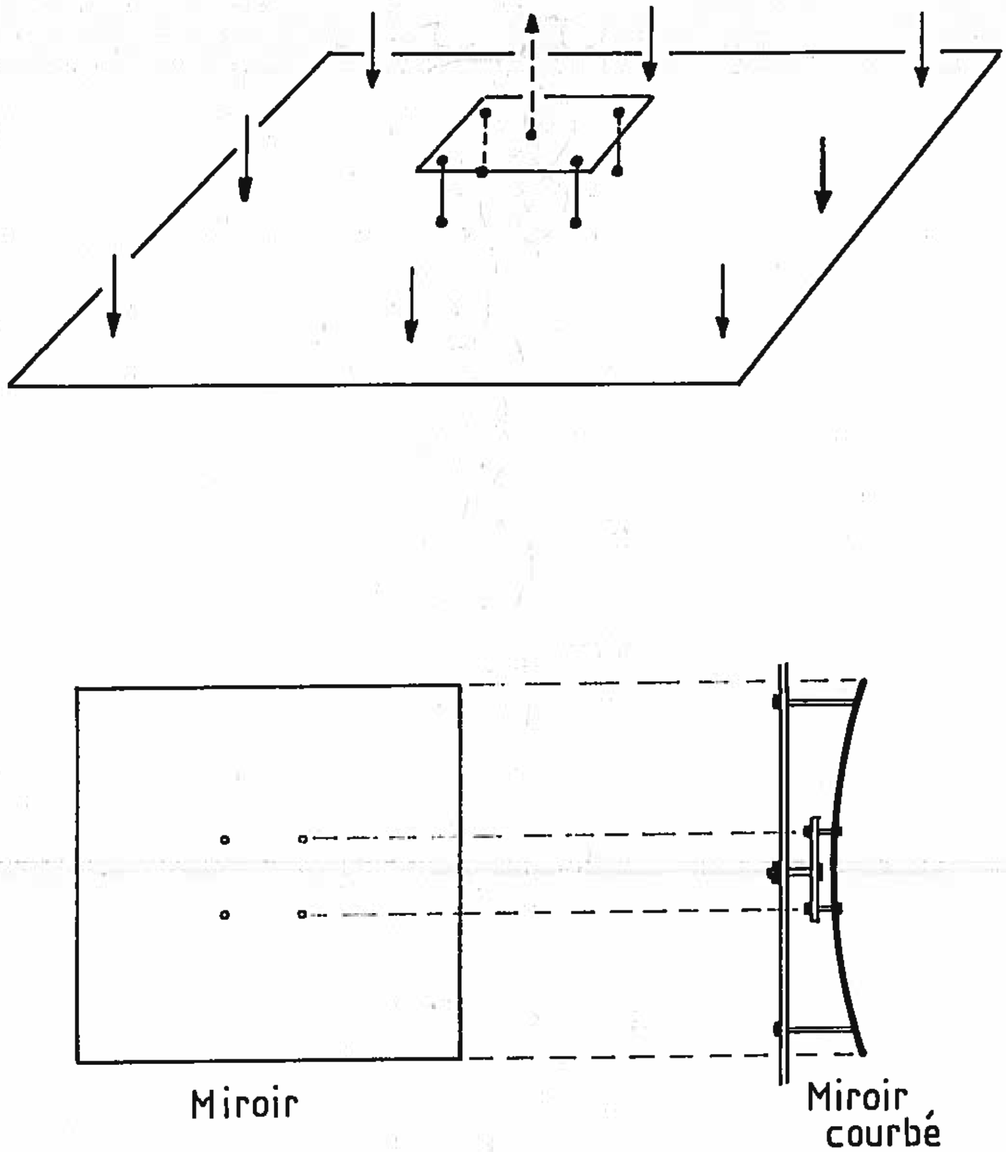


fig II-26 : Les facettes déformées sous contrainte mécanique du concentrateur du four solaire de 1000 kW d'Odeillo. Schémas de principe.

$$\frac{\partial g}{\partial Y_{oi}}(Y_{oi}, Z_{oi}) = \frac{Y_{oi}}{2f}$$

$$\frac{\partial g}{\partial Z_{oi}}(Y_{oi}, Z_{oi}) = \frac{Z_{oi}}{2f} \qquad \text{(II-16)}$$

4.2.4) Les facettes déformées sous contrainte mécanique

Les facettes qui équipent le concentrateur du four solaire de 1000 kW d'Odeillo sont du même type que celles qui furent utilisées à Montlouis [16] : il s'agit de facettes initialement planes, et déformées sous contrainte mécanique de manière à créer une concavité. La glace élémentaire d'origine, qui est du même type que celles qui équipent les héliostats plans, a subi, après recuit et perçage, une trempe à l'air qui lui confère une élasticité très supérieure à celle d'une glace normale. Elle est ensuite mise en place sur une carcasse métallique, où la mise sous contrainte s'effectue conformément aux schémas de la figure II-26 (voir aussi la photographie VI) : la vis centrale entraine une plaquette qui exerce une traction au centre de la facette, tandis que les 8 vis périphériques permettent d'obtenir des poussées antagonistes. Il est alors possible de travailler la ou les courbures de la facette, ainsi que leurs directions privilégiées.

L'ensemble du miroir et de son support métallique est attaché au panneau du concentrateur en 3 points qui permettent son réglage en orientation. Un système de vis de butée permet de conserver les positions correspondant au bon réglage, une fois qu'il a été obtenu (on retrouve d'ailleurs ce même type de fixation pour les miroirs d'héliostats plans). Le facteur de réflexion de ces miroirs trempés a été estimé à 0,78 [28].

Selon F.Trombe et A.Le Phat Vinh [28], l'utilisation de facettes courbées sous contrainte mécanique se traduit par une chute de 40% seulement du facteur de concentration, par rapport à une surface réflectrice paraboloidale dont le prix de revient serait extrêmement cher. Suivant ces mêmes auteurs une facette déformée remplace 5 glaces planes dont on superposerait les images. Mais ces évaluations ne permettent pas de se faire une idée précise du relief réel de ces facettes réflectrices. De plus, un calcul théorique des déformations, prenant en compte la disposition des points de contrainte, ne serait pas d'une grande utilité, puisque le relief définitif du miroir dépend en fait de neuf paramètres (une vis de traction, huit vis de poussée). Nous avons donc choisi a priori deux types de relief différents :

1) la facette est sphérique, de focale égale à la distance D_i qui sépare son centre Oi du foyer F du paraboloide. On donne l'équation caractéristique de son relief exprimée dans le repère lié à la facette (fig. II-24) :

$$X_p = f(Y_p, Z_p) = 2D_i\left[1 - \sqrt{1 - \frac{Y_p^2 + Z_p^2}{4D_i^2}}\right] \qquad \text{(II-17)}$$

Les dérivées partielles de $f(Y_p, Z_p)$ s'expriment :

$$f'_y = \frac{\partial f}{\partial Y_p}(Y_p, Z_p) = \frac{Y_p}{\sqrt{4D_i^2 - (Y_p^2 + Z_p^2)}}$$

(II-18)

$$f'_z = \frac{\partial f}{\partial Z_p}(Y_p, Z_p) = \frac{Z_p}{\sqrt{4D_i^2 - (Y_p^2 + Z_p^2)}}$$

Signalons que pour de faibles ouvertures de la facette, ce qui est le cas ici, Zakhidov et Khodzhaev ont montré que le relief sphérique était équivalent au relief parabolique de focale D_i [74-75]. Nous conserverons néanmoins notre facette sphérique pour l'instant.

2) la facette est localement paraboloïdale, c'est-à-dire qu'elle reproduit le relief du grand paraboloïde au voisinage de Oi. Il est clair que l'expression de $f(Y_p, Z_p)$ dans le repère lié à la facette dépend alors des angles i_o et ϕ_o représentés sur la figure II-24. Ce calcul a été effectué dans l'annexe V; il conduit à des expressions de $f(Y_p, Z_p)$, f'_y et f'_z assez lourdes que nous reproduisons ci-dessous :

$$f(Y_p, Z_p) = \frac{1}{\sin^2 i_o}\left[\frac{2f}{\cos i_o} - \cos i_o \sin i_o B_p - \sqrt{\frac{4f^2}{\cos^2 i_o} - 4f \sin i_o B_p - \sin^2 i_o C_p^2}\right]$$

(II-19)

où $B_p = \cos\phi_o Y_p + \sin\phi_o Z_p$

$C_p = -\sin\phi_o Y_p + \cos\phi_o Z_p$

et $f'_y = \dfrac{\partial f}{\partial Y_p}(Y_p, Z_p) = \cos\phi_o f'_b - \sin\phi_o f'_c$

et $f'_z = \dfrac{\partial f}{\partial Z_p}(Y_p, Z_p) = \sin\phi_o f'_b + \cos\phi_o f'_c$

avec : $$f'_b = \frac{1}{tg i_o}\left[\frac{1}{\sqrt{\frac{4f^2}{\cos^2 i_o} - 4f\sin i_o B_p - \sin^2 i_o C_p^2}} - 1\right]$$ (II-20)

$$f'_c = \frac{\cos i_o \; C_p}{2f\sqrt{\frac{4f^2}{\cos^2 i_o} - 4f\sin i_o B_p - \sin^2 i_o C_p^2}}$$

Il est possible d'approximer, au voisinage de Oi, la section du paraboloïde à une surface toroïdale présentant deux rayons de courbure principaux dans deux directions orthogonales, dont l'une est définie par l'intersection du plan de la facette et du plan d'incidence des rayons solaires, matérialisé par le triangle OiSF.

Nous invitons le lecteur à se reporter à l'annexe V.

5) DEFINITION DES REPERES ET CALCUL DES MATRICES DE PASSAGE

5.1) Expression de deux matrices de passage

Ainsi que nous l'avons vu au paragraphe 2, les principaux calculs s'effectuent dans un repère Rri qui est lié à la droite joignant le centre d'une facette au centre du plan récepteur. Il est donc nécessaire de déterminer, pour des coordonnées de P et M' respectivement exprimées dans les repères liés à la facette et au plan récepteur, les matrices de passage de ces repères à Rri; les paragraphes 5.2 à 5.4 expliciteront ces calculs matriciels pour les trois types de surface considérés. Toutefois, comme nous aurons souvent recours à des compositions de matrices de deux types particuliers, que nous désignerons P_1 et P_2, il nous a semblé utile d'étudier celles-ci préalablement.

On considère (figure II-27) un repère orthonormé de référence R(OXYZ) dont l'axe OZ est vertical, et les axes OX et OY définissent le plan horizontal OXY. Un premier repère Ro(OXoYoZo) est lié à un vecteur unitaire $\vec{u_o}$ dont les coordonnées s'expriment dans R:

$$\vec{u_o} = \begin{cases} \cos a_o \cos h_o = \alpha_o \\ \sin a_o \cos h_o = \beta_o \\ \quad \sin h_o = \gamma_o \end{cases}$$

L'axe OXo est dirigé par $\vec{u_o}$, l'axe OYo appartient au plan horizontal OXY, et l'axe OZo complète le repère orthonormé Ro.

De la même façon, on lie un deuxième repère orthonormé Ro' (OXo'Yo'Zo') à un vecteur $\vec{u_o}'$, distinct de $\vec{u_o}$, dont on exprime les coordonnées dans R :

$$\vec{u_o}' = \begin{cases} \cos a_o' \cos h_o' = \alpha_o' \\ \sin a_o' \cos h_o' = \beta_o' \\ \quad \sin h_o' = \gamma_o' \end{cases}$$

L'axe OYo' appartient donc lui aussi au plan horizontal (fig.II-27). $\vec{u_o}$ et $\vec{u_o}'$ définissent dans l'espace un plan que nous appellerons pour l'instant arbitrairement le plan d'incidence; i_o

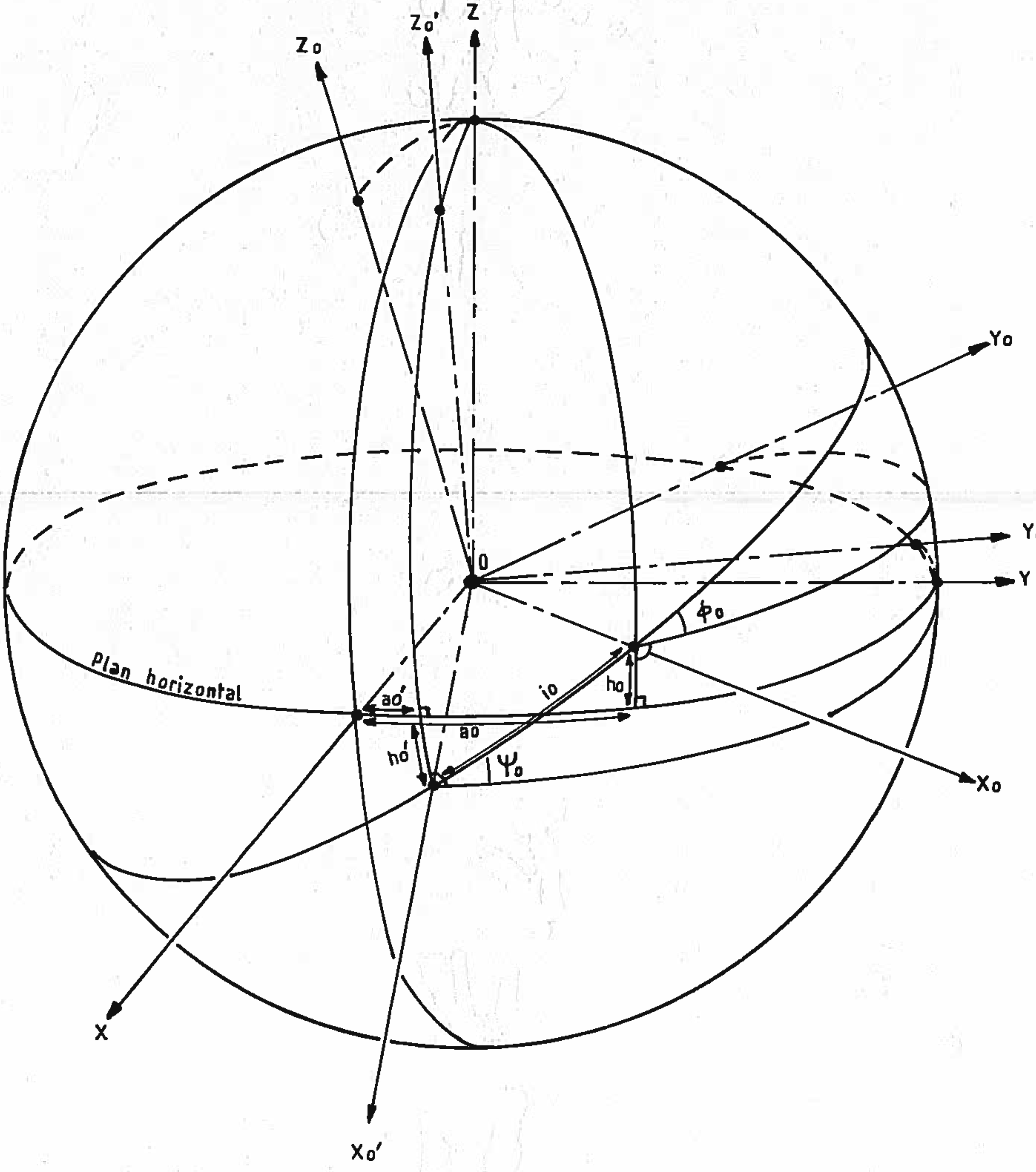


fig II-27 : Orientations des repères Ro et Ro' par rapport au repère R.

est l'angle que font entre eux ces deux vecteurs. Enfin ϕ_o est l'angle entre le plan horizontal et le plan OXoYo, et ψ_o est l'angle entre le plan horizontal et le plan OXo'Yo'(fig.II-27). Par la même occasion, ϕ_o est également l'angle que fait la trace du plan d'incidence dans le plan OYoZo avec l'axe OYo, et ψ_o l'angle que fait la trace du plan d'incidence dans le plan OYo'Zo' avec l'axe OYo'. On cherche maintenant à déterminer les coefficients de la matrice de passage de Ro' à Ro, notée $P_{2\ Ro'\to Ro}$. Celle-ci peut s'exprimer analytiquement en fonction de α_o, β_o, γ_o, α'_o, β'_o et γ'_o.

$$P_{2\ Ro'\to Ro} = \begin{bmatrix} \sigma & \frac{-\delta}{\sqrt{1-\gamma_o^2}} & \frac{\gamma'_o-\gamma_o\sigma}{\sqrt{1-\gamma_o^2}} \\ \frac{\delta}{\sqrt{1-\gamma_o'^2}} & \frac{\alpha_o\alpha'_o+\beta_o\beta'_o}{\sqrt{(1-\gamma_o^2)(1-\gamma_o'^2)}} & \frac{-\gamma_o\delta}{\sqrt{(1-\gamma_o^2)(1-\gamma_o'^2)}} \\ \frac{\gamma_o-\gamma'_o\sigma}{\sqrt{1-\gamma_o'^2}} & \frac{\gamma'_o\delta}{\sqrt{(1-\gamma_o^2)(1-\gamma_o'^2)}} & \frac{1-\gamma_o^2-\gamma_o'^2+\sigma\gamma_o\gamma'_o}{\sqrt{(1-\gamma_o^2)(1-\gamma_o'^2)}} \end{bmatrix}$$

où $\sigma = \alpha_o\alpha'_o + \beta_o\beta'_o + \gamma_o\gamma'_o = \cos i_o$

$\delta = \alpha'_o\beta_o - \alpha_o\beta'_o$

Cette forme convient bien au calcul numérique de $P_{2\ Ro'\to Ro}$. Toutefois on peut également lui donner une expression plus géométrique :

$$P_{2\ Ro'\to Ro} = \begin{bmatrix} \cos\Delta a_o \cos h_o \cos h'_o + \sin h_o \sin h'_o & \cos h'_o \sin \Delta a_o & \sin h'_o \cos h_o - \cos\Delta a_o \sin h_o \cos h'_o \\ -\sin\Delta a_o \cos h_o & \cos\Delta a_o & \sin\Delta a_o \sin h_o \\ \sin h_o \cos h'_o - \cos\Delta a_o \cos h_o \sin h'_o & -\sin h'_o \sin\Delta a_o & \cos\Delta a_o \sin h_o \sin h'_o + \cos h_o \cos h'_o \end{bmatrix}$$

où $\Delta a_o = a'_o - a_o$, il s'agit en fait de l'angle entre les projections de $\vec{u}_o$ et $\vec{u}_o'$ dans le plan horizontal.

D'autre part, en utilisant les relations aux sinus dans le grand triangle sphérique ZXoXo', on trouve que :

$$\sin i_o \cos\phi_o = -\sin\Delta a_o \cos h'_o$$

$$\sin i_o \cos\psi_o = \sin\Delta a_o \cos h_o$$

Ceci nous permet de donner une dernière expression de $P_{2\ Ro'\to Ro}$:

$$P_{2\ Ro'-Ro} = \begin{bmatrix} \cos i_o & -\cos \phi_o \sin i_o & -\sin \phi_o \sin i_o \\ \cos \psi_o \sin i_o & \cos \Delta a_o & \sin \Delta a_o \sin h_o \\ \sin \psi_o \sin i_o & -\sin h_o' \sin \Delta a_o & \cos\Delta a_o \sinh_o \sinh_o' + \cosh_o \cosh_o' \end{bmatrix} \quad \text{(II-22)}$$

Par la suite, nous nous servirons souvent de ces matrices de type P_2, particulièrement dans les chapitres III et IV : elles permettent en effet d'approximer assez bien les matrices de passage de repères liés aux modules réflecteurs d'héliostats à monture altazimutale, ou à des facettes de concentrateurs fixes disposées en étages, dans des repères de calcul identiques à Rri (voir paragraphe 2). Le cas particulier où Ro' et R sont confondus nous intéresse également; on obtient alors la matrice d'une rotation qui ne dépend que des angles a_o et h_o :

$$P_{1\ R-Ro} = \begin{bmatrix} \cos a_o \cos h_o & -\sin a_o & -\cos a_o \sin h_o \\ \sin a_o \cos h_o & \cos a_o & -\sin a_o \sin h_o \\ \sin h_o & 0 & \cos h_o \end{bmatrix} \quad \text{(II-23)}$$

$P_{1\ R-Ro}$ s'exprime également en fonction de α_o, β_o, γ_o

$$P_{1\ R-Ro} = \begin{bmatrix} \alpha_o & \dfrac{-\beta_o}{\sqrt{1-\gamma_o^2}} & \dfrac{-\alpha_o\gamma_o}{\sqrt{1-\gamma_o^2}} \\ \beta_o & \dfrac{\alpha_o}{\sqrt{1-\gamma_o^2}} & \dfrac{-\beta_o\gamma_o}{\sqrt{1-\gamma_o^2}} \\ \gamma_o & 0 & \sqrt{1-\gamma_o^2} \end{bmatrix} \quad \text{(II-24)}$$

En pratique, la détermination des matrices de types P_1 et P_2 est effectuée par deux sous-programmes de calcul, respectivement dénommés HMAT et HIMAT. L'expression des coefficients des matrices de type P_1 est déduite, dans HMAT, des cosinus directeurs (α_o, β_o, γ_o) du vecteur $\vec{u_o}$ suivant la relation (II-24), tandis que l'expression des coefficients des matrices de type P_2 est calculée, dans HIMAT, par la relation (II-21); les cosinus directeurs (α_o', β_o', γ_o') et (α_o, β_o, γ_o) des vecteurs $\vec{u_o}'$ et $\vec{u_o}$ constituent alors les paramètres d'entrée de ce sous-programme.

