



Les centrales électrosolaires à tour. Optimisation du champ de réflecteurs et application à l'effet de taille du champ

Cl. Mersier

► To cite this version:

Cl. Mersier. Les centrales électrosolaires à tour. Optimisation du champ de réflecteurs et application à l'effet de taille du champ. *Revue de Physique Appliquée*, 1979, 14 (1), pp.1-20. <10.1051/rphysap:019790014010100>. <jpa-00244576>

HAL Id: jpa-00244576

<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00244576>

Submitted on 1 Jan 1979

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

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

REVUE DE PHYSIQUE APPLIQUÉE

Classification
Physics Abstracts
07.60

Les centrales électrosolaires à tour. Optimisation du champ de réflecteurs et application à l'effet de taille du champ

Cl. Mersier

E.D.F., Département Essais, 6, quai Watier, 78400 Chatou, France

(Reçu le 21 juin 1978, révisé le 20 octobre 1978, accepté le 20 octobre 1978)

Résumé. — On présente une méthode d'optimisation de la conception technique des champs de réflecteurs des centrales électrosolaires ainsi qu'une application de celle-ci à l'effet de taille des champs.

On distingue deux caractéristiques des champs de réflecteurs : la forme et la répartition des réflecteurs dans cette forme.

La répartition des réflecteurs dans le champ est essentiellement guidée par les phénomènes d'orientation (effet cosinus), les ombres et la technologie des réflecteurs qui imposent leur limitation à la réalisation d'un optimum théorique.

Si les pertes du récepteur (rayonnement infrarouge, convection, absorptivité, etc...) sont négligeables, la forme du champ (pour un terrain et une tour donnés) ne dépend que de la surface de réflecteur à installer (en plus des facteurs concernant la répartition).

Dans le cas contraire, la forme du champ est très dépendante de l'orientation de la surface de captation du flux réfléchi par le champ et de façon prépondérante par rapport aux autres facteurs.

Abstract. — Author describes a method to determine heliostats fields allowing optimal energetic efficiency taking into account the receivers.

This method is used to compute the local density and the shape of the fields. It is shown that when the receivers have negligible thermal losses, the two main characteristics of the fields are shadowing results and cosine effect. In the opposite case, i.e. important thermal losses from the receivers, the resulting field is very dependant on these losses.

In the two cases, the technology of the heliostats give some limitations in the theoretical optimal configuration.

1. Introduction. — L'utilisation de l'énergie solaire au moyen de systèmes formés d'un champ de réflecteurs orientables, concentrant le rayonnement vers un récepteur situé en haut d'une tour (Fig. 1), a posé le problème de la conception du champ de réflecteurs. Le texte qui suit expose une méthode qui conduit à une solution tenant compte d'un certain nombre d'interactions entre les paramètres qui définissent le système, en particulier avec le récepteur.

2. Présentation du système. — Le but d'un ensemble tel qu'une centrale solaire à tour peut être d'obtenir un maximum d'énergie à partir du matériel utilisé. La conception du système est alors guidée par la maximisation du rendement énergétique. Ce rendement est couramment défini comme le rapport entre l'énergie disponible en bout de chaîne et l'énergie que fournirait le flux direct du soleil recueilli sous incidence normale par une surface égale à la surface totale de réflecteur installée (¹).

En limitant le bilan à l'énergie thermique disponible au récepteur, une analyse sommaire des causes de

dégradation de ce rendement mène à l'énumération suivante :

- *L'effet cosinus* : traduit le fait que l'orientation des réflecteurs offre au flux solaire une surface apparente inférieure à la surface de réflecteur supportée par l'orienteur (héliostat).

- *Les effets d'ombre* : le flux se dirigeant vers un réflecteur peut être intercepté par un autre réflecteur et créer sur le premier de l'ombre à l'incidence. De même le flux réfléchi par un réflecteur peut être bloqué par un autre réflecteur et créer cette fois sur le premier de l'ombre à l'émergence (ou blocage).