Nous insistons enfin sur les propriétés de ces matrices, que l'on exprimera généralement sous la forme :

$$P = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$

Ce sont des matrices orthogonales droites, puisqu'elles transforment, par des rotations, des repères orthonormés en repères orthonormés. En conséquence, la somme des carrés des éléments de toute ligne (ou colonne) est égale à 1, et la somme des produits des éléments correspondants de deux lignes (ou colonnes) est nulle. De plus chaque élément C_{ij} est égal à son cofacteur, ce qui nous permet d'écrire par exemple la relation :

$$C_{33} = C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21}$$

ainsi que toutes les relations qui peuvent être déduites de la précédente par des permutations circulaires sur les indices. Enfin, l'inverse de ces matrices est égale à leur transposée. Toutes ces propriétés seront réutilisées par la suite.

5.2) Cas des héliostats focalisants

5.2.1) Choix des repères

Ceux-ci sont tous précisément indiqués sur la figure II-28. On distingue sept repères orthonormés différents.

1)<u>Rinst</u> (FXinstYinstZinst) est le repère lié à l'installation : F en est le point focal, situé au milieu de la face d'entrée de la chaudière. FXinst et FYinst sont des axes horizontaux, respectivement dirigés vers le Sud et l'Est, et FZinst est aligné suivant la verticale du lieu. Le centre O d'un héliostat est repéré par ses coordonnées (X_O, Y_O, Z_O) dans Rinst, et la direction du centre du disque solaire, par les cosinus directeurs (α_S, β_S, γ_S) du vecteur $\overrightarrow{S_O}$, conformément à la relation (II-7). Les coordonnées de O', centre du plan récepteur (P'), sont notées (X'_O, Y'_O, Z'_O) dans Rinst; sur la figure II-28, O' apparait confondu avec F : il ne s'agit là que d'un cas particulier.

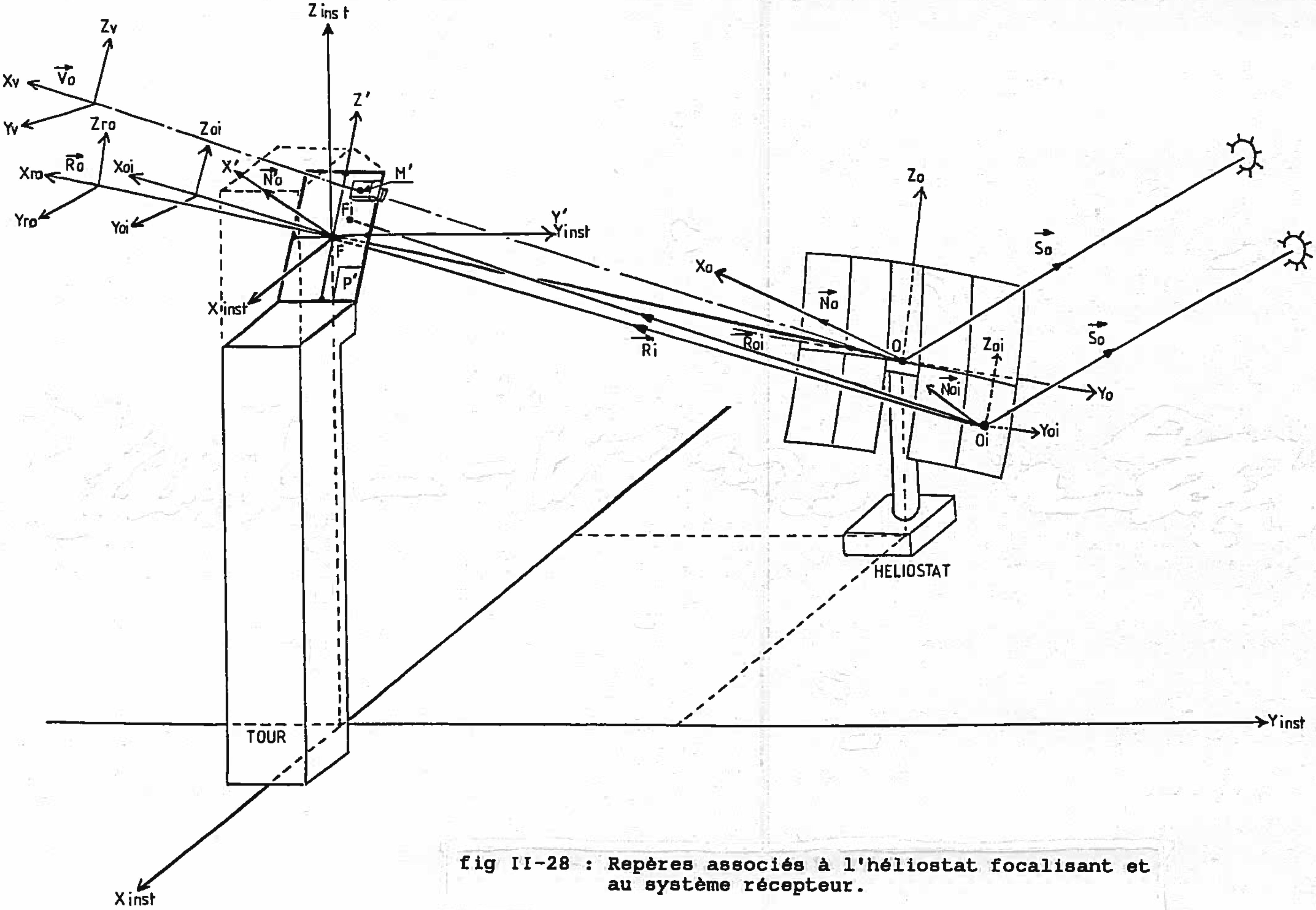


fig II-28 : Repères associés à l'héliostat focalisant et au système récepteur.

2)Ro(OXoYoZo) est le repère lié à l'héliostat. Son axe OXo est dirigé par $\vec{N}_O$ (*), vecteur unitaire normal à l'héliostat, dont les composantes sont $(\alpha_O, \beta_O, \gamma_O)$ dans Rinst. L'héliostat focalisant ayant une monture altazimutale, l'axe OYo est toujours situé dans un plan horizontal, aux défauts de pointage près. Le centre Oi d'un des modules réflecteurs est repéré par ses coordonnées (X_{Oi}, Y_{Oi}, Z_{Oi}) dans Ro, avec :

$$X_{Oi} = g(Y_{Oi}, Z_{Oi})$$

g étant définie par la relation (II-11). On désigne maintenant par $\vec{R}_O$ un vecteur unitaire colinéaire au rayon principal réfléchi suivant la direction OF (ou OO' si O' est le point de tir). L'asservissement de l'héliostat sur le soleil implique que $\vec{R}_O$ soit en permanence lié à $\vec{S}_O$ et $\vec{N}_O$ par la relation de Descartes :

$$\vec{R}_O = 2(\vec{S}_O\vec{N}_O)\vec{N}_O - \vec{S}_O \qquad \text{(II-25)}$$

Les cosinus directeurs de $\vec{R}_O$ dans Rinst sont notés $(\alpha_{rO}, \beta_{rO}, \gamma_{rO})$.

3)R' (O'X'Y'Z') est le repère lié au plan récepteur (P') choisi. L'axe O'X' est dirigé par $\vec{N}'_O$, vecteur unitaire normal au plan récepteur, et dont les composantes sont notées $(\alpha'_O, \beta'_O, \gamma'_O)$ dans Rinst. On a en particulier :

$$\vec{N}'_O = \begin{cases} \cos a'_O \cos h'_O = \alpha'_O \\ \sin a'_O \cos h'_O = \beta'_O \\ \sin h'_O = \gamma'_O \end{cases} \qquad \text{(II-26)}$$

si a'_O et h'_O sont les angles en azimut et en hauteur qui déterminent l'orientation de $\vec{N}'_O$ dans Rinst (fig.II-29). On impose de plus que l'axe O'Y' soit contenu dans un plan horizontal. Les coordonnées de M', point d'observation des répartitions de luminance, sont notées (X',Y',Z') dans R'. Lorsque M' appartient au plan récepteur (P'), X' est bien entendu égal à 0.

(*)Bien que leurs composantes soient notées de la même façon, les vecteurs $\vec{N}_O$ et $\vec{N}'_O$ ne sont pas forcément confondus avec les vecteurs $\vec{u}_O$ et $\vec{u}'_O$ définis au paragraphe précédent.

4)<u>Roi</u> (OiXoiYoiZoi) est le repère lié au module réflecteur considéré. Son axe OiXoi est dirigé par un vecteur unitaire $\vec{N}_{oi}$, suivant l'axe principal du module, tandis que les axes OiYoi et OiZoi restent parallèles aux directions définies par ses contours rectangulaires. En général, du fait de la sphéricité de l'héliostat et des défauts éventuels de réglage du module, l'axe OiYoi n'est pas contenu dans un plan horizontal. Les coordonnées dans Roi d'un point P quelconque de la surface réflectrice seront notées (X_p, Y_p, Z_p), avec :

$$X_p = f(Y_p, Z_p)$$

où f est la fonction caractéristique du relief du module, définie par la relation (II-13).

Par ailleurs, les cosinus directeurs de $\vec{N}_{oi}$ dans Ro sont notés (α_{oi}, β_{oi}, γ_{oi}).

5) <u>Rri</u> (OiXriYriZri) est le repère principal de calcul (voir paragraphe 2). Son axe OiXri est aligné suivant la direction OiO', repérée par le vecteur unitaire $\vec{R}_i$, dont les cosinus directeurs dans Rinst sont notés (α_{ri}, β_{ri}, γ_{ri}). En général, $\vec{R}_i$ n'est pas confondu avec $\vec{R}_{oi}$, vecteur unitaire qui repère la direction du rayon principal en provenance du centre du soleil, et réfléchi au point Oi; cela aura deux conséquences principales :

a) $\vec{R}_i$ n'est pas lié à $\vec{S}_o$ et $\vec{N}_{oi}$ par la relation de Descartes, alors que $\vec{R}_{oi}$ l'est.

b) la droite issue de Oi et dirigée suivant $\vec{R}_{oi}$ coupe le plan récepteur en Fi, qui est le point d'impact du rayon principal réfléchi : les lois de l'optique géométrique et les défauts typiques des installations solaires contribueront la plupart du temps à rendre Fi distinct du point O' (fig.II-28).

Enfin, l'axe OiYri sera toujours choisi dans un plan horizontal.

6)<u>Rro</u> (OXroYroZro) est un repère lié au vecteur cible $\vec{R}_o$, qui en dirige l'axe OXro, et dont l'axe OYro est situé dans un plan horizontal. Il n'est d'aucune utilité dans les codes de simulation, mais jouera un rôle important dans le chapitre III, où les repères Rri lui seront approximés.

7)<u>Rv</u> (OXvYvZv) est le repère lié à l'axe de visée. On suppose ici que le système d'observation placé en M' vise le centre O de l'héliostat. L'axe OXv de Rv est donc dirigé par le vecteur $\vec{V}_o$, qui est colinéaire à la droite OM', et l'axe OYv est toujours situé dans un plan horizontal. Les cosinus directeurs de $\vec{V}_o$

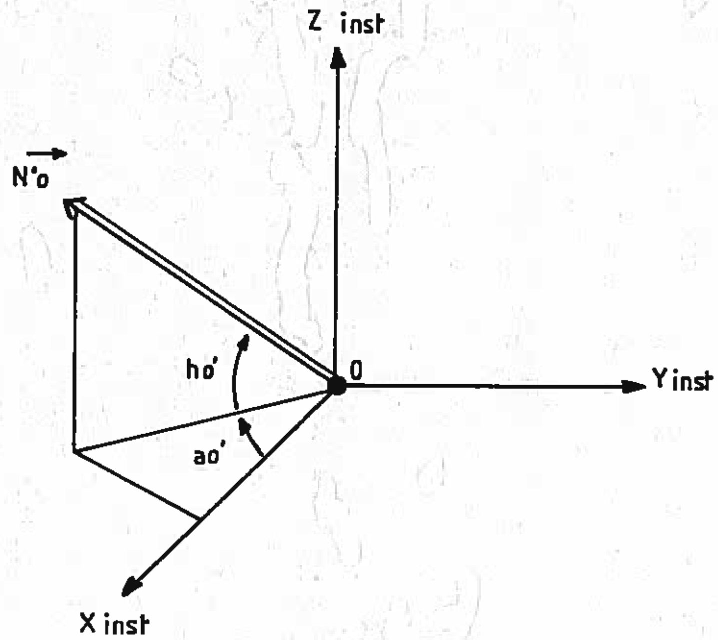


fig II-29 : Repérage du vecteur $\overrightarrow{N_o}$' dans le repère Rinst.

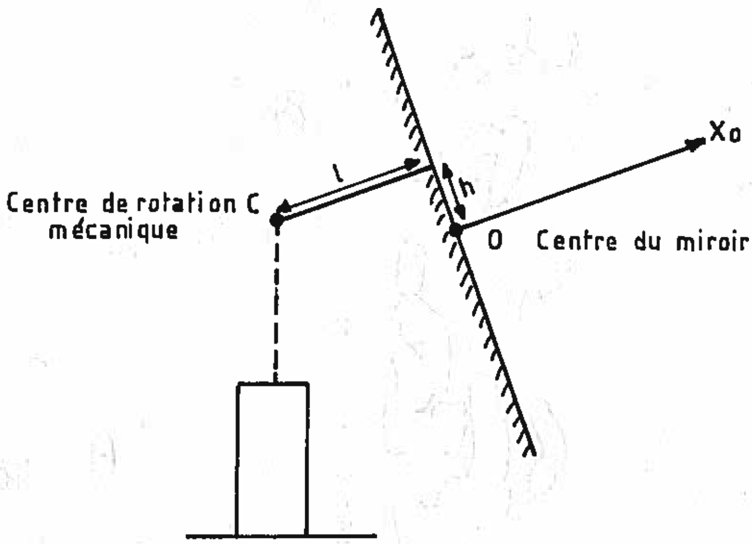


fig II-30 : Positions relatives des points C et O.

s'expriment (α_V, β_V, γ_V) dans Rinst.

Munis de tous ces repères, nous aurons bien sûr à déterminer certaines matrices de passage.

5.2.2) Influence de la position du centre de rotation de l'héliostat

Dans le paragraphe 4.1.1, nous avons assimilé le centre de rotation mécanique C de l'héliostat au centre O de la surface réflectrice. En réalité C et O sont distincts et leur position relative est représentée sur la figure II-30. On caractérise ce décalage par le vecteur $\overrightarrow{CO}$ exprimé dans le repère Ro lié à l'héliostat :

$$\overrightarrow{CO} = \left| \begin{array}{c} l \\ o \\ h \end{array} \right.$$

où l = 0,38 m et h = - 0,13 m [72]. Les coordonnées publiées dans [72] sont évidemment celles des centres de rotation C, puisque les points O sont mobiles dans l'espace en fonction de l'orientation donnée à l'héliostat. On sait que celle-ci est repérée par le vecteur $\overrightarrow{N_O}$. Pour un vecteur soleil $\overrightarrow{S_O}$ donné, la position du point O dépend donc de $\overrightarrow{N_O}$: or celui-ci est déterminé par la relation de Descartes (II-25), où apparaît le vecteur cible $\overrightarrow{R_O}$, qui est lui- même lié à la position du point O, et donc à $\overrightarrow{N_O}$: le problème est finalement de déterminer le point O et les vecteurs $\overrightarrow{N_O}$ et $\overrightarrow{R_O}$, qui sont interdépendants, dans le repère Rinst. Bien qu'une solution analytique soit possible, nous avons opté pour une résolution numérique, plus facile à mettre en oeuvre.

Nous procéderons par itérations, en donnant à O, $\overrightarrow{N_O}$,$\overrightarrow{R_O}$, et au repère Ro des positions et orientations successives dans l'espace O_n, $\overrightarrow{N_{O,n}}$, $\overrightarrow{R_{O,n}}$ et Ro,n , jusqu'à trouver le bon pointage de l'héliostat :

A l'ordre 1, O_O et C sont confondus. On calcule facilement les cosinus directeurs du vecteur $\overrightarrow{R_{O,O}}$ à partir des coordonnées de C(X_C, Y_C, Z_C) et de O' dans Rinst :

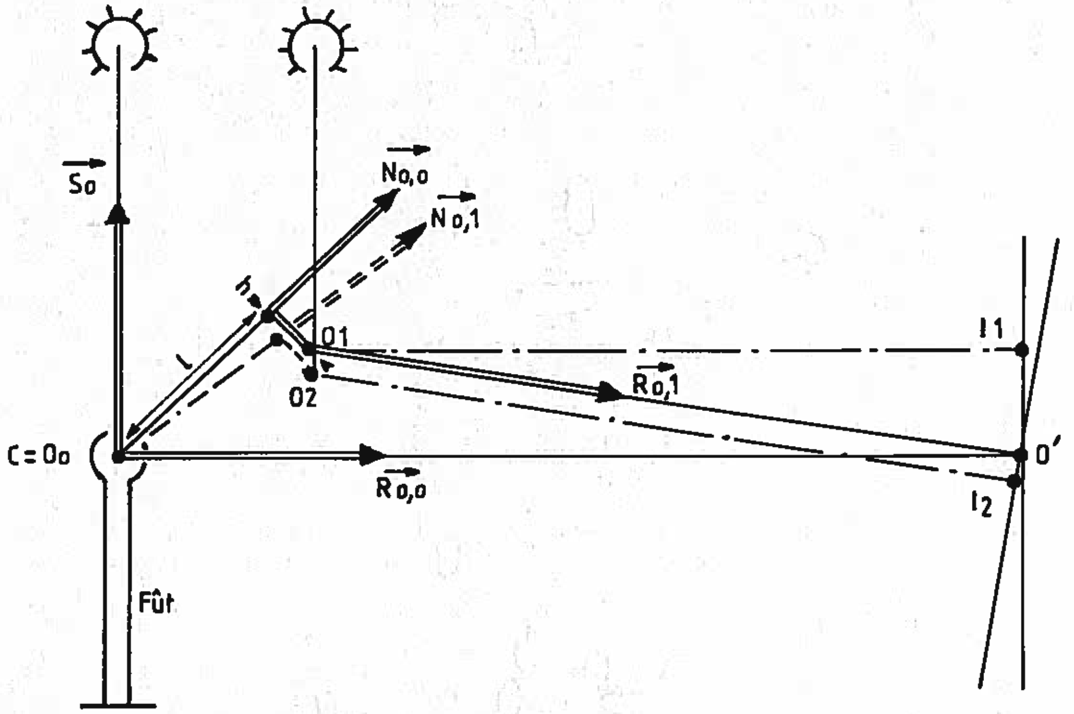


fig II-31 : Recherche de la position réelle du centre de l'héliostat O. C est le centre de rotation mécanique de l'héliostat et O' est le point cible.