- *Les pertes au récepteur* (chaudière) : la concentration du rayonnement a généralement pour but une utilisation de l'énergie à température élevée ; outre les pertes par réflexion parasite, on observe des pertes d'énergie par rayonnement infrarouge et convection.

(¹) Rapporté à l'énergie qu'a recueilli le terrain sur lequel est disposé l'installation, ce rendement décroît rapidement car l'occupation du sol devient très faible pour des systèmes de grande dimension.

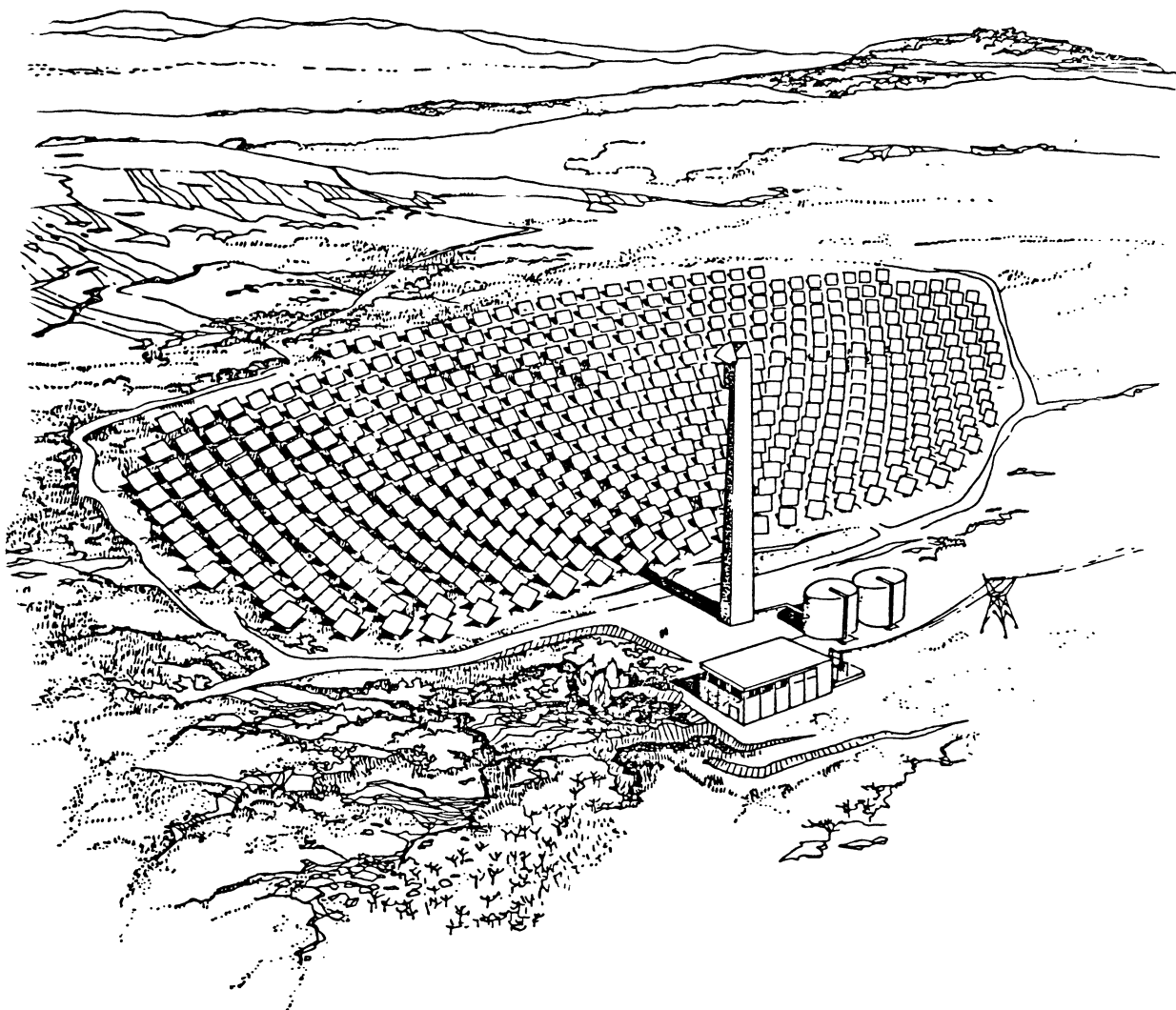


Fig. 1. — Vue générale d'une centrale électrosolaire à tour.

[General aspect of electro solar power plant.]

Ces pertes sont liées à la température et aux dimensions du récepteur.

On peut déjà montrer rapidement que ces effets ont des conséquences liées.

Les pertes par effet *cosinus* sont d'autant plus faibles que les réflecteurs sont disposés dans une direction plus proche par rapport au récepteur de la direction moyenne du flux solaire (Fig. 2). Cela tend donc à disposer les réflecteurs de façon groupée autour de la position au sol correspondant à cette direction moyenne ; or le fait de serrer les réflecteurs pour les grouper augmente les pertes par ombres, ce qui grève d'autant l'amélioration de l'effet *cosinus*. Les effets d'ombre et de *cosinus* sont antagonistes.

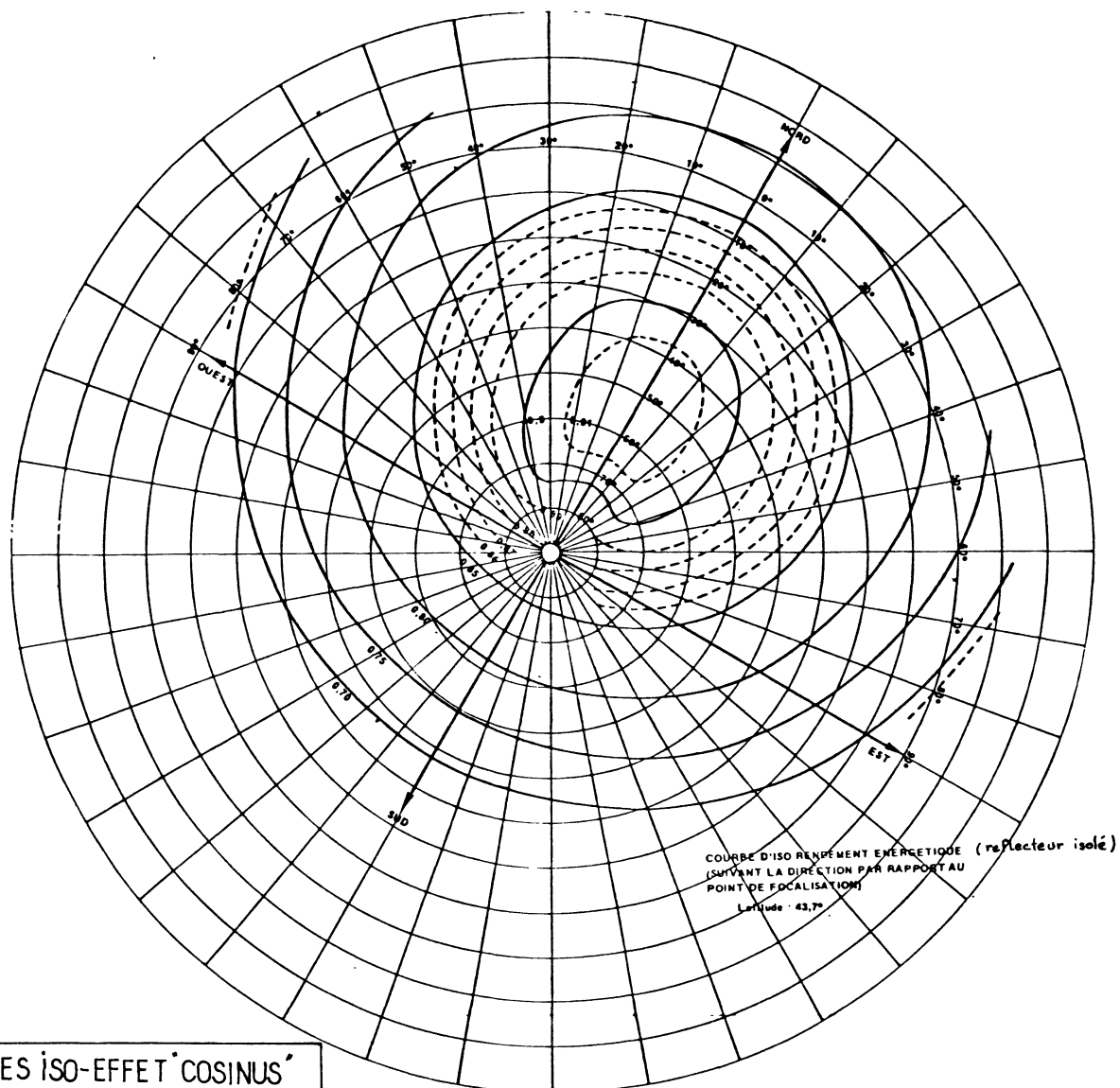
D'autre part, le fait de répartir les réflecteurs d'une certaine façon conduit à concevoir une chaudière dont la surface de réception soit suffisante pour capter un maximum du flux réfléchi. La dimension nécessaire de cette surface dépend des distances entre récepteur