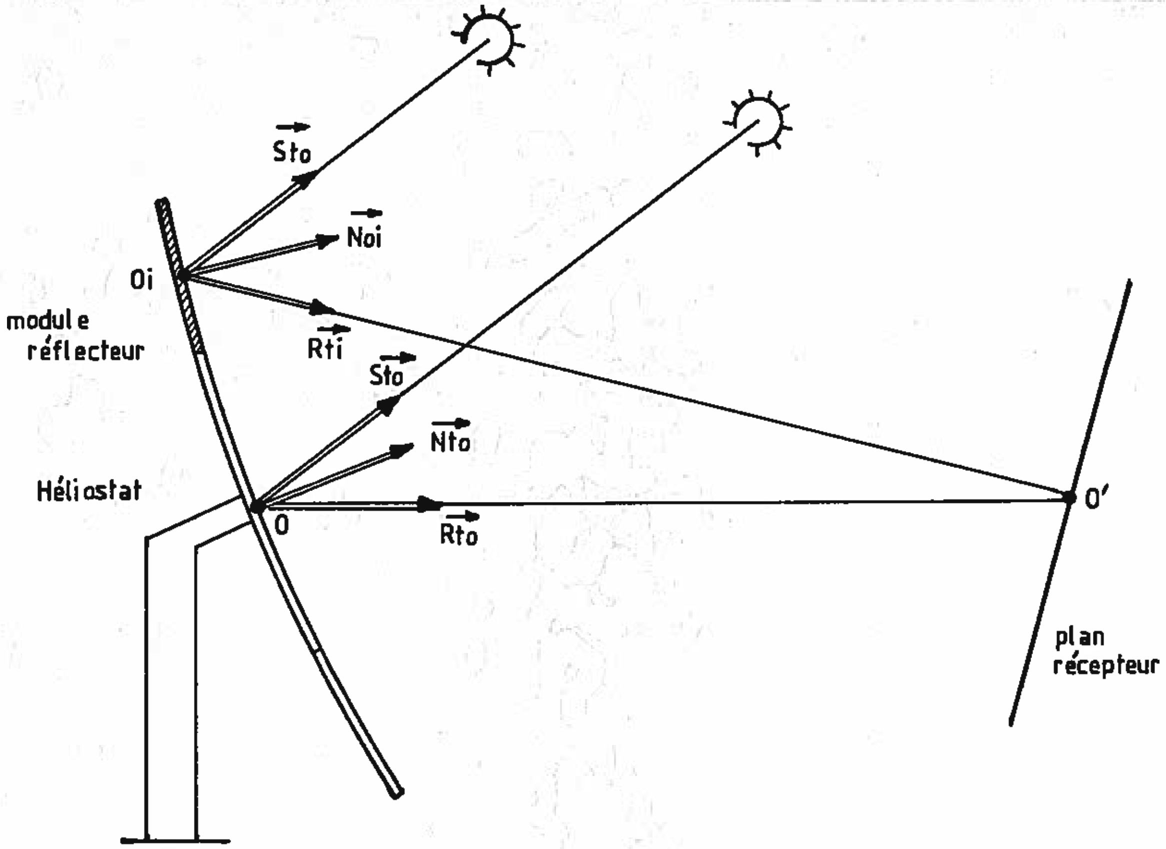


fig II-32 : Réglage d'un héliostat en dehors de son axe : le vecteur $\vec{N}_{oi}$ normal au module de centre Oi se déduit des vecteurs $\vec{S}_{to}$ et $\vec{R}_{ti}$ par la loi de Descartes.

$$\overrightarrow{R_{o,o}} = \frac{1}{D_o} \begin{bmatrix} X'_o - X_c \\ Y'_o - Y_c \\ Z'_o - Z_c \end{bmatrix} \qquad \text{(II-27)}$$

avec $D_o = \sqrt{(X'_o - X_c)^2 + (Y'_o - Y_c)^2 + (Z'_o - Z_c)^2}$

On détermine alors le vecteur normal à l'héliostat $\overrightarrow{N_{o,o}}$ par la relation suivante, déduite de la loi de Descartes :

$$\overrightarrow{N_{o,o}} = \frac{\overrightarrow{S_o} + \overrightarrow{R_{o,o}}}{\sqrt{2(1+\overrightarrow{S_o}\,\overrightarrow{R_{o,o}})}} \qquad \text{(II-28)}$$

On calcule ensuite la matrice de passage de type P_1 de Rinst à Ro,o suivant la relation (II-24), les cosinus directeurs de $\overrightarrow{N_{o,o}}$ dans Rinst étant directement obtenus par la relation précédente; on fait pour cela appel au sous-programme HMAT. Les coordonnées dans Rinst du nouveau centre de l'héliostat O_1 sont alors déduites de la relation :

$$\overrightarrow{O_oO_1} = P_{1\ \text{Rinst} - \text{Ro,o}} \times \overrightarrow{CO} \qquad \text{(II-29)}$$

En ne modifiant pas l'orientation de l'héliostat, mais en tenant compte de la nouvelle position de son centre O_1, on détermine alors l'écart entre O' et le point d'impact I_1 du rayon réfléchi en O_1 et dirigé par $\overrightarrow{R_{o,o}}$. Il suffit pour cela d'écrire que (fig.II-31) :

$$\overrightarrow{O'I_1} = \overrightarrow{O'O_o} + \overrightarrow{O_oO_1} + \lambda\overrightarrow{R_{o,o}}$$

avec $\overrightarrow{O'O_o} = - D_o\,\overrightarrow{R_{o,o}}$, et λ est tel que $\overrightarrow{O'I_1} \times \overrightarrow{R_{o,o}} = 0$; il est en effet plus commode d'imposer que le vecteur $\overrightarrow{O'I_1}$ soit situé dans un plan perpendiculaire au rayon réfléchi principal. Des deux relations précédentes, on tire :

$$\overrightarrow{O'I_1} = \overrightarrow{O_oO_1} - (\overrightarrow{O_oO_1}\,\overrightarrow{R_{o,o}})\,\overrightarrow{R_{o,o}}$$

et

$$||\overrightarrow{O'I_1}|| = \sqrt{\overrightarrow{O_oO_1}^2 - (\overrightarrow{O_oO_1}\,\overrightarrow{R_{o,o}})^2} \qquad \text{(II-30)}$$

Nous considérons que O_1, $\overrightarrow{N_{o,o}}$ et $\overrightarrow{R_{o,o}}$ seront suffisamment rapprochés de leurs position et orientations finales, qui correspondent au pointage parfait de l'héliostat, si :

$$||\overrightarrow{O'I_1}|| \leqslant 0{,}1 \text{ mm}$$

Lorsque cela n'est pas le cas, on procède à une itération supplémentaire : O_1 remplaçant O_o, il faut alors calculer $\overrightarrow{R_{o,1}}$, $\overrightarrow{N_{o,1}}$, P_1 Rinst - $Ro,_1$, etc... Nous réécrivons maintenant les relations (II-27) à (II-30) à l'ordre n :

$$\overrightarrow{R_{o,n-1}} = \frac{1}{D_{n-1}} \left[\begin{array}{l} X'_o - X_{n-1} \\ Y'_o - Y_{n-1} \\ Z'_o - Z_{n-1} \end{array}\right. \qquad \text{(II-27)}$$

avec $D_{n-1} = \sqrt{(X'_o-X_{n-1})^2 + (Y'_o-Y_{n-1})^2 + (Z'_o-Z_{n-1})^2}$

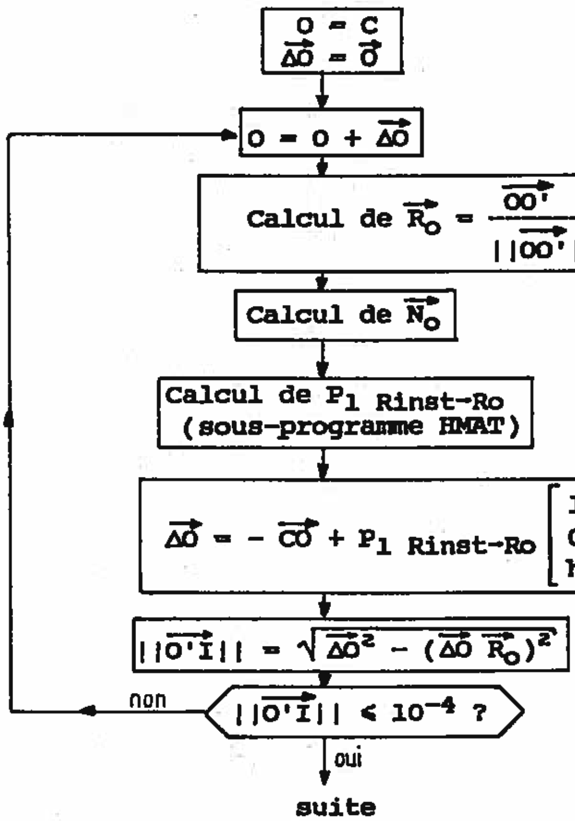
$$\overrightarrow{N_{o,n-1}} = \frac{\overrightarrow{S_o} + \overrightarrow{R_{o,n-1}}}{\sqrt{2(1+\overrightarrow{S_o}\,\overrightarrow{R_{o,n-1}})}} \qquad \text{(II-28)}$$

$$\overrightarrow{O_{n-1}O_n} = -\,\overrightarrow{CO_{n-1}} + P_1\ \text{Rinst} - \text{Ro}_{,n-1} \times \overrightarrow{CO} \qquad \text{(II-29)}$$

et

$$||\overrightarrow{O'I_n}|| = \sqrt{\overrightarrow{O_{n-1}O_n}^2 - (\overrightarrow{O_{n-1}O_n}\ \overrightarrow{R_{o,n-1}})^2} \qquad \text{(II-30)}$$

En pratique, 2 ou 3 itérations suffisent pour trouver la position définitive du point O, et les orientations finales de $\overrightarrow{N_o}$ et $\overrightarrow{R_o}$. Nous donnons ci-dessous l'organigramme descriptif de cette séquence de calcul, que l'on retrouvera sur tous nos programmes concernant les héliostats focalisants.



L'influence de la position réelle du centre de l'héliostat par rapport à son centre de rotation mécanique est en réalité peu sensible, ainsi qu'on aurait pu le prévoir : en effet, il est équivalent de considérer qu'on a introduit sur la position de l'héliostat lui-même des décalages axiaux et latéraux de l'ordre de quelques dizaines de centimètres : cela est peu comparé à des valeurs de focales f_H qui varient entre 80 et 235 m. Néanmoins nous avons constaté dans certains cas des écarts de l'ordre de 3% sur la valeur du facteur de concentration réalisé en un point. Il semble donc utile de tenir compte de cette influence si l'on souhaite réaliser une modélisation très fine des performances de l'héliostat CETHEL III bis. Quoi qu'il en soit, nous sommes maintenant censés connaître les composantes des vecteurs $\vec{N_o}$ et $\vec{R_o}$, ainsi que la matrice $P_{1\ Rinst-Ro}$.

5.2.3) Matrice de passage de Rri dans R'

Les cosinus directeurs (α'_o, β'_o, γ'_o) de $\vec{N'_o}$ dans Rinst sont donnés par la relation (II-26). Par ailleurs le vecteur unitaire $\vec{R_i}$ est défini par :

$$\vec{R_i} = \frac{\overrightarrow{OiO'}}{||\overrightarrow{OiO'}||} = \frac{\overrightarrow{OiO'}}{D_i} \qquad \text{(II-31)}$$

en posant : $D_i = ||\overrightarrow{OiO'}||$ (II-32)

De plus $\overrightarrow{OiO'} = \overrightarrow{OO'} - \overrightarrow{OOi}$. On peut alors exprimer les composantes de $\overrightarrow{OiO'}$ dans Rinst suivant l'écriture matricielle :

$$\overrightarrow{OiO'} = \begin{bmatrix} X'_o - X_o \\ Y'_o - Y_o \\ Z'_o - Z_o \end{bmatrix} - P_{1\ Rinst-Ro} \begin{bmatrix} X_{oi} \\ Y_{oi} \\ Z_{oi} \end{bmatrix} \qquad \text{(II-33)}$$

Des relations (II-33) et (II-32) on tire respectivement $\overrightarrow{OiO'}$ et D_i. La relation (II-31) nous permet ensuite de déduire les cosinus directeurs (α_{ri}, β_{ri}, γ_{ri}) du vecteur $\vec{R_i}$ dans Rinst. Comme les axes OiYri et O'Y' des repères Rri et R' sont tous deux horizontaux, on peut déterminer la matrice de passage $P_{2\ Rri-R'}$ par la relation (II-21), c'est-à-dire en faisant appel au sous-programme de calcul HIMAT.

5.2.4) Matrice de passage de Rri dans Ro

Les repères Rri et Ro ayant tous deux leur deuxième axe (respectivement OiYri et OYo) horizontal, et les cosinus directeurs de $\vec{R_i}$ et $\vec{N_o}$ ayant déjà été déterminés dans les deux paragraphes précédents, le sous-programme HIMAT nous permet là aussi de calculer directement la matrice $P_2\ _{Rri-Ro}$.

5.2.5) Matrice de passage de Rri dans Roi

5.2.5.1) Héliostat réglé sur son axe

Du fait de la sphéricité de l'héliostat, l'axe OiYoi de Roi ne sera généralement pas horizontal, et nous aurons ici recours à une composition de matrices. En effet la géométrie des modules réflecteurs de l'héliostat est indépendante de l'orientation de celui-ci, et la matrice de passage de Ro à Roi restera donc la même à tout instant. Celle-ci caractérise en fait le passage d'un repère lié en O à la surface sphérique idéale de rayon $2f_H$ dans un repère dont le plan OiYoiZoi est tangent à cette surface au point Oi de coordonnées (X_{oi}, Y_{oi}, Z_{oi}) dans Ro. La normale $\overrightarrow{N_{oi}}$ en ce point s'exprime, dans le repère Ro, par la relation suivante, qui est valable à tout instant.

$$\overrightarrow{N_{oi}} = \frac{\overrightarrow{\text{grad}}\,[X_{oi}-g(Y_{oi},Z_{oi})]}{||\overrightarrow{\text{grad}}[X_{oi}-g(Y_{oi},Z_{oi})]||} \qquad \text{(II-34)}$$

où g est la fonction caractéristique du support des modules réflecteurs définie par la relation (II-11). Les cosinus directeurs de $\overrightarrow{N_{oi}}$ dans Ro s'écrivent alors :

$$\overrightarrow{N_{oi}} = \begin{bmatrix} \alpha_{oi} \\ \beta_{oi} \\ \gamma_{oi} \end{bmatrix} = \frac{1}{D_g} \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{\partial g}{\partial Y}(Y_{oi},Z_{oi}) \\ -\frac{\partial g}{\partial Z}(Y_{oi},Z_{oi}) \end{bmatrix} \qquad \text{(II-35)}$$

avec $D_g = \sqrt{1 + \frac{\partial g}{\partial Y}^2(Y_{oi},Z_{oi}) + \frac{\partial g}{\partial Z}^2(Y_{oi},Z_{oi})}$

et $\frac{\partial g}{\partial Y}(Y,Z)$ et $\frac{\partial g}{\partial Z}(Y,Z)$ ont été définies par les relations (II-12). Or, les axes OiYoi liés aux modules restent par construction parallèles au plan OXoYo perpendiculaire à la surface de l'héliostat. La matrice de passage de Ro dans Roi est donc de type P_1 et peut facilement être calculée par la relation (II-24) (par application du sous-programme HMAT), à partir de l'expression des cosinus directeurs de $\overrightarrow{N_{oi}}$ donnés par la relation (II-35). On note cette matrice $P_1\ _{Ro-Roi}$, et on peut finalement écrire la matrice de passage de Rri dans Roi sous la forme

$$P_{\,Rri\text{-}Roi} = P_{2\,Rri\text{-}Ro} \times P_{1\,Ro\text{-}Roi} \qquad \text{(II-36)}$$

A priori, la matrice $P_{\,Rri\text{-}Roi}$ n'est ni du type P_1, ni du type P_2.

5.2.5.2) Héliostat réglé en dehors de son axe

Il s'agit du cas plus complexe d'un héliostat optimisé pour une certaine position du soleil dans le ciel, que l'on repère par le vecteur unitaire $\overrightarrow{S_{to}}$. Ainsi que l'ont montré Igel et Hughes [46], l'héliostat présente alors une certaine concavité, et ici non plus, l'axe OiYoi du repère Roi ne sera pas horizontal. Le problème est donc de déterminer la matrice $P_{\,Ro\text{-}Roi}$ qui reste, ici aussi, invariable au cours du temps. On procède de la manière suivante (fig.II-32) :

1) Par une procédure identique à celle qui est décrite dans le paragraphe 5.2.2, on calcule la position O du centre de l'héliostat, ainsi que son vecteur normal $\overrightarrow{N_{to}}$ et le vecteur cible $\overrightarrow{R_{to}}$, à l'heure et au jour de réglage t_o choisis pour l'optimisation de l'héliostat. On détermine également la matrice $P_{1\,Rinst\text{-}Rto}$ (Rto est ici le repère lié à l'héliostat pour l'instant t_o).

2) On détermine $\overrightarrow{OiO'}$ à l'instant t_o. Ce calcul s'effectue ici dans le repère Rto.

On a bien sûr $\overrightarrow{OiO'} = \overrightarrow{OO'} - \overrightarrow{OOi}$, ce qui s'écrit matriciellement

$$\overrightarrow{OiO'} = P_{\,Rto\text{-}Rinst} \begin{bmatrix} X'_o - X_o \\ Y'_o - Y_o \\ Z'_o - Z_o \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{oi} \\ Y_{oi} \\ Z_{oi} \end{bmatrix}$$

Comme on l'a vu au paragraphe 5.1, $P_{\,Rto\text{-}Rinst}$ est la transposée de la matrice $P_{1\,Rinst\text{-}Rto}$. Par ailleurs, il est possible de considérer que X_{oi} est nul, car ce terme n'a qu'une faible influence comparativement à Y_{oi} et Z_{oi}.

3) Par normalisation de $\overrightarrow{OiO'}$ (relations (II-31) et (II-32)), on obtient le vecteur réfléchi idéal $\overrightarrow{R_{ti}}$ à l'instant t_o, où celui-ci doit en effet diriger l'axe OiO'.

4) On détermine alors les cosinus directeurs dans Rto du vecteur $\vec{N}_{oi}$ normal au module réflecteur par la relation vectorielle suivante, déduite de la loi de Descartes:

$$\vec{N}_{oi} = \frac{\vec{S}_{to} + \vec{R}_{ti}}{\sqrt{2(1+\vec{S}_{to}\ \vec{R}_{ti})}}$$

les composantes de $\vec{S}_{to}$ ayant préalablement été exprimées dans le repère Rto par application de la matrice de passage $P_{\ Rto-Rinst}$.

5) A partir des cosinus directeurs de $\vec{N}_{oi}$ dans Rto, on calcule directement la matrice $P_{1\ Ro-Roi}$ à tout instant, à l'aide du sous-programme HMAT, puisque là aussi les axes OiYoi des modules restent, par construction, parallèles au plan OXoYo solidaire de l'héliostat. On a alors, comme dans le cas d'un héliostat sphérique :

$$P_{\ Rri-Roi} = P_{2\ Rri-Ro} \times P_{1\ Ro-Roi} \qquad \text{(II-36)}$$

à cette différence près que le calcul de la matrice $P_{1\ Ro-Roi}$ est ici plus géométrique qu'analytique.

On sait que l'héliostat CETHEL III bis est en principe toujours réglé sur son axe. Mais l'expérience consistant à analyser ses performances énergétiques pour diverses configurations soleil-héliostat, dans le cas d'un éventuel réglage hors-axe, qui n'a pas été envisagé à l'origine, serait certainement d'un grand intérêt. C'est dans ce but que nous avons conçu cette variante à notre code de calcul principal.

5.3) Cas des héliostats plans

Nous nous sommes efforcés dans ce cas précis de simplifier notre procédure de calcul : d'abord parce qu'un héliostat plan est une surface réflectrice nettement moins complexe qu'un héliostat focalisant, et ensuite parce que certains paramètres géométriques (telles les coordonnées des points O et O' dans un repère fixe Rinst) restent inconnus, et qu'il faut alors procéder différemment. Néanmoins notre programme se prête tout à fait au calcul général de répartitions de densité de flux réfléchies par un héliostat plan, que l'on ait ou non introduit des défauts de réglage sur ses facettes.

5.3.1) Choix des repères

Ceux-ci sont au nombre de quatre (figure II-33) :

1)Rinst (OXinstYinstZinst) est un repère dont les axes sont liés à l'ensemble du champ d'héliostats de la manière suivante : l'axe OXinst est dirigé suivant la direction idéale des rayons réfléchis par un héliostat, c'est-à-dire, dans le cas qui nous intéresse, suivant une direction horizontale Nord-Sud que l'on repère par le vecteur cible $\vec{R_O}$. L'axe OYinst est dirigé vers l'Est, et est lui aussi contenu dans un plan horizontal. Enfin l'axe OZinst repère la verticale du lieu. Pour un point d'observation M'_O situé en face de l'héliostat (fig.II-33), on fait glisser l'origine O du repère Rinst sur la surface réflectrice, jusqu'à ce que la droite OM'_O soit confondue avec l'axe OXinst. Dans ces conditions, les paramètres qui permettent de positionner l'héliostat par rapport au plan récepteur se réduisent à la seule distance $D = ||\vec{OM'_O}||$ que l'on déterminera par une correspondance géométrique très simple entre le diamètre apparent du soleil et les angles apparents des facettes réflectrices vues du point M'_O.

De plus, on suppose que le plan récepteur (P') est normal aux rayons réfléchis par l'héliostat, et donc à $\vec{R_O}$. (M'_OXinstYinstZinst) constitue donc ici le repère R' lié au plan récepteur, et dont les axes sont confondus avec ceux de Rinst. Pour les calculs des répartitions de densité de flux, nous considérerons des points M' de coordonnées (D,Y',Z') dans Rinst, ou (0,Y',Z') dans R'. L'inclinaison du plan récepteur par rapport à sa position initiale peut par ailleurs être introduite de manière simple, en s'inspirant du cas de l'héliostat focalisant, traité au paragraphe 5.2. Enfin, O étant le plus souvent le point visé par le système d'observation installé en M'_O, Rinst est également le repère lié à l'axe de visée du système.

2)Ro (OXoYoZo) est le repère lié à l'héliostat plan. Son axe OXo est dirigé par $\vec{N_O}$, vecteur unitaire normal à l'héliostat dont les cosinus directeurs sont notés (α_O, β_O, γ_O) dans Rinst. Comme dans le cas de l'héliostat focalisant (paragraphe 5.2.1), la monture altazimutale impose que l'axe OYo appartienne au plan horizontal OXinstYinst. De plus, si $\vec{S_O}$ est un vecteur unitaire pointé sur le centre du disque solaire, l'asservissement de l'héliostat sur le soleil implique que :

$$\vec{R_o} = 2(\vec{S_o}\vec{N_o})\ \vec{N_o} - \vec{S_o}$$

en permanence (relation (II-25)). Par contre, il n'y a pas lieu de se préoccuper ici de la position réelle du centre de rotation de l'héliostat, ce qui simplifiera grandement la procédure de calcul. Enfin, le centre Oi d'une facette réflectrice sera repéré par ses coordonnées $(0, Y_{oi}, Z_{oi})$ dans Ro.

3)<u>Roi</u> (OiXoYoZo) est le repère lié à la facette réflectrice considérée sur l'héliostat. Il ne diffère de Ro que d'une translation suivant le vecteur $\vec{OOi}$. Les coordonnées dans Roi d'un point P quelconque de la surface réflectrice seront notées $(0, Y_p, Z_p)$, l'héliostat étant a priori équipé de facettes planes.

4)<u>Rri</u> (OiXriYriZri) est le repère de calcul. Son axe OiXri est aligné suivant la direction OiO' repérée par le vecteur unitaire $\vec{R_i}$, dont les cosinus directeurs sont notés $(\alpha_{ri}, \beta_{ri}, \gamma_{ri})$ dans Rinst. $\vec{R_i}$ n'est jamais confondu avec $\vec{R_o}$, hormis le cas où le point O est situé au centre de la facette considérée. Enfin l'axe OiYri sera bien sûr choisi dans un plan horizontal.

Il nous faut maintenant déterminer les deux matrices de passage dont nous aurons besoin.