et réflecteurs en raison de la divergence du flux solaire, des types de réflecteurs et de l'étendue angulaire du champ (la surface de réception apparaissant plus réduite pour les réflecteurs installés *sur le côté*). Or, à température constante, les pertes de la chaudière sont sensiblement proportionnelles à la surface de captation : on conçoit l'influence de cette dernière dans l'installation du champ, en compétition avec les effets ombre et *cosinus*.

Ces trois phénomènes principaux sont pris en compte dans la méthode d'élaboration des champs de réflecteurs présentée plus loin. On examine auparavant les paramètres caractérisant une centrale électrosolaire à tour.

3. Paramètres du système. — Du soleil jusqu'à la chaudière, on peut énumérer les paramètres suivants :

- la latitude qui influence la trajectoire apparente du soleil et donc l'effet *cosinus* en un point donné,



CONES ISO-EFFET COSINUS
ET INTERSECTION AVEC UN
PLAN HORIZONTAL

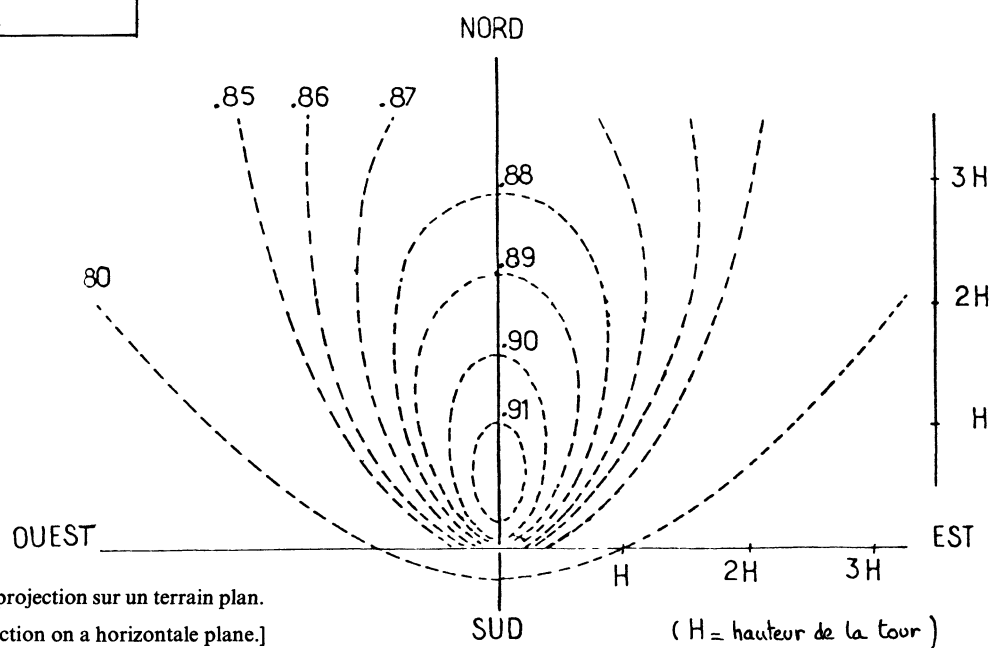


Fig. 2. — Cône *iso-cosinus* et projection sur un terrain plan.
[*Iso-cosine* direction and projection on a horizontale plane.]

(H = hauteur de la tour)

- l'ensoleillement local, défini non seulement par la puissance du flux solaire et l'énergie annuelle, mais également par la distribution énergétique du flux en fonction de la direction du soleil,

- le terrain utilisé qui influence la disposition des réflecteurs et donc les ombres et effets cosinus,

- les réflecteurs qui interviennent par :

- la qualité du matériau réfléchissant (coefficient de réflexion),

- la surface du matériau réfléchissant (quantité et qualité),

- le type de réflexion (focalisation),

- les dimensions hors tout et surfaces opaques,

- l'encombrement au sol,

- la précision du dispositif orienteur,

- la hauteur de la tour, qui influence la disposition des réflecteurs et la surface de réflecteurs installable sur un terrain donné,

- la chaudière, caractérisée par sa surface de captation, le positionnement (inclinaison) de cette dernière par rapport au champ et le niveau des pertes thermiques.

Aucun de ces paramètres n'est vraiment découpé des autres et, dès que l'on cherche à évaluer une caractéristique globale de l'ensemble (énergie, puissance, coût, etc...), la part revenant typiquement à telle caractéristique ou tel composant est assez délicate à évaluer.

4. Modélisation du système. — 4.1 FLUX SOLAIRE.

— On peut schématiquement distinguer deux caractéristiques quant au flux solaire.

1) La valeur instantanée de la puissance du flux solaire (c'est-à-dire pour une position donnée du soleil) que l'on utilise pour la simulation du fonctionnement de l'ensemble ou pour la prévision de la puissance crête, de l'énergie journalière, etc...

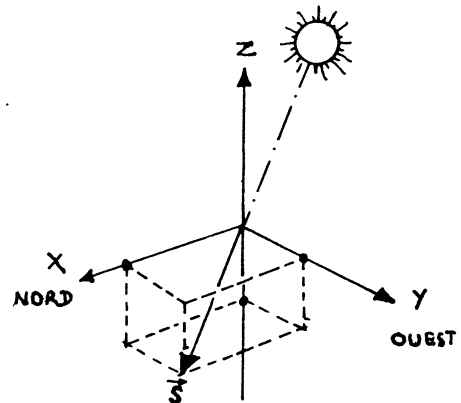
2) L'énergie distribuée au cours de l'année par le flux solaire suivant la position angulaire du soleil, distribution qui permet de concevoir facilement le champ adapté.

La première exigence peut être satisfaite soit par un enregistrement des valeurs typiques du flux solaire pour chaque heure de chaque jour à l'endroit d'implantation choisi, soit par un modèle théorique plus ou moins sophistiqué qui donne en fonction de la position du soleil, la valeur probable du flux [1, 2]. La position du soleil est elle-même calculée en fonction de la latitude, du jour et de l'heure par une formulation désormais classique. Un degré de précision suffisant est donné par les formules suivantes :

- Position du soleil au jour J à l'heure H (heure solaire) à la latitude λ :

Déclinaison :

$$\delta \simeq 23,15^\circ \cos \left(\frac{360}{365} \times J \right) + 0,7^\circ \sin \left(\frac{360}{365} J \right).$$



Angle horaire :

$$\tau \simeq 15^\circ \times (H - 12).$$

Coordonnées du vecteur flux solaire :

$$S \begin{cases} S_x = \cos h \cos \psi = \sin \lambda \cdot \cos \delta \cdot \cos \tau - \cos \lambda \sin \delta \\ S_y = \cos h \sin \psi = -\cos \delta \sin \tau \\ S_z = \sin h = -\cos \lambda \cos \delta \cos \tau + \sin \lambda \sin \delta \end{cases},$$

où h et ψ sont les angles de site et d'azimut du soleil.