<u>5.3.2) Matrices de passage</u>

Nous cherchons d'abord les cosinus directeurs du vecteur $\vec{N_o}$ dans Rinst, notés $(\alpha_o, \beta_o, \gamma_o)$. $\vec{N_o}$ est lié à $\vec{S_o}$ et $\vec{R_o}$ par la relation classique :

$$\vec{N_o} = \frac{\vec{S_o} + \vec{R_o}}{\sqrt{2(1 + \vec{S_o}\ \vec{R_o})}} \qquad \text{(II-37)}$$

avec, dans le repère Rinst :

$$\vec{R_o} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{et } \vec{S_o} = \begin{bmatrix} \alpha_s \\ \beta_s \\ \gamma_s \end{bmatrix}$$

où α_s, β_s et γ_s sont donnés par la relation (II-7). La relation (II-37) suffit donc à déterminer précisément α_o, β_o et γ_o : ceux-ci permettent alors de calculer la matrice de passage de Rinst dans Ro, par la relation (II-24), à l'aide du sous-programme HMAT, et cette

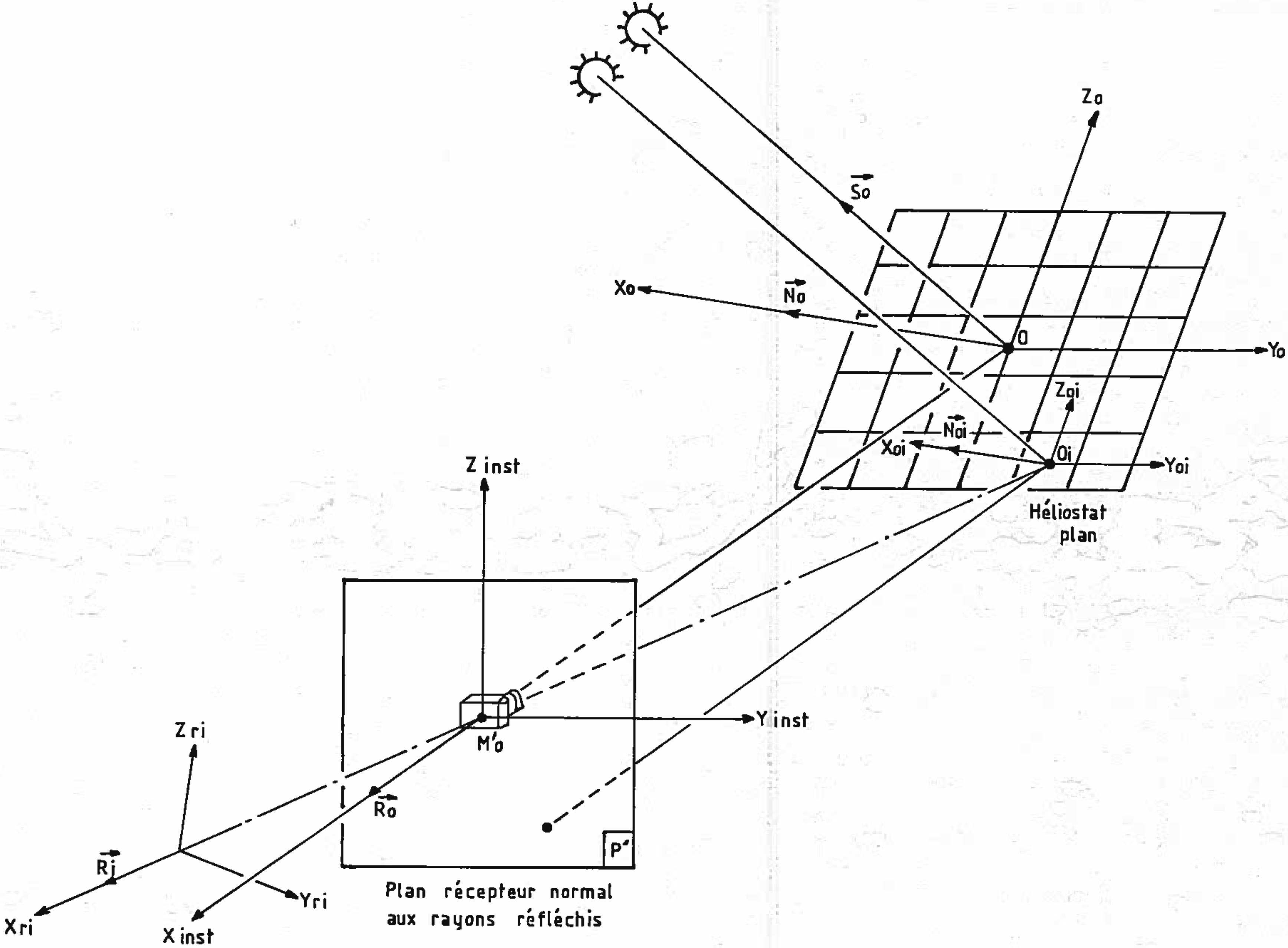


fig II-33 : Repères associés à l'héliostat plan et au plan récepteur.

matrice est notée P_1 $_{Rinst-Ro}$.

Les cosinus directeurs $(\alpha_{ri}, \beta_{ri}, \gamma_{ri})$ de $\overrightarrow{R_i}$ dans Rinst s'obtiennent ensuite par les relations (II-31) et (II-32), avec :

$$\overrightarrow{OiM_o'} = \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - P_{1\ Rinst\ -\ Ro} \begin{bmatrix} 0 \\ Y_{oi} \\ Z_{oi} \end{bmatrix}$$

ce qui est une forme simplifiée de la relation matricielle (II-33). Alors, les matrices de passage qui nous intéressent se calculent facilement à partir de nos deux sous-programmes utilitaires :

1) La matrice de passage du repère de calcul Rri au repère Rinst, qui est ici lié au plan récepteur, s'obtient par transposition de la matrice :

$P_{1\ Rinst-Rri}$

obtenue grâce aux cosinus directeurs $(\alpha_{ri}, \beta_{ri}, \gamma_{ri})$ du vecteur $\overrightarrow{R_i}$ (sous-programme HMAT).

2) La matrice de passage du repère de calcul Rri au repère lié à la facette Roi s'obtient directement par la relation (II-21) appliquée à $(\alpha_{ri}, \beta_{ri}, \gamma_{ri})$ et $(\alpha_o, \beta_o, \gamma_o)$, au moyen du sous-programme HIMAT. On la note :

$P_{2\ Rri-Roi}$

Ainsi qu'on peut le constater, nous n'avons pas eu besoin d'effectuer ici de compositions de matrices.

5.4) Cas du concentrateur paraboloïdal

5.4.1) Choix des repères

Nous retrouvons ici (figure II-34) certains des repères qui ont été utilisés dans le cas de l'héliostat focalisant. Toutefois le cas du concentrateur paraboloïdal (et d'une manière générale, de tout concentrateur fixe) est relativement plus simple à traiter. On distingue cinq repères orthonormés différents :

1)Rinst (SXinstYinstZinst) est le repère lié au concentrateur. S est le sommet du paraboloïde, dont SXinst est l'axe de révolution : celui-ci est orienté suivant une direction horizontale Sud-Nord. SYinst est également un axe horizontal dirigé vers

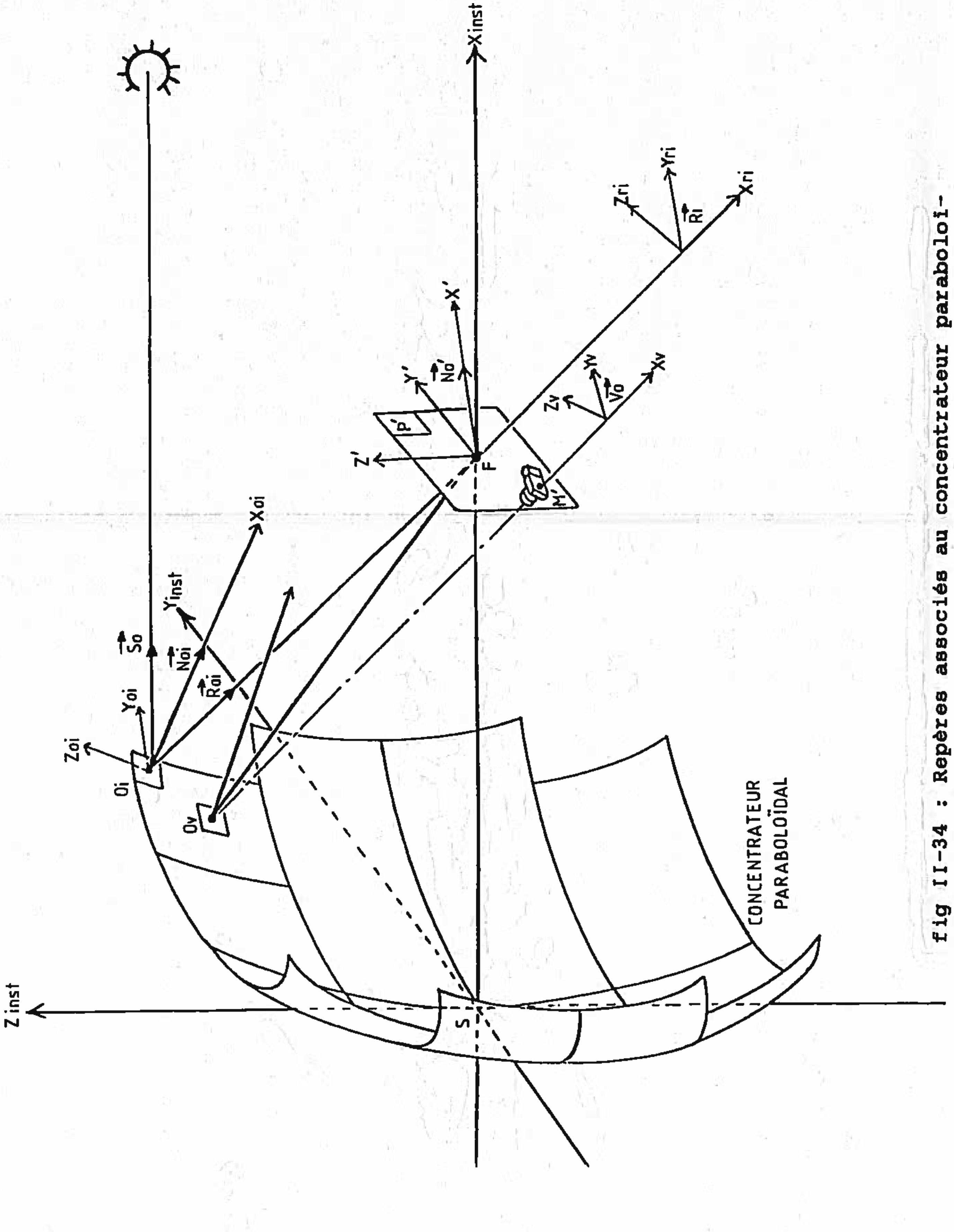


fig II-34 : Repères associés au concentrateur paraboloï-dal et au plan récepteur.

l'Ouest, tandis que SZinst est aligné suivant la verticale du point S. Les coordonnées du foyer F du concentrateur sont notées (f,0,0) dans Rinst, f étant la focale du paraboloide. Le centre Oi d'une facette réflectrice est repéré par ses coordonnées (X_{oi}, Y_{oi}, Z_{oi}) dans Rinst, avec :

$$X_{oi} = g(Y_{oi}, Z_{oi})$$

où g est la fonction relief du concentrateur définie par la relation (II-15). Le plan récepteur (P') est ici lié à un repère R' dont l'origine est le foyer F de l'installation (voir plus loin la définition de R'). Le vecteur soleil $\vec{S_o}$ est en principe parallèle à l'axe SXinst, puisque l'on observe, en tout point du concentrateur, une image fixe du disque solaire réfléchie par le champ d'héliostats. Les cosinus directeurs de $\vec{S_o}$ devraient donc s'écrire (1,0,0) dans Rinst, mais en pratique on se servira de ce vecteur pour introduire d'éventuels défauts de pointage des héliostats plans.

2)<u>R'</u> (FX'Y'Z') est le repère lié au plan récepteur (P'). Tout ce qui a été écrit à son sujet dans le paragraphe 5.2.1 reste parfaitement valable dans le cas du concentrateur paraboloïdal. R' est ici rapporté au point focal F de l'installation : cela rend les calculs plus commodes sans rien enlever à leur généralité.

3)<u>Roi</u> (OiXoiYoiZoi) est le repère lié à la facette réflectrice considérée. L'axe OiXoi est dirigé par un vecteur unitaire $\vec{N_{oi}}$ normal à la facette, dont les cosinus directeurs s'expriment (α_{oi}, β_{oi}, γ_{oi}) dans Rinst. Les axes OiYoi et OiZoi sont parallèles aux directions définies par les contours carrés ou rectangulaires des facettes. De plus, l'axe OiYoi est parallèle au plan horizontal SXinstYinst par construction. Les coordonnées dans Roi d'un point quelconque P de la surface réflectrice seront notées (X_p, Y_p, Z_p), avec :

$$X_p = f(Y_p, Z_p)$$

où f est une des deux fonctions caractéristiques choisies pour représenter au mieux la surface d'une facette réflectrice déformée sous contrainte mécanique (voir les relations (II-17) et (II-19)).

4)<u>Rri</u> (OiXriYriZri) est le repère de calcul. Son axe OiXri est dirigé suivant la direction OiF repérée par le vecteur unitaire $\vec{R_i}$, dont les cosinus directeurs dans Rinst sont notés (α_{ri}, β_{ri}, γ_{ri}). La principale différence avec le cas de l'héliostat focalisant réside en fait ici : si les facettes du concentrateur sont parfaitement réglées en orientation, $\vec{R_i}$ est confondu avec $\vec{R_{oi}}$, qui est le vecteur unitaire repérant la direction du rayon principal réfléchi en Oi. Dans tous les cas on peut écrire la relation de Descartes liant $\vec{R}_{oi}$ à $\vec{S}_o$ et $\vec{N}_{oi}$:

$$\vec{R}_i = \vec{R}_{oi} - 2(\vec{S}_o\,\vec{N}_{oi})\,\vec{N}_{oi} - \vec{S}_o$$

Enfin l'axe OiYri de Rri sera bien sûr choisi dans un plan horizontal.

5)Rv(OvXvYvZv) est le repère lié à l'axe de visée. Dans le cas où l'on observe en effet un groupe de facettes, par exemple un panneau entier du concentrateur, il sera nécessaire de choisir l'une d'entre elles pour définir l'axe de visée. On suppose que le système d'observation installé en M' vise le centre Ov d'une facette particulière. L'axe OvXv est donc confondu avec la droite OvM' qui est dirigée par le vecteur $\vec{V}_o$. Pour le reste, on se reportera à la définition de Rv donnée dans le paragraphe 5.2.1.

Comme dans le cas des héliostats, nous devons à présent calculer deux matrices de passage.

5.4.2) Matrices de passage

Il nous faut déterminer $(\alpha_{oi}, \beta_{oi}, \gamma_{oi})$ et $(\alpha_{ri}, \beta_{ri}, \gamma_{ri})$ qui sont respectivement les cosinus directeurs des vecteurs $\vec{N}_{oi}$ et $\vec{R}_i$ dans Rinst. $\vec{N}_{oi}$ est en tout point Oi la normale au paraboloïde de révolution dont le relief est défini par la relation (II-15). On peut donc écrire :

$$\vec{N}_{oi} = \frac{\overrightarrow{\text{grad}}\,[X_{oi} - g(Y_{oi}, Z_{oi})]}{||\overrightarrow{\text{grad}}[X_{oi}-g(Y_{oi},Z_{oi})]||}$$

et en déduire l'expression des cosinus directeurs de $\vec{N}_{oi}$ dans Rinst par la relation matricielle :

$$\vec{N}_{oi} = \begin{bmatrix} \alpha_{oi} \\ \beta_{oi} \\ \gamma_{oi} \end{bmatrix} = \frac{1}{D_g} \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{\partial g}{\partial Y}(Y_{oi},Z_{oi}) \\ -\frac{\partial g}{\partial Z}(Y_{oi},Z_{oi}) \end{bmatrix}$$

avec $D_g = \sqrt{1 + \frac{\partial g}{\partial Y}^2(Y_{oi},Z_{oi}) + \frac{\partial g}{\partial Z}^2(Y_{oi},Z_{oi})}$

Il s'agit là de relations absolument identiques à celles qui avaient été obtenues dans le cas de l'héliostat focalisant sphérique (paragraphe 5.2.5.1), les seules différences étant que $g(Y_{oi},Z_{oi})$,

$\partial g/\partial Y(Y_{oi},Z_{oi})$ et $\partial g/\partial Z(Y_{oi},Z_{oi})$ sont ici définies par les relations (II-15) et (II-16), d'une part, et que le calcul s'effectue directement dans le repère Rinst, d'autre part. Les composantes de $\vec{R_i}$ dans Rinst sont quant à elles déterminées par la relation :

$$\vec{R_i} = \begin{bmatrix} \alpha_{ri} \\ \beta_{ri} \\ \gamma_{ri} \end{bmatrix} = \frac{1}{D_i} \begin{bmatrix} f-g(Y_{oi},Z_{oi}) \\ -Y_{oi} \\ -Z_{oi} \end{bmatrix}$$

avec $D_i = ||\vec{OiP}|| = \sqrt{[f-g(Y_{oi},Z_{oi})]^2 + Y_{oi}^2 + Z_{oi}^2}$

On rappelle que Y_{oi} et Z_{oi} ont préalablement été déterminés pour toutes les facettes du concentrateur (paragraphe 4.2.3).

D'autre part, les cosinus directeurs $(\alpha'_o, \beta'_o, \gamma'_o)$ du vecteur $\vec{N'_o}$ normal au plan récepteur sont exprimés dans la relation (II-26). Le calcul des matrices de passage s'effectue alors grâce au sous-programme utilitaire HIMAT :

1) L'application de la relation (II-21) à $(\alpha_{ri}, \beta_{ri}, \gamma_{ri})$ et $(\alpha'_o, \beta'_o, \gamma'_o)$ permet d'obtenir la matrice de passage de Rri à R', notée :

$$P_2\ Rri\text{-}R'$$

2) L'application de cette même relation à $(\alpha_{ri}, \beta_{ri}, \gamma_{ri})$ et $(\alpha_{oi}, \beta_{oi}, \gamma_{oi})$ permet d'obtenir la matrice de passage de Rri à Roi, notée :

$$P_2\ Rri\text{-}Roi$$

Toutes les matrices de passage nécessaires aux calculs ont donc été exprimées. Mais certaines d'entre elles vont se trouver modifiées par les défauts de réglage que nous allons maintenant introduire.

6) INTRODUCTION DES DEFAUTS DE REGLAGE

On considère un repère Roi lié à une facette (ou module) de centre Oi appartenant à l'un des trois types de surfaces réflectrices que nous venons d'étudier. Nous avons jusqu'ici supposé que le vecteur $\vec{N_{oi}}$ normal à la facette, qui dirige l'axe OiXoi de Roi, avait une orientation conforme à sa définition théorique : cela revient à dire que les surfaces réflectrices sont exemptes de défauts de réglage. En réalité, il n'en est rien et la normale à la facette réflectrice présentera généralement une orientation différente de celle qui est souhaitée; on repèrera sa nouvelle direction par le vecteur unitaire $\overrightarrow{N_{\delta oi}}$, distinct de $\overrightarrow{N_{oi}}$ après assemblage de la surface réflectrice. A la facette considérée peuvent donc être associés en fait deux repères, dont l'un, Roi (associé à $\overrightarrow{N_{oi}}$), caractérise son orientation idéale, et l'autre, Rδoi (associé à $\overrightarrow{N_{\delta oi}}$), son orientation réelle. Les angles qui permettent de positionner $\overrightarrow{N_{\delta oi}}$ par rapport à $\overrightarrow{N_{oi}}$ sont représentés sur la figure II-35 : on distingue essentiellementr a_r et h_r, erreurs angulaires en azimut et en hauteur, et ϵ_r et ϕ_r, angles radial et polaire. Il existe évidemment des relations simples entre ces deux systèmes de coordonnées angulaires, qui peuvent indifféremment être utilisés pour la caractérisation individuelle des défauts de réglage. Toutefois ils ne sont pas équivalents en termes de distributions d'erreur ; il y a en effet deux manières de raisonner bien différentes :

On peut d'abord considérer que la distribution d'erreur sur ϵ_r suit une loi de densité de probabilité $p(\epsilon_r)$. En pratique les lois normales sont les plus couramment utilisées. ϕ_r est alors une variable aléatoire uniformément répartie sur l'intervalle $[0,2\pi[$. Une telle approche est tentante car elle ne nécessite la détermination que d'un seul paramètre d'erreur, ϵ_r, et paraît bien adaptée à la modélisation des défauts d'une installation où la méthode de réglage d'origine portait sur les rayons réfléchis par la facette (superposition d'images, méthodes laser, etc..). Toutefois, une telle loi $p(\epsilon_r)$ ne serait guère facile à introduire dans des modèles de soleils fictifs ou de vue en trou d'épingle (voir le chapitre I). De plus, si l'on peut à la rigueur admettre que le réglage en orientation des facettes du concentrateur du four de 1000 kW d'Odeillo portait sur les rayons réfléchis par les facettes (et il faut alors également admettre que le réglage en courbure ne modifiait pas l'orientation globale de la facette réflectrice, ce qui n'est pas prouvé), il n'en est pas de même pour les héliostats plans et focalisants. C'est pourquoi nous avons finalement préféré la solution suivante.

Celle-ci consiste à faire l'hypothèse que les distributions

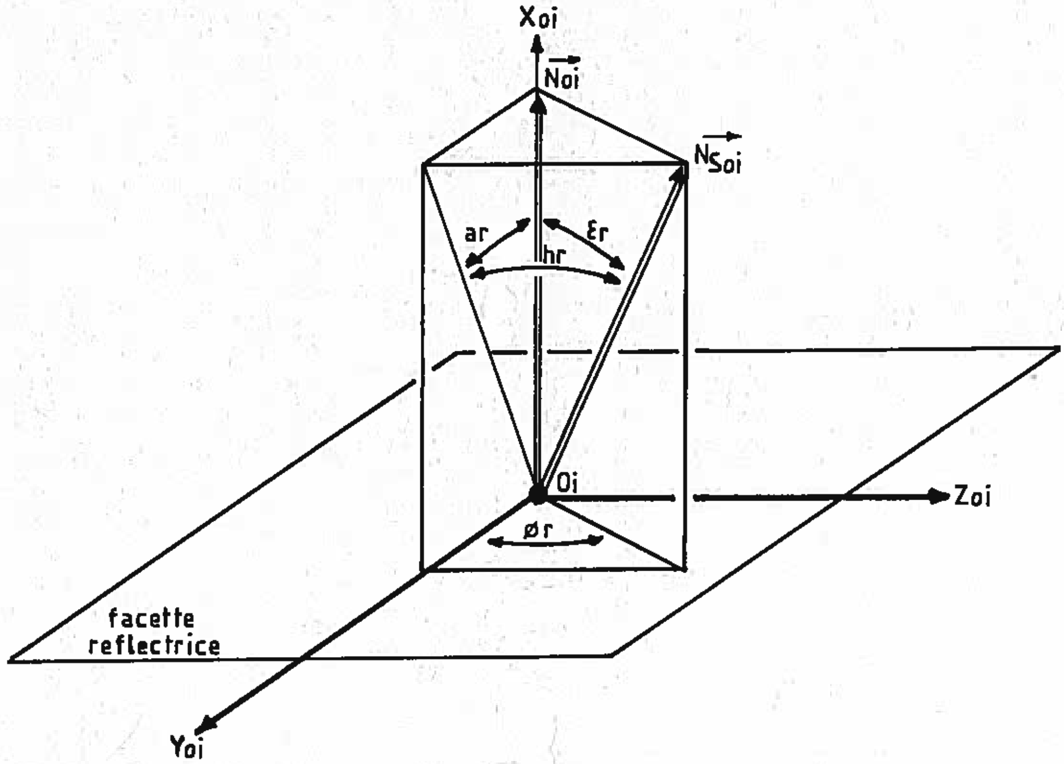


fig II-35 : Introduction d'un défaut de réglage sur une facette réflectrice. Celui-ci peut être caractérisé par les angles (a_r,h_r) ou (ϵ_r,ϕ_r).

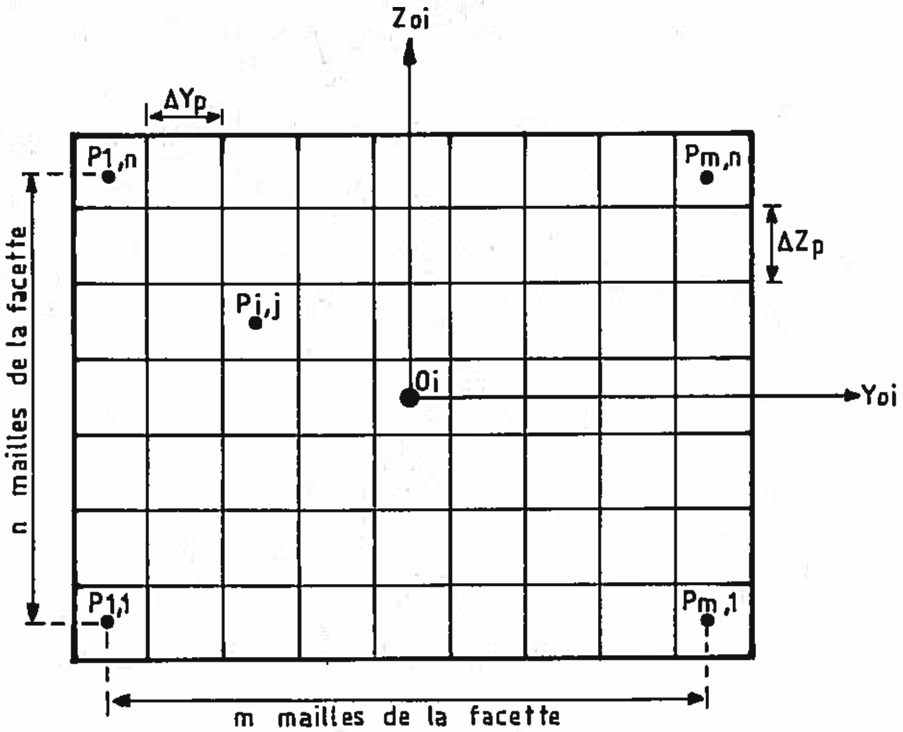


fig II-36 : Découpage de la facette réflectrice en éléments réflecteurs et positions des noeuds du maillage Pi,j. Pour que le centre Oi de la facette corresponde également au centre d'une maille, m et n doivent être impairs.

d'erreur sur a_r et h_r sont indépendantes et suivent des lois de probabilité respectivement notées $pa(a_r)$ et $ph(h_r)$. Ici aussi les lois normales ont été les plus employées; Cette hypothèse nous paraît beaucoup plus adaptée aux cas des héliostats plans d'Odeillo et des héliostats focalisants de la centrale THEMIS, qui ont respectivement été réglés au théodolite et à l'aide d'un instrument équipé de niveaux à bulle; il s'agit là de deux méthodes de réglage classiques qui ne portent pas sur les rayons réfléchis par les facettes.

Quoi qu'il en soit, ce sont les résultats des mesures des défauts de réglage eux-mêmes qui trancheront : nous ne rejetons pas a priori une distribution d'erreur du type $p(\epsilon_r)$, surtout s'il apparaissait que a_r et h_r ne sont pas indépendantes.

Dans le cas où $\overrightarrow{N_{\delta oi}}$ est repéré par les angles a_r et h_r dans Roi, la matrice de passage de Roi à Rδoi est de type P_1. Elle s'obtient donc en appliquant la relation (II-24), et en pratique, le sous-programme HMAT, aux cosinus directeurs $(\alpha_r, \beta_r, \gamma_r)$ de $\overrightarrow{N_{\delta oi}}$ dans Roi. Ceux-ci s'expriment bien sûr en fonction des angles a_r et h_r :

$$\overrightarrow{N_{\delta oi}} = \left[\begin{array}{l} \cos a_r \cos h_r = \alpha_r \\ \sin a_r \cos h_r = \beta_r \\ \sin h_r = \gamma_r \end{array} \right. \qquad \text{(II-38)}$$

et la matrice de passage de Roi à Rδoi est notée $P_{1\ Roi-R\delta oi}$.

L'introduction des erreurs de réglage sur les héliostats focalisants, les héliostats plans, et les concentrateurs fixes consiste alors à modifier les expressions des matrices de passage des repères de travail Rri aux repères liés aux facettes réflectrices Roi, données dans les paragraphes 5.2.5.1, 5.2.5.2, 5.3.2 et 5.4.2. Si $P_{Rri-Roi}$ est l'expression générale d'une de ces matrices, celle-ci doit être remplacée par $P_{Rri-R\delta oi}$, avec :

$$P_{Rri-R\delta oi} = P_{Rri-Roi} \times P_{1\ Roi-R\delta oi} \qquad \text{(II-39)}$$

La prise en compte des défauts de réglage dans nos codes de calcul consiste donc à appliquer systématiquement les relations (II-38) et (II-39); cela revient, pour chacune des facettes réflectrices considérées, à introduire ses erreurs de réglage en azimut et en hauteur a_r et h_r, dont il y a en général trois modes de sélection possibles :

1) L'utilisateur du programme choisit lui-même les valeurs de a_r et h_r pour chaque facette.

2) a_r et h_r sont tirées aléatoirement par des sous-programmes utilitaires du calculateur. On peut ainsi choisir des lois uniformes, normales, etc...

3)a_r et h_r sont déterminées à partir de répartitions de luminance expérimentales : cela fera l'objet du chapitre III.

Maintenant que les matrices de passage des repères Rri aux repères Rsoi liés aux facettes réflectrices ont pris leur forme définitive, nous allons examiner rapidement la suite des calculs.

7)CONTRIBUTION D'ECLAIREMENT DU POINT P AU POINT M'

Nous allons expliciter ici les relations générales qui ont été données dans le paragraphe 2 de manière à les rendre aptes à être écrites dans un code de calcul. Pour cela nous nous servirons bien sûr des expressions des deux matrices de passage fondamentales que nous avons déterminées dans les deux paragraphes précédents, pour les trois types de surfaces réflectrices considérés. Ces deux matrices seront notées respectivement :

$$P_{Rri-Rsoi} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}$$

$$P_{Rri-R'} = \begin{bmatrix} p'_{11} & p'_{12} & p'_{13} \\ p'_{21} & p'_{22} & p'_{23} \\ p'_{31} & p'_{32} & p'_{33} \end{bmatrix}$$

7.1)Calcul du vecteur $\overrightarrow{PM'}$

Celui-ci s'effectue bien sûr dans Rri. Les coordonnées de P dans Rsoi sont notées (X_p, Y_p, Z_p) avec $X_p = f(Y_p, Z_p)$, et les coordonnées de M' dans R' sont (X', Y', Z'). On peut écrire $\overrightarrow{PM'}$ sous la forme :

$$\overrightarrow{PM'} = \overrightarrow{OiO'} + \overrightarrow{O'M'} - \overrightarrow{OiP} = D_i\overrightarrow{R_i} + \overrightarrow{O'M'} - \overrightarrow{OiP}$$

avec $D_i = ||\overrightarrow{OiO'}||$ conformément à la relation (II-32). L'expression matricielle de $\overrightarrow{PM'}$ dans Rri est alors :

$$\overrightarrow{PM'} = D_i \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + P_{Rri-R'} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} - P_{Rri-RSoi} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}$$

Et on en déduit les composantes du vecteur $\overrightarrow{PM'}$:

$$\overrightarrow{PM'} = \begin{cases} D_i + p'_{11}X' + p'_{12}Y' + p'_{13}Z' - p_{11}X_p - p_{12}Y_p - p_{13}Z_p \\ p'_{21}X' + p'_{22}Y' + p'_{23}Z' - p_{21}X_p - p_{22}Y_p - p_{23}Z_p \\ p'_{31}X' + p'_{32}Y' + p'_{33}Z' - p_{31}X_p - p_{32}Y_p - p_{33}Z_p \end{cases} \quad \text{(II-40)}$$

à partir desquelles il est facile de déterminer $||\overrightarrow{PM'}||$

7.2) Calcul de la normale $\overrightarrow{N_p}$ à la surface réflectrice

Ainsi qu'on l'a vu au paragraphe 2, $\overrightarrow{N_p}$ est un vecteur unitaire normal à la surface réflectrice en P; dans le repère RSoi celui-ci peut se mettre sous la forme générale :

$$\overrightarrow{N_p} = \frac{\overrightarrow{\text{grad}}[X_p - f(Y_p, Z_p)]}{||\overrightarrow{\text{grad}}[X_p - f(Y_p, Z_p)]||} \quad \text{(II-41)}$$

Les cosinus directeurs $(\alpha_p, \beta_p, \gamma_p)$ du vecteur $\overrightarrow{N_p}$ dans RSoi s'expriment alors :

$$\overrightarrow{N_p} = \begin{bmatrix} \alpha_p \\ \beta_p \\ \gamma_p \end{bmatrix} = \frac{1}{D_f} \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{\partial f}{\partial Y_p}(Y_p, Z_p) \\ -\frac{\partial f}{\partial Z_p}(Y_p, Z_p) \end{bmatrix} \quad \text{(II-42)}$$

avec $D_f = \sqrt{1 + \frac{\partial f^2}{\partial Y_p}(Y_p, Z_p) + \frac{\partial f^2}{\partial Z_p}(Y_p, Z_p)}$

Trois cas se présentent suivant les types de facettes réflectrices étudiés :

1) cas d'un module d'héliostat CETHEL III bis : les fonctions $f(Y_p, Z_p)$, $\partial f/\partial Y_p(Y_p, Z_p)$, et $\partial f/\partial Z_p(Y_p, Z_p)$ sont définies par les relations (II-13) et (II-14).

2)cas d'un concentrateur fixe équipé de facettes sphériques : f, $\partial f/\partial Y_p$ et $\partial f/\partial Z_p$ sont définies par les relations (II-17) et (II-18).

3)cas d'un concentrateur fixe équipé de facettes localement paraboloidales : f, $\partial f/\partial Y_p$ et $\partial f/\partial Z_p$ sont définies par les relations (II-19) et (II-20).

Bien entendu, dans le cas d'un héliostat plan équipé de facettes planes, les fonctions f, $\partial f/\partial Y_p$ et $\partial f/\partial Z_p$ sont identiquement nulles, et $\vec{N_p}$ est confondu avec $\vec{N_{soi}}$.

7.3) Calcul du vecteur $\vec{R_{po}}$

Ce calcul s'effectue dans le repère Rsoi d'après l'expression vectorielle de la loi de Descartes donnée par la relation (II-5). Il est nécessaire de déterminer au préalable les composantes du vecteur soleil $\vec{S_o}$ dans Rsoi : pour cela, il faut connaître la matrice de passage du repère Rinst, dans lequel est exprimé $\vec{S_o}$, au repère Rsoi lié à la facette réflectrice. Cette matrice, notée $P_{\text{Rinst-Rsoi}}$ s'obtient de deux manières différentes, suivant que l'on a affaire à un héliostat focalisant, ou à l'un des deux autres types de surfaces réflectrices. On a :

$$P_{\text{Rinst-Rsoi}} = P_{1\,\text{Rinst-Ro}} \times P_{1\,\text{Ro-Roi}} \times P_{1\,\text{Roi-Rsoi}}$$

dans le cas de l'héliostat focalisant, et :

$$P_{\text{Rinst-Rsoi}} = P_{1\,\text{Rinst-Roi}} \times P_{1\,\text{Roi-Rsoi}}$$

dans le cas de l'héliostat plan et du concentrateur fixe. Ces deux expressions de $P_{\text{Rinst-Rsoi}}$ sont déduites de raisonnements similaires à ceux qui ont été exposés dans les paragraphes 5 et 6.

La séquence de calcul qui permet de déterminer l'expression du vecteur $\vec{R_{po}}$ dans Rri est donc la suivante :

1) $P_{\text{Rinst-Rsoi}}$ est calculée par l'une des deux relations précédentes.

2) Les cosinus directeurs de $\vec{S_o}$ dans Rsoi s'obtiennent par application de la transposée de la matrice précédente à (α_s, β_s, γ_s), qui sont les cosinus directeurs de $\vec{S_o}$ dans Rinst.

3) $\vec{S_o}$ et $\vec{N_p}$ étant alors tous deux exprimés dans Rsoi, $\vec{R_{po}}$ se calcule par la relation (II-5).

4) Par application de la matrice de passage $P_{\text{Rri-Rsoi}}$, on obtient enfin les cosinus directeurs de $\vec{R_{po}}$ dans le repère de calcul Rri.

7.4) Contribution d'éclairement en M'

On cherche à présent à déterminer la contribution d'éclairement en M' de la surface élémentaire dP centrée au point P. D'après la relation (II-6), celle-ci peut s'écrire :

$$dE(M') = R\, L(\epsilon) \frac{(\vec{N_p}\, \vec{PM'})(\vec{N_o'}\, \vec{PM'})}{||\vec{PM'}||^4}\, dP$$

$\vec{PM'}$ et $\vec{R_{po}}$ étant maintenant tous deux exprimés dans Rri, il est facile d'en déduire ϵ et $L(\epsilon)$ par les relations (II-4) et (II-10). Les autres termes qui interviennent dans l'expression de dE(M') s'obtiennent de la façon suivante :

1) l'application de la matrice de passage $P_{Rri-Rsoi}$ permet de déterminer les cosinus directeurs de $\vec{N_p}$ dans Rri. Le produit scalaire $\vec{N_p}\, \vec{PM'}$ se calcule alors sans difficulté.

2) les composantes de $\vec{N_o'}$ dans Rri sont $(p'_{11}, p'_{21}, p'_{31})$. Le produit scalaire $\vec{N_o'}\, \vec{PM'}$ se calcule lui aussi sans difficulté.

3) dP est défini par la relation générale :

$$dP = \sqrt{1 + \frac{\partial f^2}{\partial Y_p}(Y_p, Z_p) + \frac{\partial f^2}{\partial Z_p}(Y_p, Z_p)}\; dY_p\, dZ_p \qquad \text{(II-43)}$$

que l'on écrit en pratique : $dP = D_f\, \Delta Y_p\, \Delta Z_p$
où D_f a été explicité dans les relations (II-42), et ΔY_p et ΔZ_p sont les pas d'intégration du maillage de la facette réflectrice considérée (fig.II-36).

En faisant la somme des valeurs de dE(M') calculées pour tous les points $P_{i,j}$ du maillage d'une facette réflectrice, on arrive à l'éclairement formé en M' par l'ensemble de la facette. Il faut ensuite répéter ces opérations pour les facettes voisines, ce qui impose d'utiliser des repères Rri et Rsoi différents, dont la détermination (et les calculs des matrices de passage qui y sont attachés) devra avoir été préalablement effectuée. Les codes de calcul auxquels nous avons ainsi abouti doivent à présent paraître bien lourds. Toutefois, leur avantage est de n'admettre aucune approximation, à partir du moment où les caractéristiques géométriques des facettes réflectrices équipant les systèmes considérés, et en particulier leur relief, ont été précisément définies. Mais même ainsi la prise en compte de certains défauts de surface fréquents sur les grandes installations solaires reste difficile, comme nous aurons l'occasion de le voir.

8) VISUALISATION DES REPARTITIONS DE LUMINANCE

Nous décrivons ici le principe des codes de simulation graphique que nous avons développés pour la représentation des répartitions de luminance observables du point M'. Nous nous limiterons au cas de l'héliostat focalisant en précisant que les cas de l'héliostat plan et du concentrateur fixe sont tous deux moins complexes, même s'ils nécessitent parfois l'usage de repères différents.

Le système d'observation (généralement un appareil photographique) est disposé dans le plan récepteur (P'), au point M' de coordonnées (X', Y', Z') dans R'. L'axe de visée est supposé confondu avec la droite M'O : l'appareil photographique vise en fait le centre de l'héliostat (fig.II-37). Ainsi que nous l'avons vu au paragraphe 5.2.1, cet axe est dirigé par le vecteur $\vec{V_O}$ qui s'obtient par la relation :

$$\vec{V_O} = \frac{\vec{OM'}}{D_V} = \frac{\vec{OO'} + \vec{O'M'}}{D_V} \qquad \text{(II-44)}$$

où D_V est la distance de visée définie par : $D_V = ||\vec{OM'}||$ (II-45)

Le calcul de $\vec{OM'}$ dans Rinst nécessite la connaissance de la matrice de passage de Rinst à R' : celle-ci est de type P_1 et peut donc être calculée par le sous-programme utilitaire HMAT appliqué aux cosinus directeurs de $\vec{N'_O}$: ceux-ci sont définis par les relations (II-26). En notant cette matrice $P_{1\ Rinst \to R'}$ et en conservant les autres notations du paragraphe 5.2.1, on obtient l'expression des composantes de $\vec{OM'}$ dans Rinst :

$$\vec{OM'} = \begin{bmatrix} X'_O - X_O \\ Y'_O - Y_O \\ Z'_O - Z_O \end{bmatrix} + P_{1\ Rinst \to R'} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \qquad \text{(II-46)}$$

Les relations (II-44) à (II-46) permettent donc de déterminer précisément les cosinus directeurs $(\alpha_V, \beta_V, \gamma_V)$ de $\vec{V_O}$ dans Rinst.