Le jour $J = 0$ est le solstice d'été.

- Flux solaire pour la position S du soleil :

$$E \text{ (W/m}^2\text{)} = E_0 \exp(+1/A \cdot s_z) \quad (s_z < 0)$$

où E_0 est du type :

$$E_0 = e_0 \times \left(1 + \varepsilon \cos \frac{360}{365} \times (J - 91) \right)^2$$

avec $\varepsilon \simeq 0,034$ et $e_0 \simeq 1\,250 \text{ W/m}^2$.

Quant à A , qui traduit l'influence de l'épaisseur de l'atmosphère, sa valeur varie avec la composition de cette dernière. Des valeurs courantes sont comprises dans l'intervalle $\{2,5; 7\}$.

Il faut évidemment moduler ce modèle selon les conditions locales ; il est essentiellement destiné à donner une évaluation instantanée du flux.

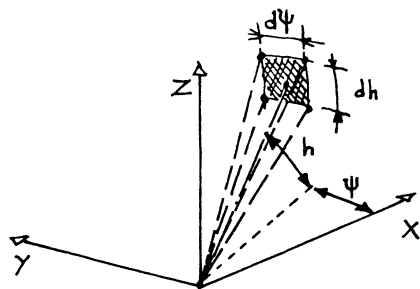
Le deuxième concept, qui est plus important pour la conception du système, a d'autant plus d'intérêt qu'il représente la statistique de l'endroit où l'on va implanter l'ensemble.

La distribution de l'énergie fournie statistiquement par le soleil suivant la position angulaire qu'il occupe permet en effet de tenir compte du microclimat local (brume matinale, masquage par un relief voisin, etc...) et de pondérer avec justesse l'efficacité du champ de réflecteurs dont l'orientation dépend de la position du soleil (pour une position de récepteur donnée).

Cette distribution se représente par une fonction du type : $e(h, \psi)$ (W.h/m²/str).

L'énergie contenue dans le cône défini par la direction (h, ψ) et les éléments d'angle $(dh, d\psi)$ est alors :

$$E = e(h, \psi) \cdot dh d\psi \cos h.$$



La figure 3 montre l'allure de cette fonction calculée pour un modèle de flux solaire à la latitude de $42,5^\circ$, ce type de relevé météorologique n'ayant pas été fait jusqu'alors.

4.2 CHAMP DE RÉFLECTEURS [3, 4, 5]. — 4.2.1 *Conception du modèle de champ.* — Un champ de réflecteurs composé d'un grand nombre d'éléments présente à un instant donné, c'est-à-dire pour une certaine position du soleil, une surface réfléchissante utile qui résulte de l'effet d'orientation des réflecteurs et des différentes ombres. Il s'agit de connaître pour chaque position du soleil la valeur de cette surface réfléchissante utile.

On s'intéresse à la description d'un champ de réflecteurs sous la forme d'une fonction de transfert entre le flux solaire et le flux concentré sur le récepteur. On cherche donc une expression S qui permette d'écrire à un instant donné :

LATITUDE : 42.5°
 ENERGIE DIRECTE (KWH/M2) : 1681.2
 NOMBRE D'HEURE TOTAL : 2473.

NOMBRE D'HEURE PAR NIVEAUX (W/M2) :

100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
164.	138.	158.	177.	200.	229.	330.	497.	529.	51.

ENERGIE (KWH/M2) COMPRISE DANS DES SECTEURS ANGULAIRES
 DE 10 DEGRES EN AZIMUT ET 5 DEGRES EN SITE, DE -120
 DEGRES 'EST' A $+120$ DEGRES 'OUEST' ET 0 A 75 DEGRES
 SUR L'HORIZON:

OUEST	120°	.0	3.6	3.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
		.0	5.2	11.4	12.3	5.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
30°		.8	5.4	6.8	8.5	13.6	12.8	8.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
		.7	3.9	6.7	7.5	7.8	8.4	10.8	15.4	8.9	.0	.0	.0	.0	.0	.0
60°		.8	4.2	5.9	6.6	7.9	7.6	7.5	7.0	9.4	13.9	4.2	.0	.0	.0	.0
		1.3	5.5	6.6	6.9	6.5	7.4	7.1	6.9	6.5	6.9	12.0	6.6	.0	.0	.0
30°		.6	9.1	9.4	8.8	7.0	6.4	6.7	7.2	7.5	6.5	6.1	10.5	5.6	.0	.0
		.0	5.8	16.7	10.6	10.0	7.6	6.1	7.6	6.0	5.8	6.7	6.1	8.5	3.5	.0
0°		.0	.0	.0	6	20.9	10.1	10.9	6.7	5.4	5.6	6.6	3.9	5.9	6.6	6.9
		.0	.0	.0	.0	3.2	22.0	10.3	8.3	5.6	6.5	4.2	6.5	3.9	5.9	8.0
30°		.0	.0	.0	.0	11.9	12.1	11.3	6.3	5.3	5.7	3.0	6.2	5.3	7.2	1.6
		.0	.0	.0	.0	11.8	16.0	8.0	6.9	5.2	6.4	6.3	3.8	3.5	6.2	2.9
60°		.0	.0	.0	.0	11.8	16.0	8.0	6.9	5.2	6.4	6.4	3.8	3.5	6.2	2.9
		.0	.0	.0	.0	11.8	12.0	11.4	6.4	5.2	5.7	3.1	6.2	5.4	7.3	1.6
30°		.0	.0	.0	3.1	21.8	10.3	8.3	5.6	6.5	4.2	6.5	3.9	6.0	8.0	.0
		.0	.0	.6	20.7	10.1	11.0	6.8	5.4	5.5	6.6	3.9	6.0	6.6	6.9	.0
60°		.0	5.7	16.6	10.6	10.0	7.6	6.1	7.6	6.1	5.9	6.6	6.0	8.6	3.5	.0
		1.7	9.1	9.4	8.8	7.0	6.4	6.7	7.3	7.6	6.5	6.1	10.5	5.7	.0	.0
30°		1.3	5.5	6.5	6.8	6.5	7.4	7.3	6.9	6.4	6.9	12.0	6.6	.0	.0	.0
		.8	4.2	5.8	6.7	8.1	7.8	7.5	6.9	9.4	13.9	4.1	.0	.0	.0	.0
60°		.5	4.0	6.9	7.6	7.7	8.2	10.6	15.3	8.8	.0	.0	.0	.0	.0	.0
		.0	4.9	6.8	8.4	13.5	12.6	8.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
120°		.0	4.1	11.4	12.3	5.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
		.0	3.0	3.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
EST		0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°							

Fig. 3. — Distribution angulaire de l'énergie solaire. Répartition de l'ensoleillement.

[Angular distribution of solar energy.]

$$\left. \begin{array}{l} \text{Puissance réfléchi vers le} \\ \text{point de concentration} \end{array} \right\} = \text{flux solaire} \times \frac{S}{(\text{watts/m}^2) \times (\text{m}^2)} \quad (\text{watts})$$

On voit que S a les dimensions d'une surface et qu'il représente la surface réfléchissante utile (surface efficace) du champ.

Pour trouver cette expression S , on modélise l'ensemble forme de la direction du flux solaire, du champ de réflecteurs et de la position du point de concentration par (Fig. 4) :

- Des zones de terrain S_0 dont la pente est caractérisée par le vecteur unitaire ϵ normal au plan de la zone.