On suppose que l'image enregistrée sur la pellicule de l'appareil photographique est, en réduction, la projection conique par rapport au point M' de la surface de l'héliostat sur le plan de visée OYvZv perpendiculaire à $\vec{V_O}$ (fig.II-37). Nous cherchons donc à déterminer, pour chaque point P de la surface réflectrice, le vecteur $\vec{OH}$ qui nous permettra de le replacer précisément sur la simulation graphique du cliché. Pour cela, nous avons besoin de deux

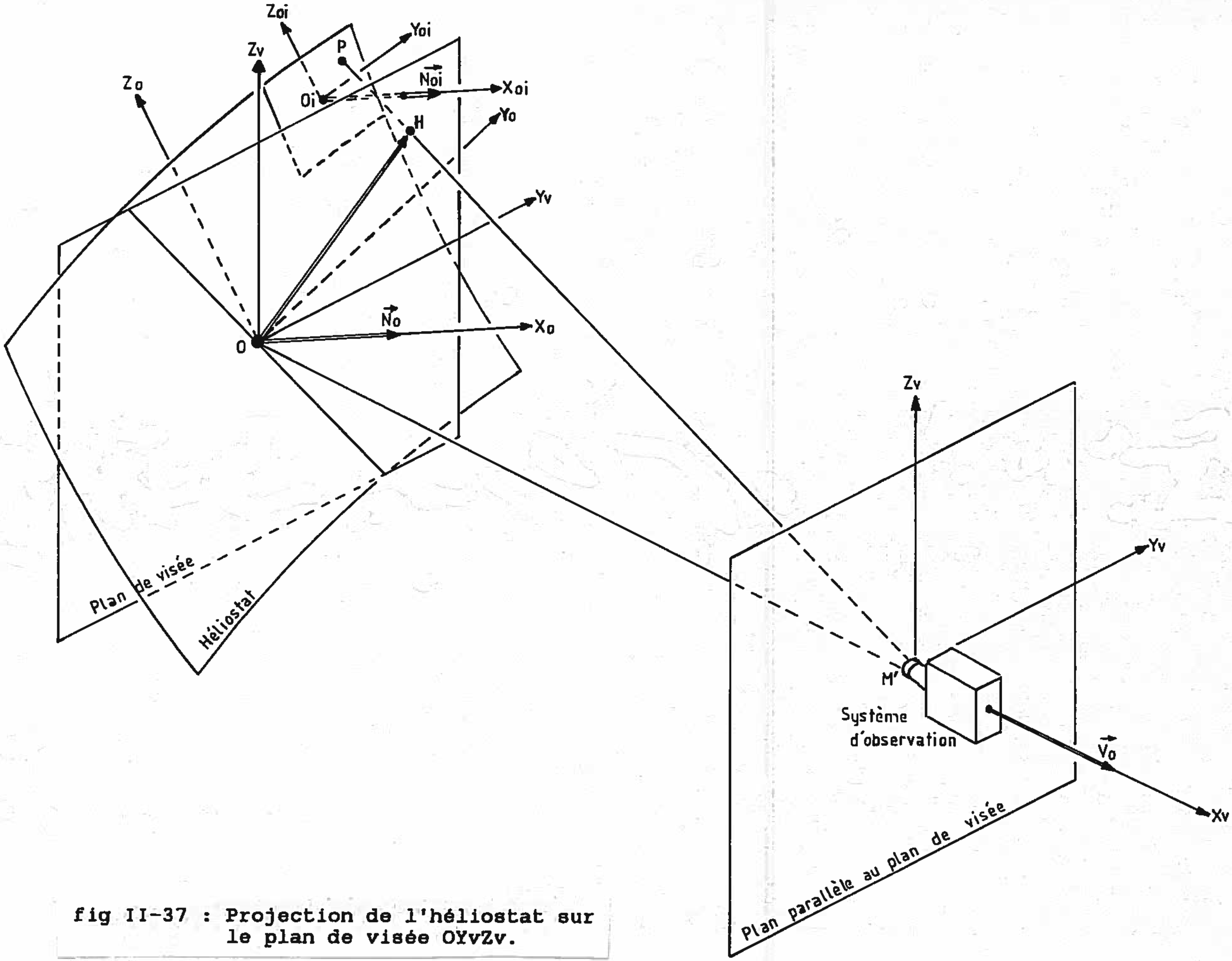


fig II-37 : Projection de l'héliostat sur le plan de visée OYvZv.

matrices, qui permettront de passer du repère Rv lié à l'axe de visée aux repères Ro et Rsoi respectivement liés à l'héliostat et au centre Oi du module réflecteur considéré. La matrice de passage de Rv dans Ro est de type P_2, et s'obtient donc par application directe de la relation (II-21) (sous-programme HIMAT) aux cosinus directeurs des vecteurs $\vec{V_o}$ et $\vec{N_o}$ dans Rinst. Nous la notons $P_{2\ Rv-Ro}$. La matrice de passage de Rv à Rsoi, quant à elle, s'obtient par composition de matrices :

$$P_{Rv-Rsoi} = P_{2\ Rv-Ro} \times P_{Ro-Rsoi} \qquad \text{(II-47)}$$

On rappelle que la détermination des matrices $P_{Ro-Rsoi}$ a fait l'objet des paragraphes 5.2.5 et 6 dans le cas de l'héliostat focalisant. Alors, suivant les notations du paragraphe 5.2.1, il est possible de calculer les coordonnées (X_{pv}, Y_{pv}, Z_{pv}) du vecteur $\vec{OP}$ dans Rv par la relation matricielle :

$$\vec{OP} = \vec{OOi} + \vec{OiP} = \begin{bmatrix} X_{pv} \\ Y_{pv} \\ Z_{pv} \end{bmatrix} = P_{2\ Rv-Ro} \begin{bmatrix} X_{oi} \\ Y_{oi} \\ Z_{oi} \end{bmatrix} + P_{Rv-Rsoi} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} \qquad \text{(II-48)}$$

Or, $\vec{OP}$ peut être lié à $\vec{OH}$ par la relation :

$$\vec{OH} = \vec{OM'} + \vec{M'H} = \vec{OM'} + \lambda\ \vec{M'P} = (1-\lambda)\ \vec{OM'} + \lambda\ \vec{OP}$$

où λ est tel que $\vec{OH}\ \vec{V_o} = 0$. Nous pouvons donc l'exprimer sous la forme :

$$\lambda = \frac{\vec{OM'}\ \vec{V_o}}{\vec{PM'}\ \vec{V_o}} = \frac{\vec{OM'}\ \vec{V_o}}{\vec{OM'}\ \vec{V_o} - \vec{OP}\ \vec{V_o}}$$

Comme d'autre part $\vec{OM'}\ \vec{V_o} = D_v$, on peut alors écrire :

$$\vec{OH} = D_v\ \vec{V_o} + \frac{D_v}{D_v - \vec{OP}\ \vec{V_o}}\ [\vec{OP} - D_v\ \vec{V_o}] \qquad \text{(II-49)}$$

d'où l'on déduit enfin les coordonnées (X_H, Y_H, Z_H) de $\vec{OH}$ dans Rv :

$$X_H = 0$$

$$Y_H = \frac{D_v\ Y_{pv}}{D_v - X_{pv}} \qquad \text{(II-50)}$$

$$Z_H = \frac{D_v\ Z_{pv}}{D_v - X_{pv}}$$

Celles-ci nous permettront de représenter l'ensemble de la surface réflectrice vue du point M', et ceci quelle que soit l'orientation de l'héliostat. Les relations (II-48) à (II-50) ont donc été regroupées dans un petit sous-programme de calcul utilitaire, appelé PROH, dont les paramètres d'entrée sont les coordonnées (X_{oi}, Y_{oi}, Z_{oi}) et (X_p, Y_p, Z_p) des points Oi et P, ainsi que les matrices $P_{2\ Rv-Ro}$ et $P_{\ Rv-Rsoi}$, et les paramètres de sortie sont Y_H et Z_H. L'application de ce sous-programme au cas des héliostats plans et des concentrateurs fixes ne nécessite qu'une légère modification des paramètres d'entrée, qui ne sera pas exposée ici.

Une fois que les coordonnées Y_H et Z_H ont été définies pour l'ensemble des points $P_{i,j}$ de la surface réflectrice considérée, et qu'on leur a associé les valeurs de l'angle ϵ (et les luminances $L(\epsilon)$ déduites de la relation (II-10)) correspondantes, deux modes de simulation graphique sont possibles,au gré de l'utilisateur : le premier est une représentation des luminances observées sur la surface réflectrice en fausses couleurs, rapide et facile à effectuer sur le calculateur Solar 16-40 du laboratoire. En pratique, nous avons plus souvent utilisé le deuxième mode qui consiste en une représentation en noir et blanc déduite des courbes iso-luminance (*) inscrites sur la surface réflectrice; celles-ci nous permettent en effet de réaliser des simulations graphiques plus proches de nos répartitions expérimentales de luminance, qui, ainsi qu'on le verra dans les chapitres suivants, consistent essentiellement en des séries de clichés photographiques noir et blanc.

9) ORGANIGRAMMES

Il n'était pas envisageable de reproduire ici tous les organigrammes des nombreux codes de calcul qui ont été réalisés à partir des principes exposés dans ce chapitre, d'une part parce que nous avons trois types de surfaces réflectrices fort différentes à étudier (héliostats focalisants, héliostats plans, et concentrateurs fixes), et d'autre part, parce que les séquences de calcul des facteurs de concentration C(M') ont été systématiquement séparées des codes de simulation graphique.

(*) La détermination de celles-ci a nécessité la mise au point d'un sous- programme de calcul adapté, qui n'était pas disponible à l'époque sur notre calculateur. Néanmoins, il n'y a pas lieu de revenir ici sur son principe, qui est à la fois très classique et très simplifié.

De plus, on a pu constater que plusieurs variantes sont possibles pour un même programme : cas d'héliostats focalisants sphériques ou réglés en dehors de leurs axes, introduction individuelle ou aléatoire des défauts de réglage, ou détermination directe de ceux-ci à partir de clichés, cas du concentrateur fixe d'Odeillo considéré dans sa totalité ou limité à un sous-ensemble de panneaux, etc...Enfin, et bien que ce ne soit pas leur but principal, nous avons également adapté nos codes de calcul à la détermination de cartes de flux réfléchies par des héliostats plans ou focalisants, ou à l'évaluation des variations du facteur de concentration C(M') en un point donné, en fonction de l'heure de la journée, pour certaines journées types (héliostats focalisants). Il fallait donc faire un choix et l'on trouvera finalement dans les pages qui suivent:

1) L'organigramme du code de calcul de C(M') dans le cas d'un héliostat focalisant CETHEL III bis.

2) L'organigramme du code de calcul de C(M') dans le cas d'un héliostat plan, encore qu'il soit abusif de parler alors de concentration : il s'agit plutôt d'un facteur de réflexion apparent.

3) L'organigramme du code de calcul de C(M') formé par un ensemble de panneaux réflecteurs du concentrateur paraboloïdal du four solaire de 1000 kW d'Odeillo.

4) L'organigramme du code de simulation graphique des répartitions de luminance observables sur ces panneaux; il s'agit du traitement graphique associé au code de calcul précédent.

Nous nous sommes efforcés d'indiquer, chaque fois que c'était possible, les principales variantes en les représentant par des aiguillages.

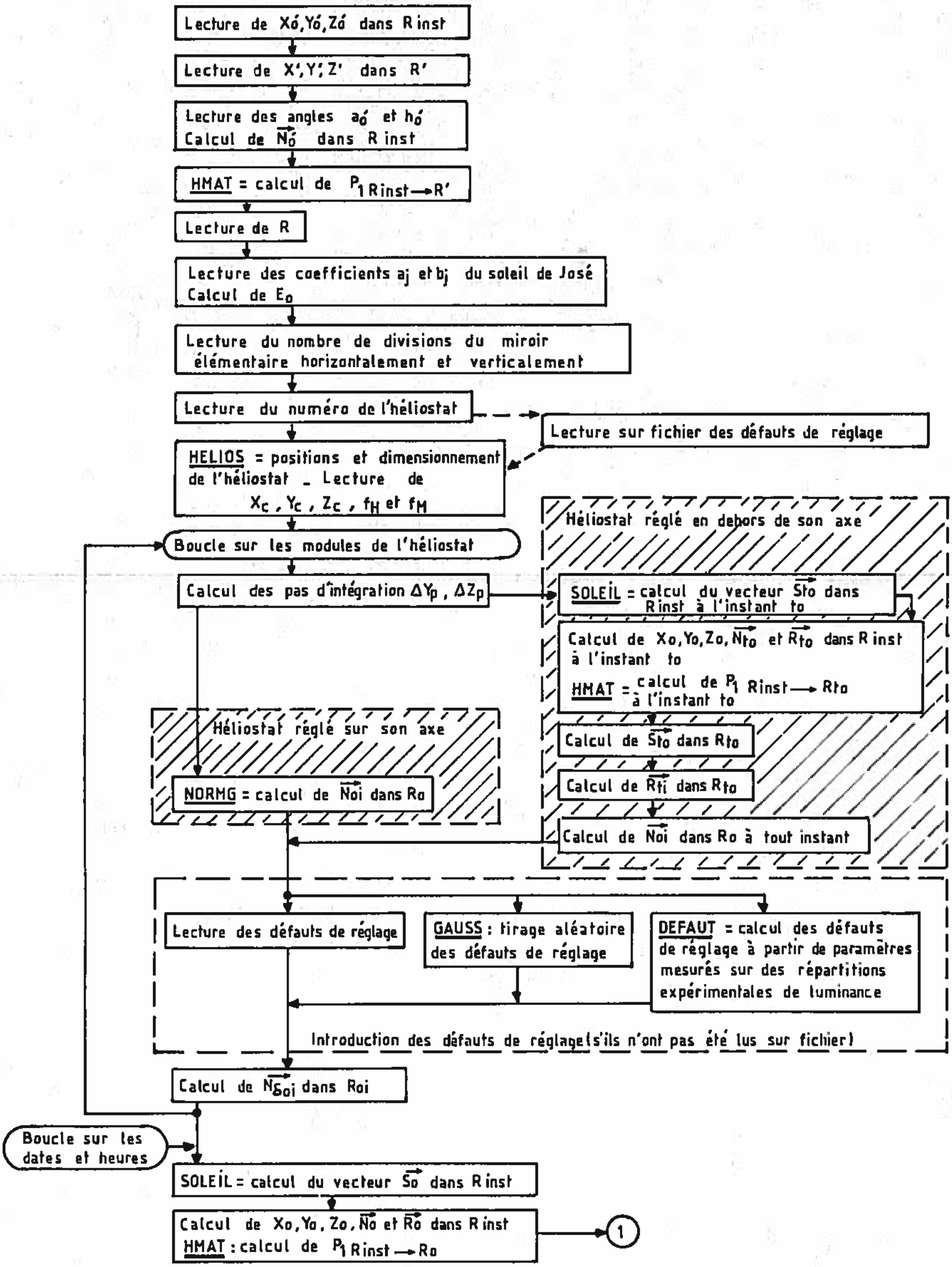
10) PREMIERS RESULTATS. LUMINANCE OBSERVABLE SUR UN PARABOLOIDE DE REVOLUTION

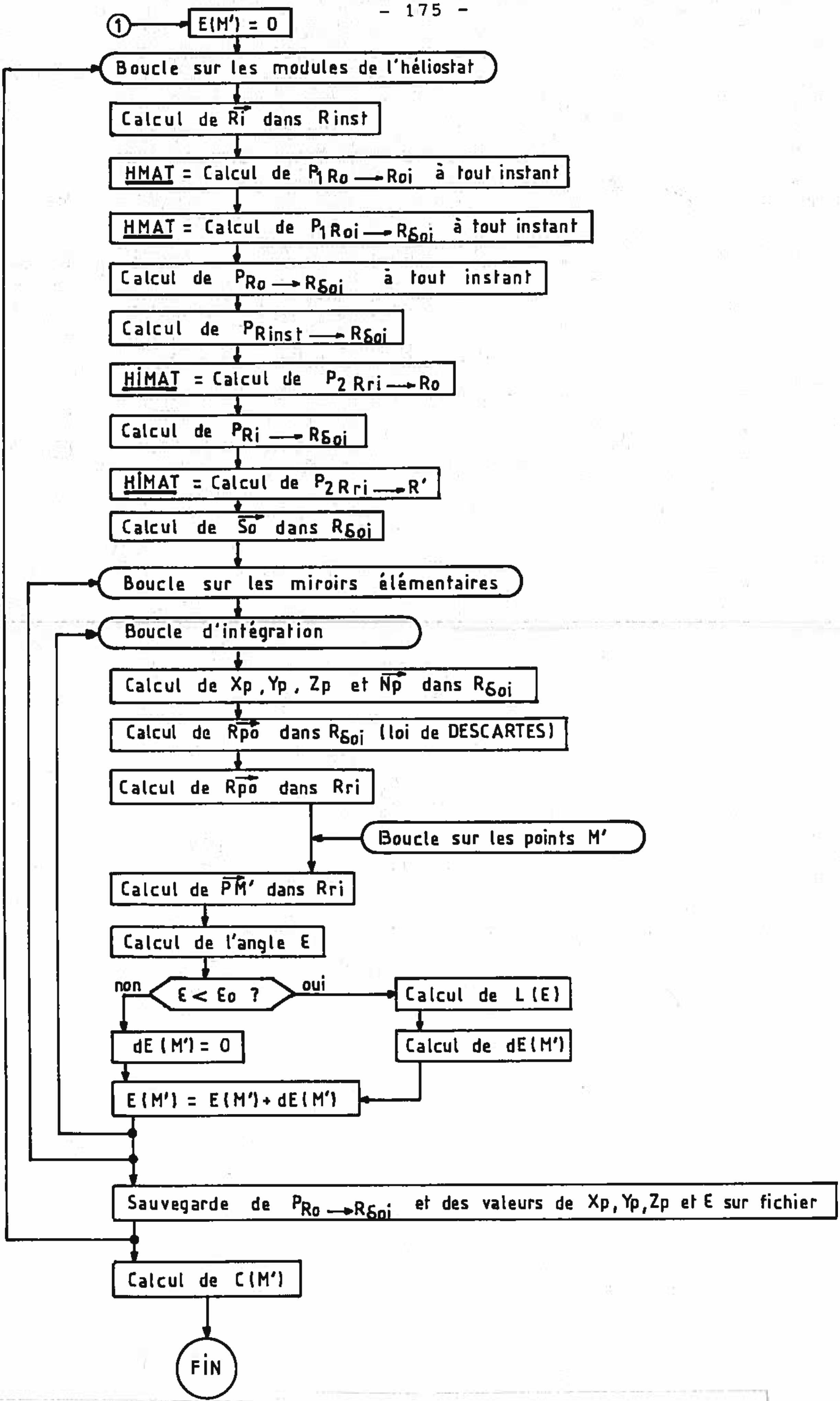
A titre d'exemple d'application de nos codes de calcul, nous avons envisagé de représenter les répartitions de luminance observables sur l'ensemble de la surface du concentrateur paraboloïdal du four solaire de 1000 kW, à partir de points d'observation situés dans le volume focal de l'installation. Nous avons ainsi introduit des décalages axiaux, latéraux, ou des combinaisons des deux précédents. Le concentrateur a été pour l'occasion supposé exempt de défauts de réglage, ce qui veut dire que toutes les facettes réflectrices sont tangentes à la surface du paraboloïde idéal. Dans ces conditions, la disposition des courbes iso-luminance observées d'un point M' est caractéristique d'un concentrateur paraboloïdal parfait, et les résultats que nous présentons sur les planches II-1 et II-2 peuvent être extrapolés à n'importe quel système de ce type (nous pensons en particulier aux concentrateurs d'une seule pièce, tels les anciens miroirs de DCA); seuls devront être éventuellement modifiés les contours du concentrateur, les cotes des points d'observation M' étant simplement ajustées par le rapport des focales.

La planche II-1 représente, en projection sur un plan vertical Est-Ouest, les courbes iso-luminance observables d'un point M', successivement situé sur l'axe du paraboloïde, à 9 cm en avant du foyer, et dans le plan focal vertical du concentrateur, 6 cm à l'ouest du point focal. Il s'agit donc respectivement d'un décalage axial et d'un décalage latéral.

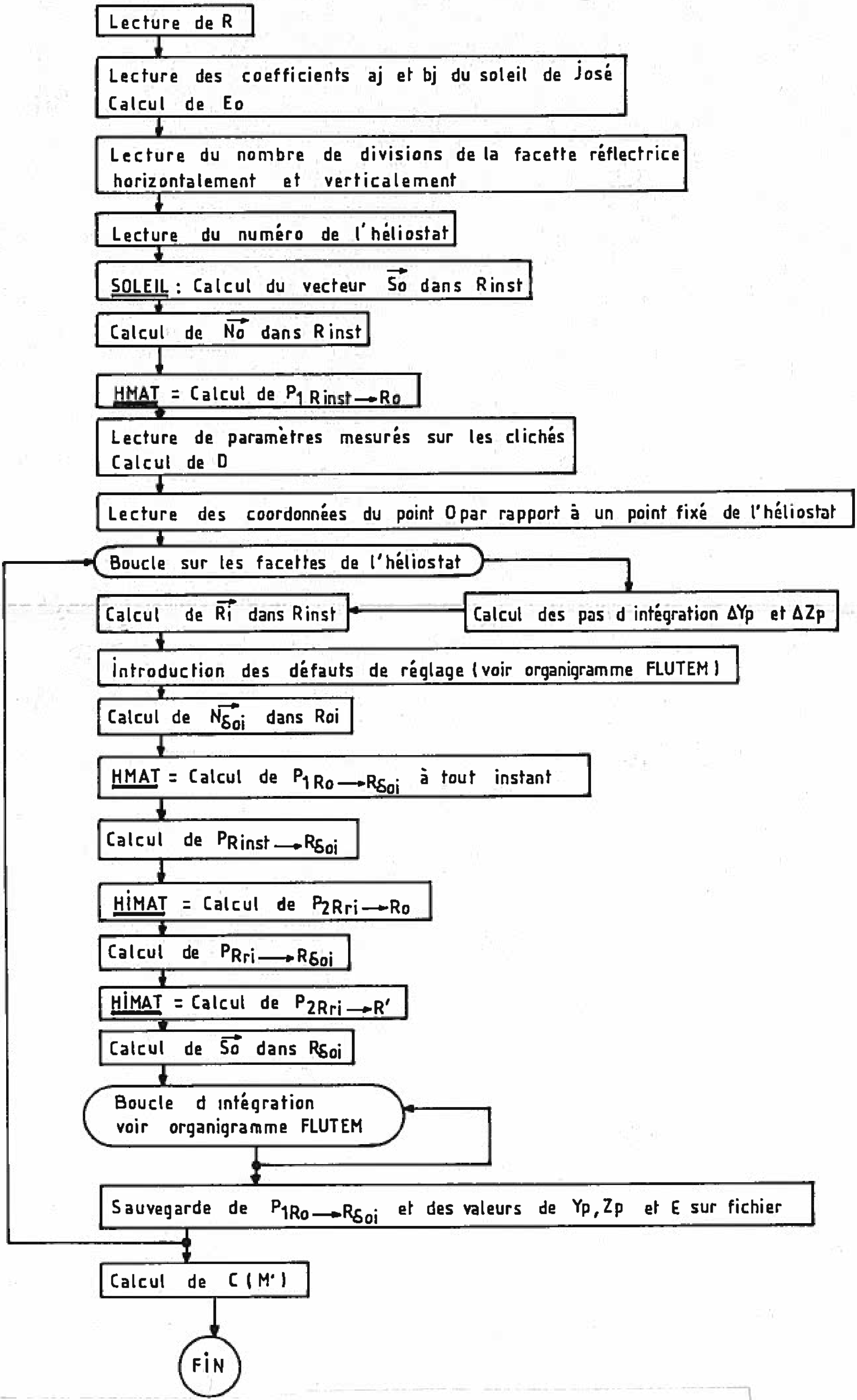
La planche II-2 nous présente deux combinaisons différentes de ces deux types de décalage. Les coordonnées de M' sont respectivement (4,0,8) et (-5,9,0), exprimées en centimètres dans le repère R' (voir le paragraphe 5.4.1), dont on suppose que les axes FY' et FZ' sont ici parallèles aux axes SYinst et SZinst du repère Rinst.

L'étude de ces planches nous permet de retrouver une règle classique d'optique géométrique : si la géométrie de l'ensemble concentrateur-point d'observation présente une quelconque symétrie, celle-ci doit se retrouver sur les répartitions de luminance vues de M'. Ainsi, dans le cas d'un décalage axial (figure supérieure de la planche II-1), la symétrie de révolution est conservée et les courbes iso-luminance sont des cercles centrés sur le sommet du paraboloïde. Par contre, dans le cas du décalage latéral (figure inférieure de la planche II-1), il ne subsiste qu'un plan de symétrie contenant le point M' et l'axe du concentrateur; on retrouve effectivement cette symétrie (par rapport au plan horizontal, dans le cas considéré ici) sur les répartitions de luminance vues de M', et le même principe reste valable pour les décalages combinés de la planche II-2. L'examen de ces courbes iso-luminance permet également de vérifier que les hypothèses d'Aparisi les concernant (voir chapitre I, paragraphe 4.2) n'étaient pas fondées.

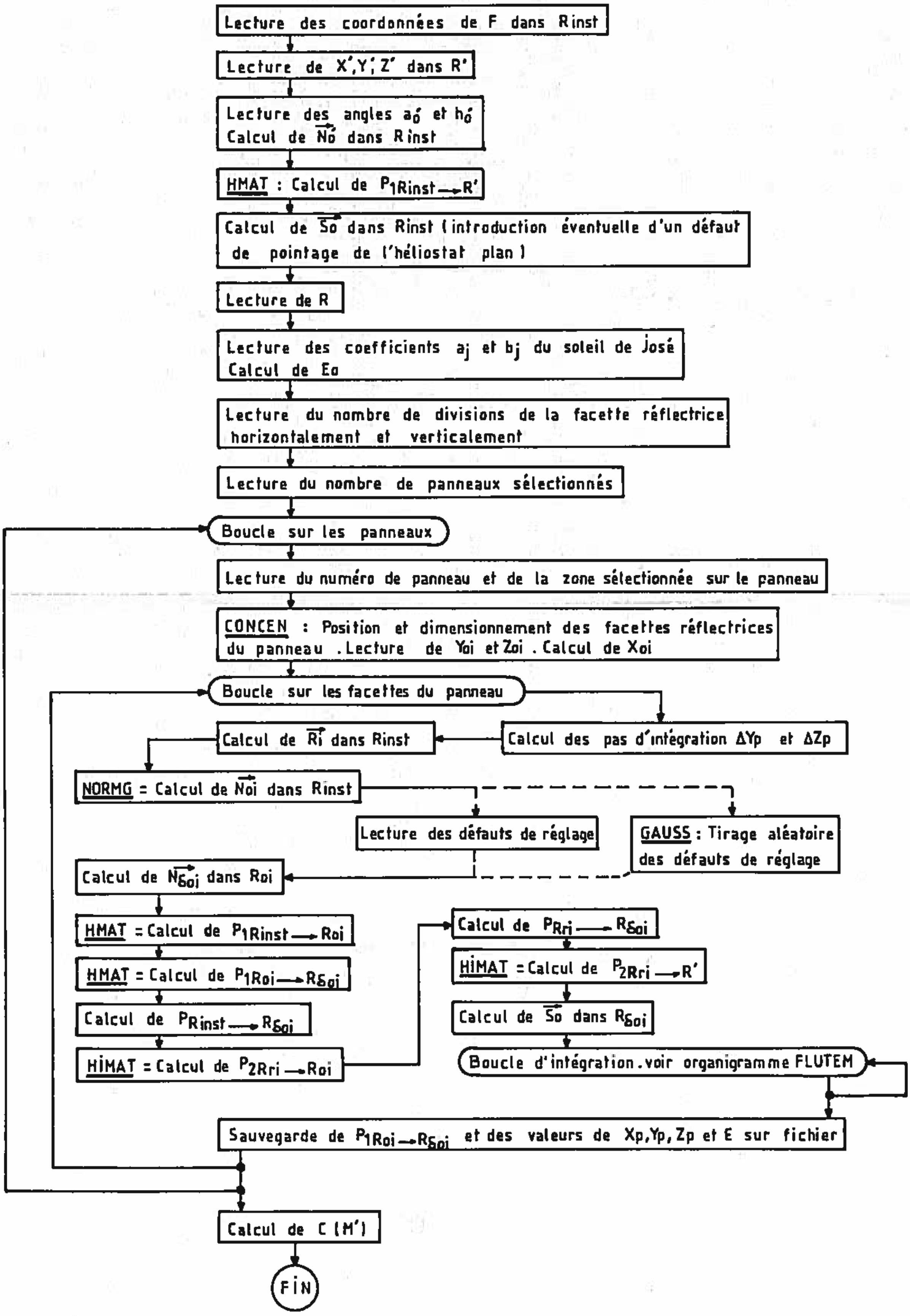

Lecture de Xó,Yó,Zó dans R inst
Lecture de X',Y',Z' dans R'
Lecture des angles aó et hó
Calcul de Nó dans R inst
HMAT = calcul de P1 Rinst → R'
Lecture de R
Lecture des coefficients aj et bj du soleil de José
Calcul de Eo
Lecture du nombre de divisions du miroir élémentaire horizontalement et verticalement
Lecture du numéro de l'héliostat
Lecture sur fichier des défauts de réglage
HELIOS = positions et dimensionnement de l'héliostat _ Lecture de Xc, Yc, Zc, fH et fM
Boucle sur les modules de l'héliostat
Calcul des pas d'intégration ΔYp, ΔZp
Héliostat réglé en dehors de son axe
SOLEIL = calcul du vecteur Sto dans R inst à l'instant to
Calcul de Xo,Yo,Zo, Nto et Rto dans R inst à l'instant to
HMAT = calcul de P1 Rinst → Rto à l'instant to
Calcul de Sto dans Rto
Calcul de Rti dans Rto
Calcul de Noi dans Ro à tout instant
Héliostat réglé sur son axe
NORMG = calcul de Noi dans Ro
Lecture des défauts de réglage
GAUSS : tirage aléatoire des défauts de réglage
DEFAUT = calcul des défauts de réglage à partir de paramètres mesurés sur des répartitions expérimentales de luminance
Introduction des défauts de réglage (s'ils n'ont pas été lus sur fichier)
Calcul de NSoi dans Roi
Boucle sur les dates et heures
SOLEIL = calcul du vecteur So dans R inst
Calcul de Xo, Yo, Zo, No et Ro dans R inst
HMAT : calcul de P1 Rinst → Ro
1



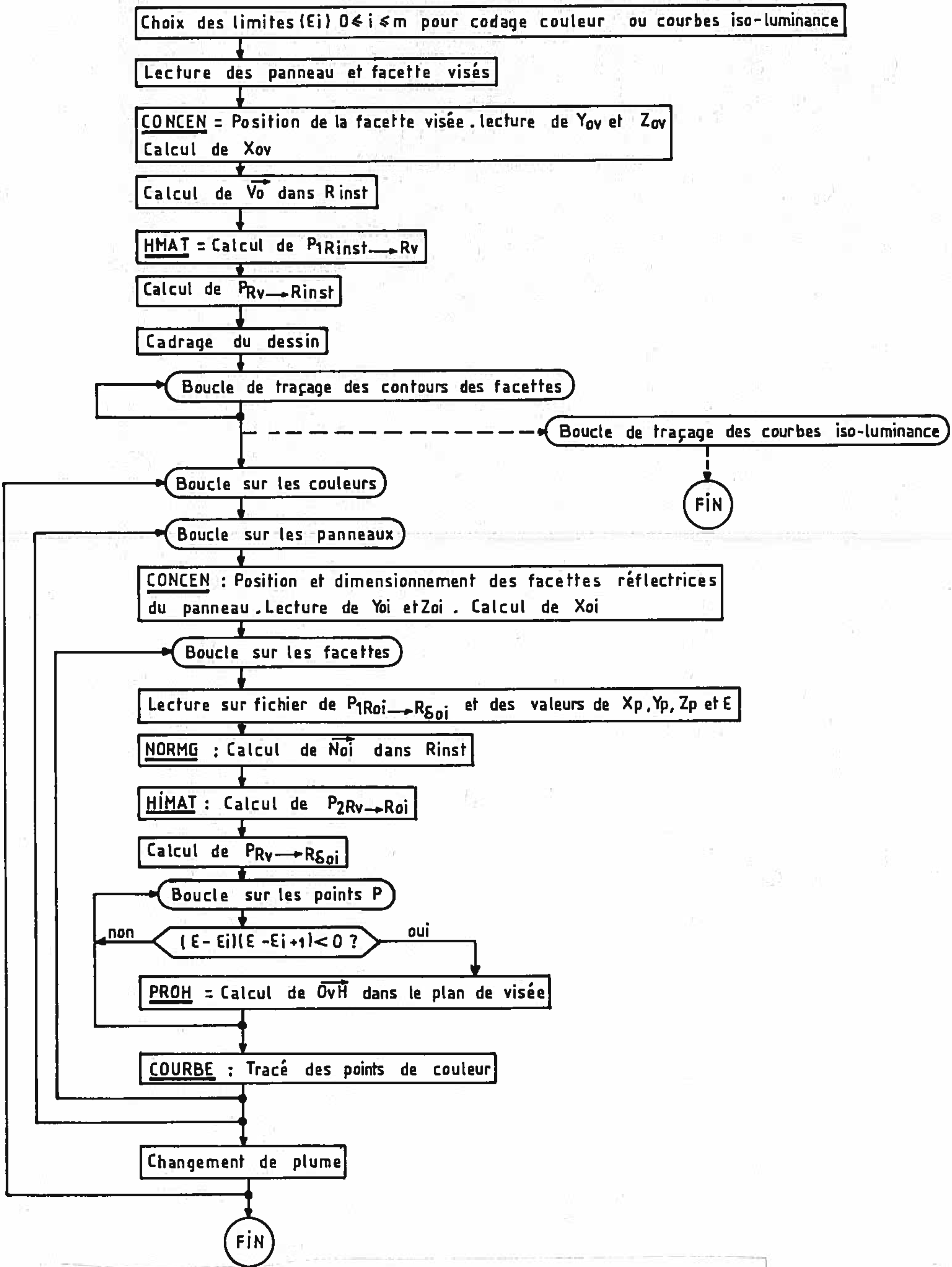
<u>Organigramme de FLUTEM</u> : code de calcul des facteurs de concentration C(M') formés par un héliostat focalisant CETHEL III bis



Organigramme de FLUPLA : code de calcul des facteurs de réflexion apparents formés par un héliostat plan dans un plan normal aux rayons réfléchis



Organigramme de FLUCON : code de calcul des facteurs de concentration C(M') formés par un ensemble de panneaux du concentrateur fixe du four de 1000 kW d'Odeillo

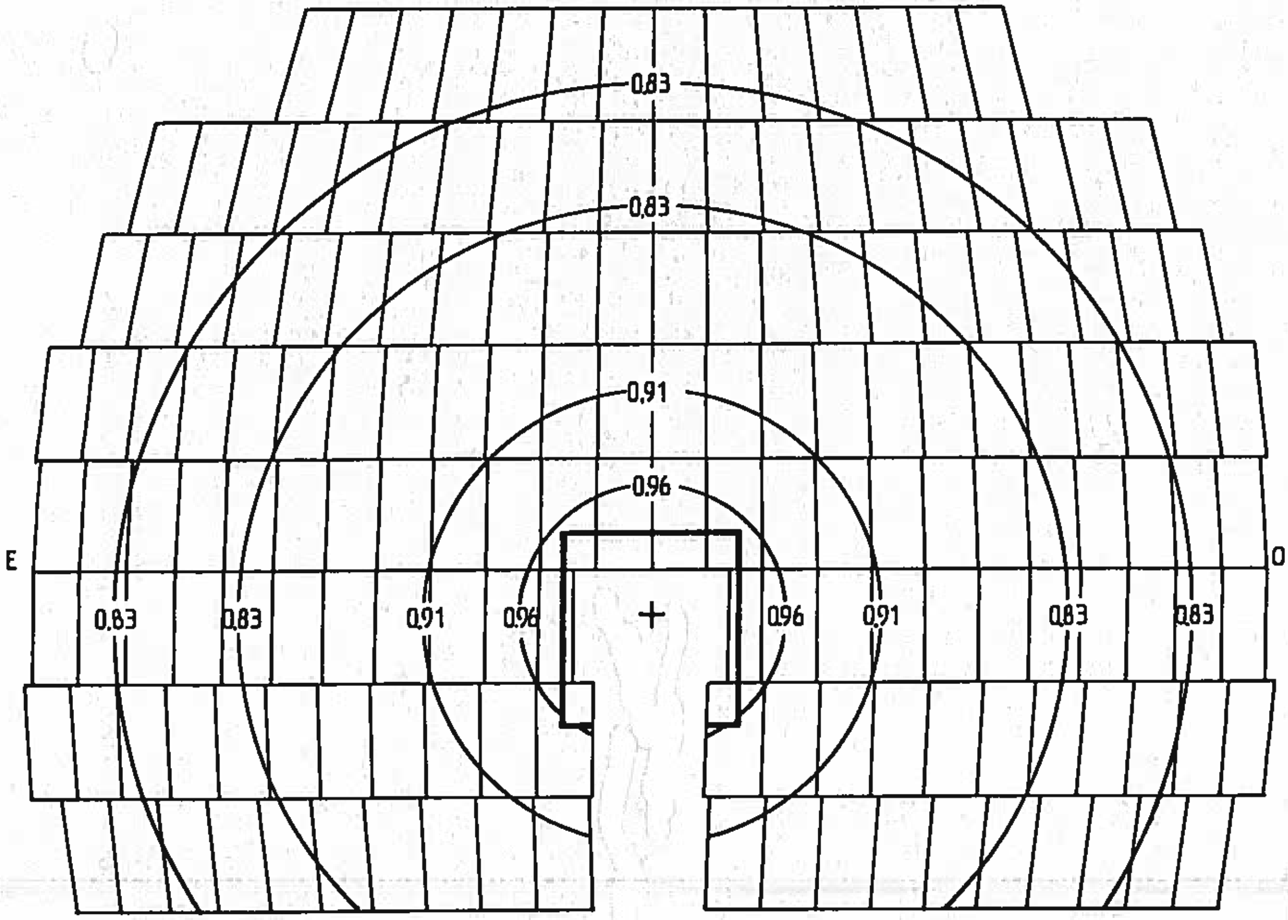


<u>Organigramme simplifié de DESCON</u> : code de simulation graphique des répartitions de luminance observées sur un ensemble de panneaux du concentrateur fixe du four de 1000 kW d'Odeillo

On pourrait discuter longtemps de l'intérêt de ce genre d'application de notre code de calcul. Dans le cas d'un soleil à luminance uniforme, par exemple, il pourrait servir à délimiter précisément, au voisinage du point focal, le volume qui permet d'obtenir, en tout point, une distribution uniforme de luminance. D'autre part, ces résultats pourraient être utilement intégrés à des codes de modélisation du comportement de certains systèmes récepteurs. Mais en réalité, les concentrateurs paraboliques utilisés en énergie solaire présentent tous, à des degrés divers, des imperfections spécifiques, telles leurs erreurs de surface et de réglage, qui ont pour effet de modifier considérablement les distributions de luminance théoriques; c'est d'ailleurs le but principal de cette étude que de remonter à ces erreurs, à partir de l'observation des répartitions de luminance réelles. Il n'y a donc pas lieu de s'étendre plus longuement sur ces résultats, qui sont en fait purement scolaires.

11) COMPARAISON AVEC D'AUTRES CODES DE CALCUL

Il était intéressant à plus d'un titre de confronter les résultats obtenus grâce à nos codes de calcul avec ceux de programmes dont la validité n'est plus à démontrer aujourd'hui; cela nous permettait en effet de contrôler la justesse de nos résultats, de vérifier ainsi que nos hypothèses de départ étaient bien fondées, et enfin, de mieux cerner les possibilités de notre code de calcul, en en précisant les avantages et les inconvénients vis-à-vis des multiples codes concurrents disponibles à l'heure actuelle, tant en France qu'aux Etats-Unis. Toutefois, il serait déraisonnable de vouloir entrer en compétition avec ceux-ci : notre méthode d'intégration point par point sur les surfaces réflectrices, et qui doit être réitérée pour chaque point de calcul M', réclame en effet un temps d'exécution trop important, dès lors qu'il s'agit de déterminer, sous forme de cartes de flux, les répartitions d'éclairement formées dans un plan récepteur par une installation comprenant un nombre élevé de facettes réflectrices. Par contre, si l'on considère seulement un sous-ensemble donné de cette installation (par exemple, un héliostat appartenant à un champ), les temps de calcul restent acceptables, et c'est pourquoi nous avons mis au point une variante supplémentaire de notre code de calcul des facteurs de concentration réalisés par un héliostat focalisant,


0,83
0,83
0,91
0,96
E
O
0,83
0,83
0,91
0,96
0,96
0,91
0,83
0,83

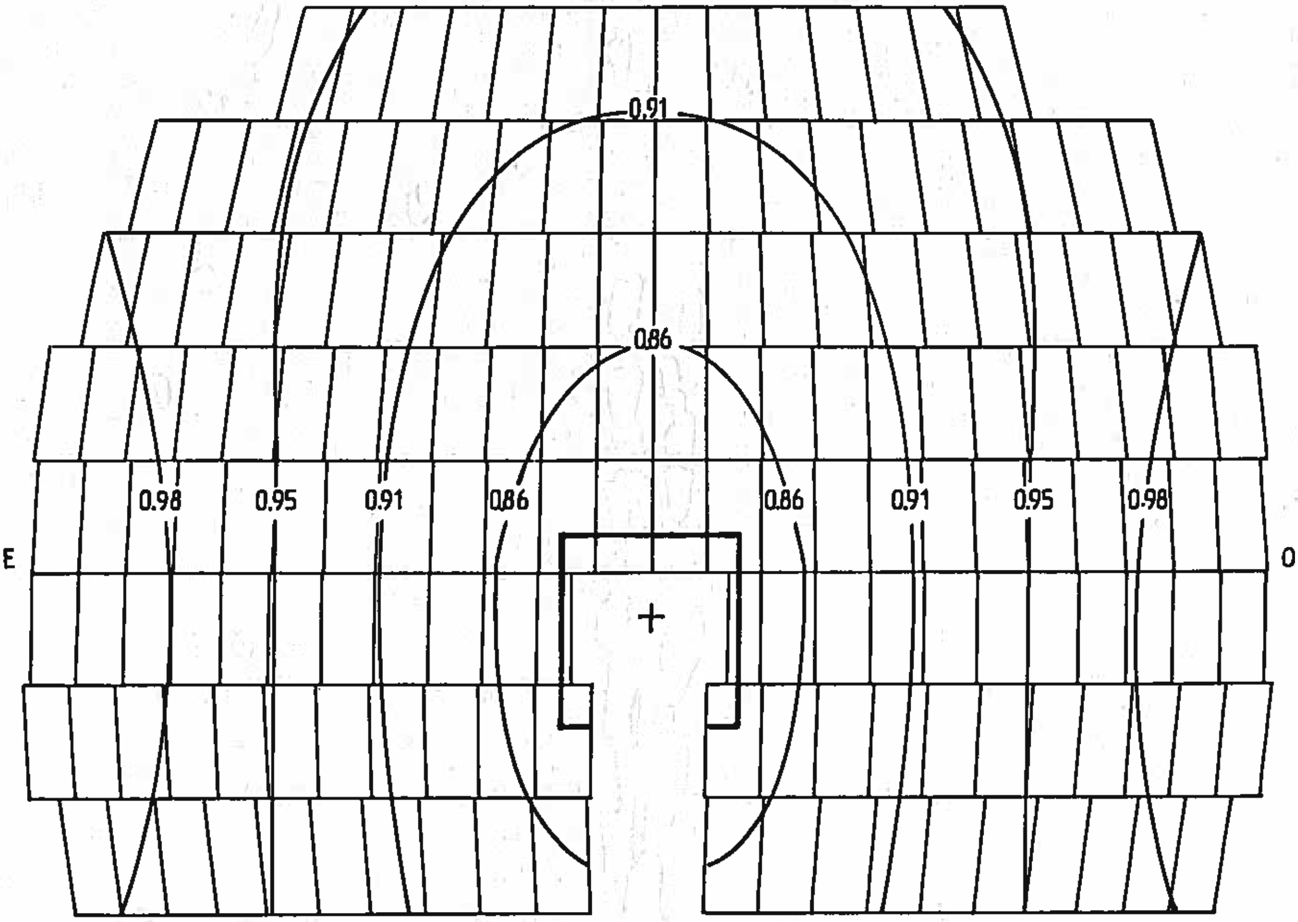
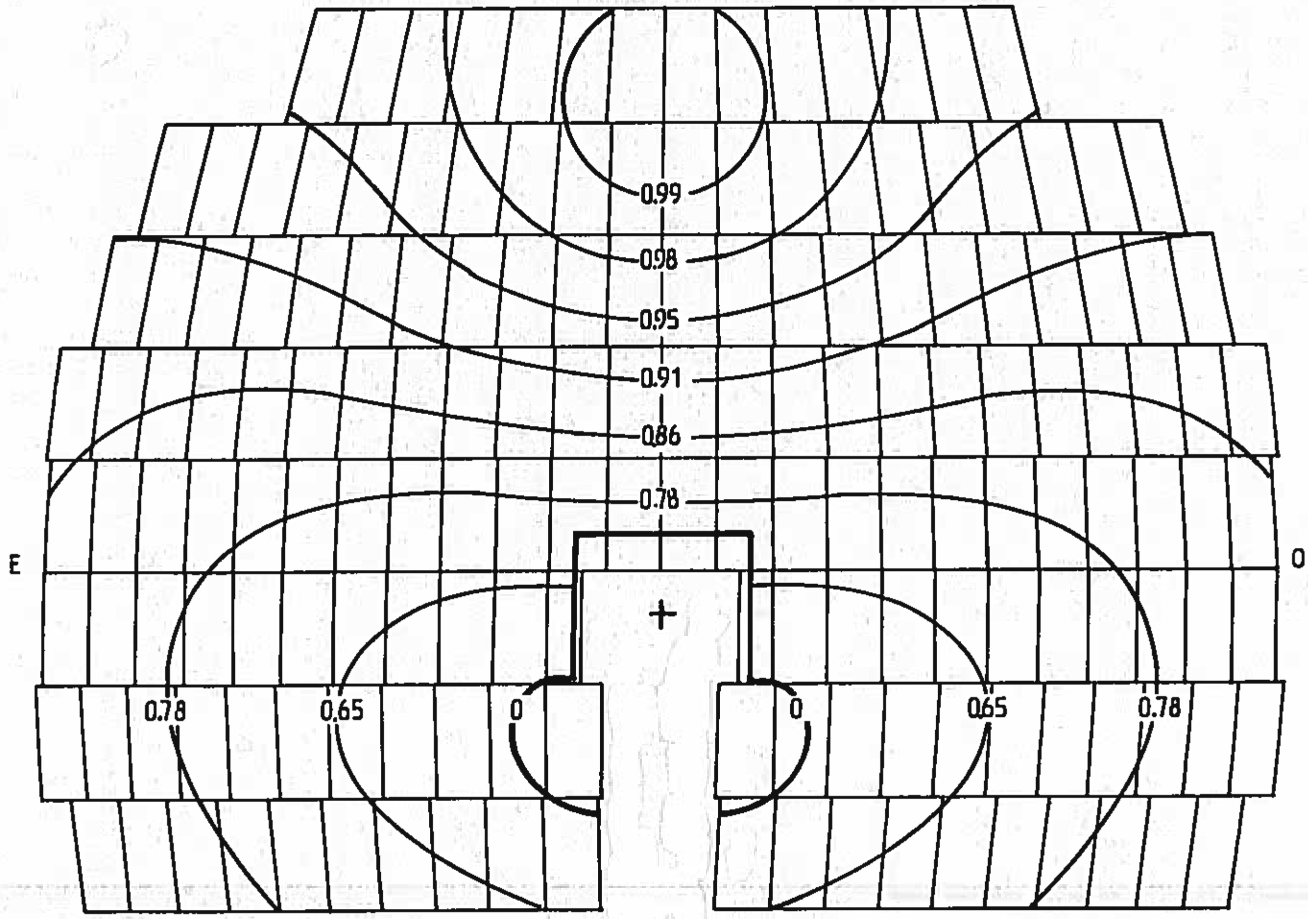

0,91
0,86
0.98
0.95
0.91
0,86
0,86
0.91
0.95
0.98
E
O

Planche II-I


0.99
0.98
0.95
0.91
0.86
0.78
E
O
0.78
0.65
0
0
0.65
0.78

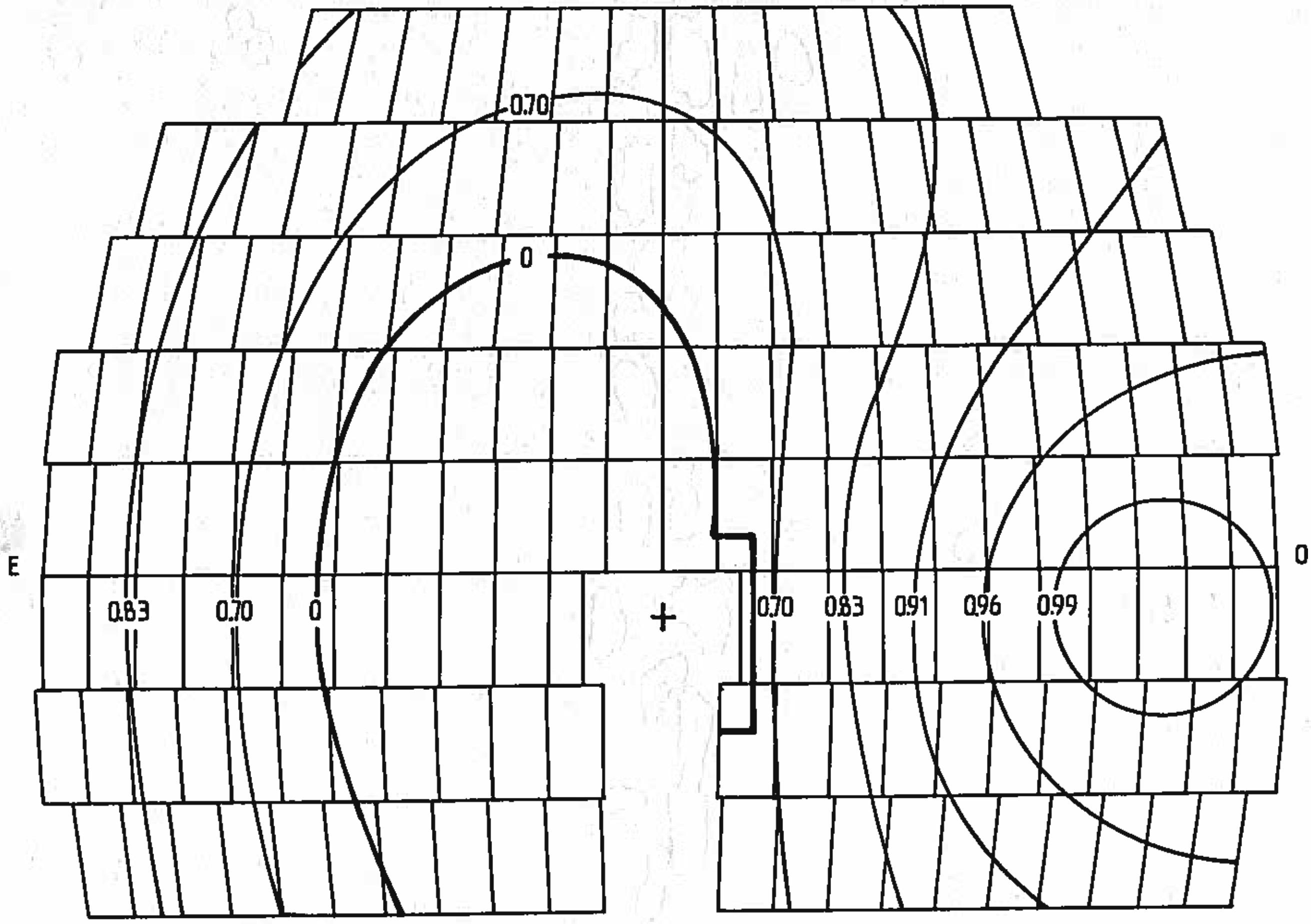

0.70
0
E
O
0.83
0.70
0
0.70
0.83
0.91
0.96
0.99

Planche II-2

destinée à établir les répartitions de densité de flux qu'il forme dans un plan cible. Pour l'occasion la surface de l'héliostat ne sera découpée qu'en 1600 éléments réflecteurs, alors que nous pouvons aller jusqu'à 12000 éléments ou plus dans le cas où seule la simulation des distributions de luminance observables sur l'héliostat fait l'objet du calcul.

A l'initiative de M.Izygon, de l'ECP, et de J.J.Bézian, du GEST, il a ensuite été décidé, dans le cadre d'une étude comparative des principaux codes de calcul français et américains [76], de confronter les résultats fournis par les trois codes suivants, et qui ne sont relatifs qu'à un seul héliostat :

1) le code américain MIRVAL (voir le paragraphe 4.3 du premier chapitre), élaboré en 1978 pour l'évaluation des performances énergétiques de différents champs d'héliostats lors de l'étude préliminaire du projet SOLAR ONE à Barstow (USA), et qui était disponible à l'ECP.

2) le code de calcul mis au point par J.J.Bézian (paragraphe 4.4.3.2 du premier chapitre) à THEMIS, et qui constitue la version la plus évoluée et la plus performante d'une lignée de programmes dont le principe de base est celui de l'approximation de Courrèges.

3) et enfin, notre propre code de calcul des performances d'un héliostat focalisant, tel qu'il vient d'être décrit dans ce chapitre.

Bien entendu, les paramètres d'entrée de ces trois programmes devaient être rigoureusement identiques, et nous les avons fixés comme suit :

* Les répartitions de densité de flux sont calculées dans le plan de la cible active (voir le paragraphe 2.3 du chapitre V) à 12h et 16h GMT au cours de la journée du 21 mars 1986.

* Le coefficient de réflexion des modules de l'héliostat vaut 0,9.

* La loi de luminance solaire est la loi de José donnée par la relation (II-10).

* Les héliostats choisis ne présentent ni dépointage, ni déréglages.

Les figures II-38 A et B représentent une coupe horizontale des répartitions de densité de flux formées dans le plan de la cible active par l'héliostat 116, et établies par ces trois codes de calcul. A la vue de ces courbes, plusieurs remarques s'imposent.

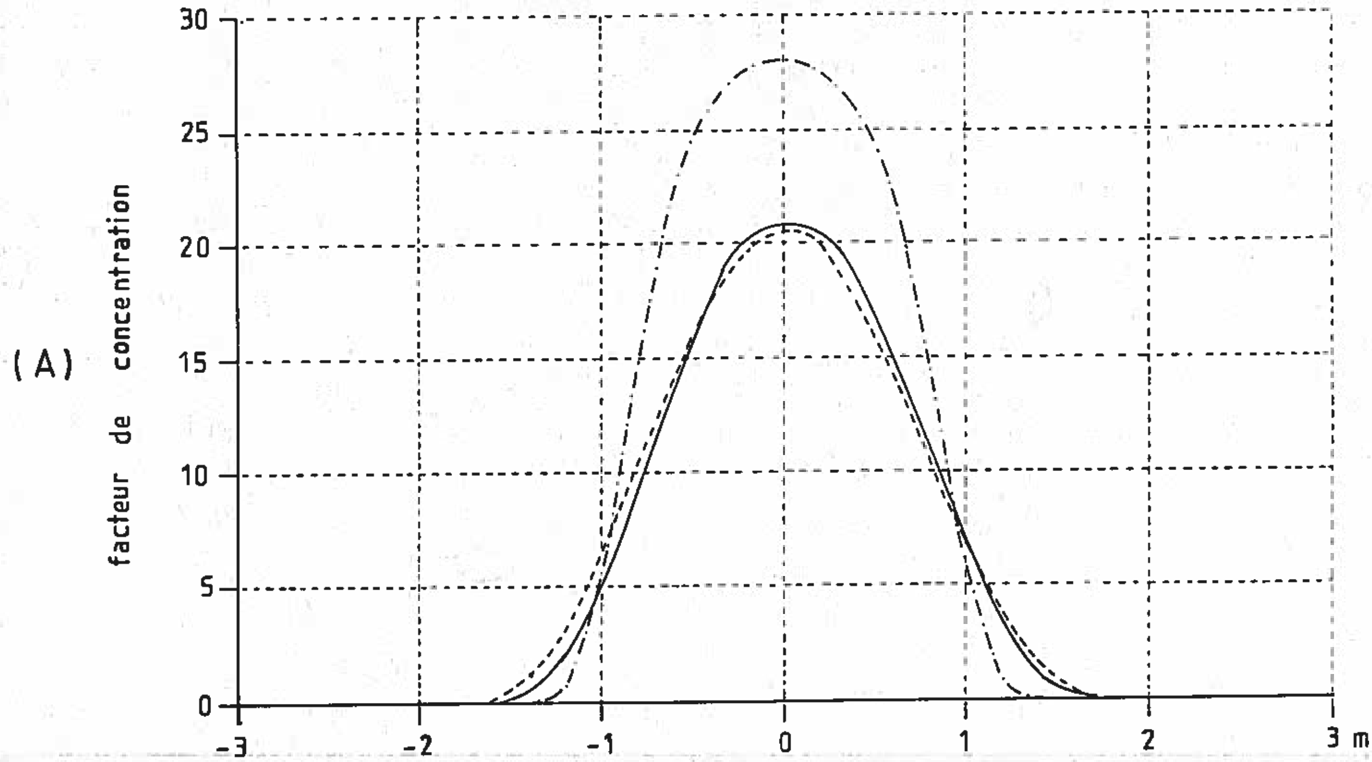
Il apparaît d'abord que les résultats obtenus grâce au programme de J.J.Bézian sont en bon accord avec les nôtres, qui avaient d'ailleurs été choisis comme référence, vu la rigueur de notre procédure d'intégration. Ces deux codes de calcul se valident donc mutuellement, et l'on ne peut que souligner la puissance de cette adaptation de l'approximation de Courrèges qui, pour une précision comparable à celle de notre modèle, qualifié d'"exact", prend des temps d'exécution nettement moins importants.

Par ailleurs, les répartitions de densité de flux calculées à partir du code américain MIRVAL semblent en léger désaccord avec les précédentes. C'est une des conséquences de la géométrie relativement complexe des modules réflecteurs de l'héliostat CETHEL III bis, qui ne peut être introduite telle quelle dans MIRVAL; celui-ci n'accepte en effet que des facettes à relief sphérique et d'égales dimensions, ce qui pose le problème du module complémentaire. Ceci montre que les grands codes de calcul américains sont en réalité moins souples que ne le prétendent leurs auteurs, et qu'il n'est pas facile de les adapter au cas de THEMIS. Toutefois, les résultats s'améliorent lorsque le calcul porte sur un plus grand nombre d'héliostats [76].

Enfin nous avons vérifié que le flux total réfléchi par l'héliostat était bien le même pour les trois codes de calcul, ce qui est un critère incontournable. Cette étude comparative nous amène donc à recommander vivement les codes Bézian ou MIRVAL pour le calcul des répartitions de densité de flux formées par un champ d'héliostats complet. Quant à notre propre code, il permet de juger de l'aptitude d'un programme donné à modéliser plus ou moins fidèlement les performances énergétiques d'un héliostat, et peut à ce titre être considéré comme un code de référence. Toutefois sa principale raison d'être demeure la simulation des distributions de luminance vues d'un point, tâche pour laquelle il n'existe, jusqu'à présent, aucun modèle concurrent.

12) CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe et les dif-



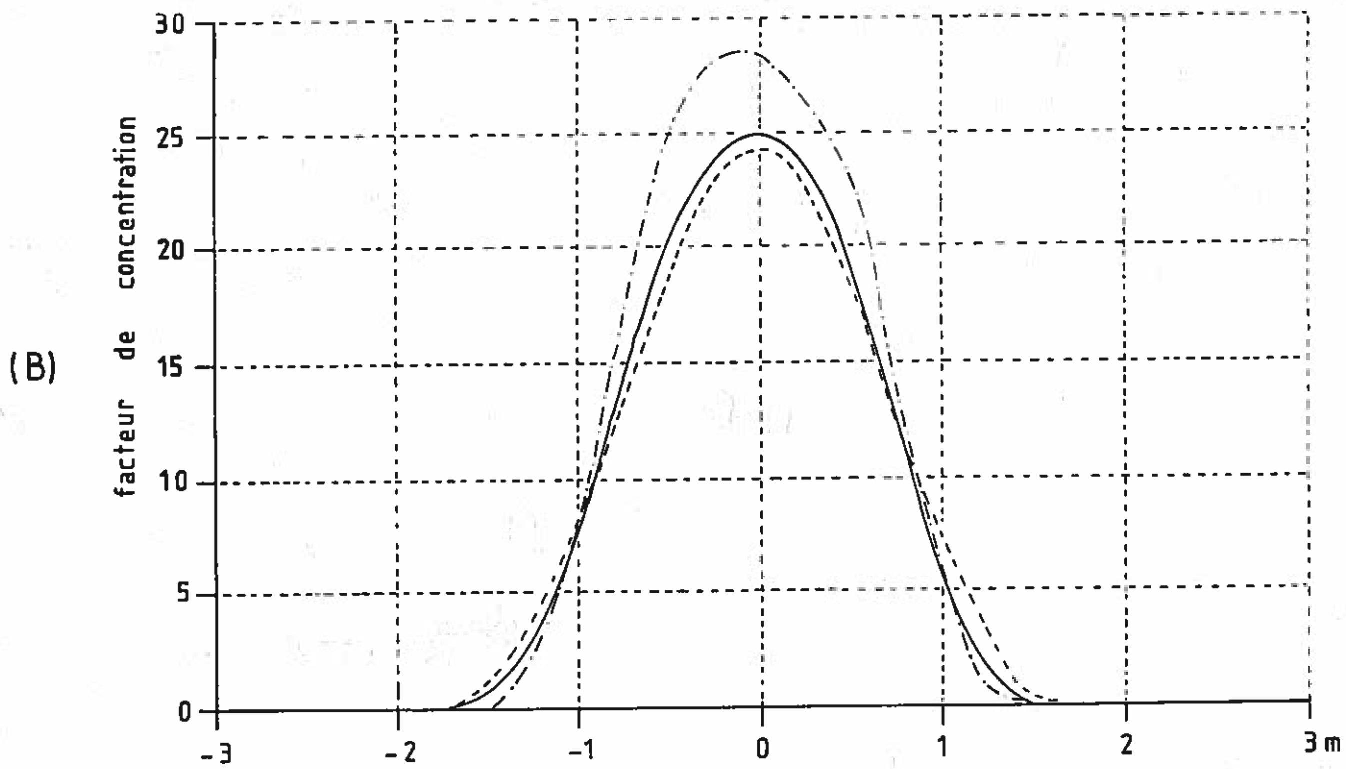


fig II-38 : Coupes horizontales des cartes de flux formées dans le plan de la cible active par l'héliostat 116 à 12h GMT (A) et 16h GMT (B). traits mixtes : code MIRVAL, traits pointillés : code Bézian, traits continus : code Hénault.

férentes étapes de nos codes de calcul, qui permettent de simuler les répartitions de luminance, observées sur les surfaces réflectrices, à partir d'un point donné, et de calculer le facteur de concentration atteint en ce point, pour trois systèmes collecteurs d'énergie solaire différents : les héliostats focalisants, les héliostats plans, et les concentrateurs fixes. Ces modèles sont à notre avis des modèles de référence, puisqu'ils ne comportent aucune approximation, et consistent essentiellement à sommer les contributions d'éclairement élémentaires données par la loi de l'étendue géométrique. La simplicité de ce principe de base, ainsi que la spécificité de leurs utilisations, distinguent nettement nos modèles d'autres codes de calcul des répartitions de densité de flux désormais classiques, tels que MIRVAL, HELIOS, ou la version de l'approximation de Courrèges modifiée par Bézian. Nos programmes se prêtent en effet à deux utilisations bien différentes :

L'application la plus intéressante est bien entendu la simulation des répartitions de luminance et du facteur de concentration, qui nous servira à remonter aux défauts de réglage des facettes réflectrices d'un système collecteur. Dans ce cas, et bien que la surface réflectrice puisse être découpée en plus de 10000 éléments, les temps de calcul sont très courts et il n'existe à l'heure actuelle aucun programme équivalent.

Une deuxième application consiste à adapter nos programmes au calcul des répartitions d'éclairement formées par une installation. Les longs temps d'exécution que nécessite cette variante conduisent à lui préférer l'un des trois codes de calcul cités plus haut. Dans ce cas nos programmes peuvent servir à valider les résultats de ces codes pour un sous-système donné de l'installation (par exemple, un héliostat appartenant à un champ).

C'est évidemment la première application que nous allons à présent développer en vue de son utilisation systématique; il apparaît en effet que nos simulations graphiques ne permettent pas de remonter directement aux défauts de réglage des facettes réflectrices, mais seulement de contrôler la justesse d'une valeur d'erreur introduite, lors de la confrontation entre les distributions de luminance expérimentales et simulées. Il y aurait bien sûr moyen d'arriver à un bon accord entre ces deux distributions, en procédant par approximations successives des erreurs de réglage, pour chacune des facettes réflectrices considérées. On pourrait également faire appel à des méthodes numériques d'itération. En fait, ces procédures sont trop lourdes et nous avons préféré chercher des relations approchées entre les défauts de réglage des facettes, et quelques paramètres simples déduits des distributions expérimentales de luminance. La détermination de ces relations fera l'objet du chapitre III. Mais nous n'abandonnerons pas nos codes de calcul pour autant, car les valeurs des défauts de réglage qui nous seront données par ces relations y seront systématiquement réintroduites, afin de vérifier qu'elles permettent effectivement de reconstituer au mieux les répartitions de luminance expérimentales; ces codes resteront donc bel et bien notre outil de calcul principal.