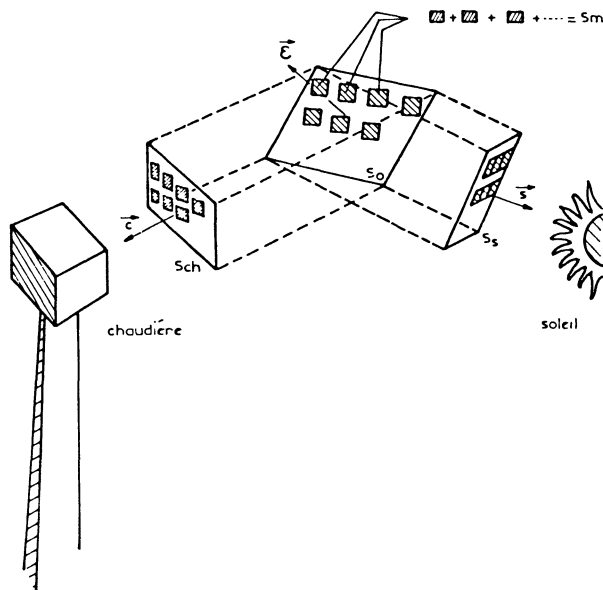


Fig. 4. — Schéma de modélisation d'un champ de réflecteurs et exemple d'implantation.

[Schematic representation of the field model.]

- La surface de réflecteurs S_m installée sur la zone de terrain S_0 .
- Le vecteur unitaire c dirigé de la zone de terrain vers le point de concentration.
- Le vecteur unitaire s dirigé de la zone de terrain vers le soleil.

Le soleil distribuant son énergie sous forme de flux, ce que l'on en recueille dépend de la surface qui intercepte ou transmet ce flux. En particulier, lorsque plusieurs surfaces sont susceptibles de capter ou transmettre ledit flux, ce que l'on recueille est limité par la plus petite d'entre elles.

Or, deux surfaces sont susceptibles de *capter* le flux solaire (Fig. 4) :

- soit la surface apparente de la zone de terrain vue du soleil : $S_0 \cos(\epsilon, s)$,
- soit la surface apparente de réflecteurs (installée sur la zone de terrain) vue du soleil :

$$S_m \cos[(s, c)/2] \quad (\text{loi de la réflexion}).$$

D'autre part, deux surfaces sont susceptibles de *transmettre* le flux solaire :

- soit la surface apparente de réflecteurs (installée sur la zone de terrain) vue du point de concentration :

$$S_m \cdot \cos[(s, c)/2] \quad (\text{identique à celle vue du soleil}),$$

- soit la surface apparente de la zone de terrain vue du point de concentration :

$$S_0 \cdot \cos(\epsilon, c).$$

Le flux capté et transmis vers le point de concentration est donc celui qui passe par la plus petite de ces trois surfaces apparentes qui est la surface réfléchissante utile, relative à la zone de terrain S_0 , soit :

$$\Delta S = \text{minimum de } \left\{ \underbrace{S_0 \cos(\epsilon, s)}_{\text{réception}} ; \underbrace{S_m \cos[(s, c)/2]}_{\text{transmission}} ; \underbrace{S_0 \cos(\epsilon, c)}_{\text{du flux}} \right\}$$

L'expression de la surface efficace du champ s'obtient en sommant sur les « i » zones composant celui-ci :

$$S = \sum_i \Delta S_i.$$

Les « i » zones étant choisies de façon que les vecteurs c et ϵ ne varient pas trop sur leur étendue ⁽²⁾.

Cette expression inclut l'influence de la pente ϵ de la position du récepteur c , de la trajectoire du

soleil s et tient compte des effets d'ombre et cosinus comme on le verra plus loin.

4.2.2 Synthèse du modèle de champ. — La formulation précédente permet de concevoir la forme du champ et la répartition des réflecteurs pour obtenir une performance donnée. On peut définir une variable utilisable dans un algorithme d'implantation des réflecteurs et réaliser ainsi la synthèse du modèle de champ obtenu.

On appelle cette variable le *taux de remplissage* des zones ; elle est définie comme le rapport entre la

⁽²⁾ On trouvera dans la référence [3] un exposé plus rigoureux de ce modèle.

surface de réflecteurs installée dans une zone et la surface de cette zone vue du récepteur :

taux de remplissage =

$$= \frac{\text{surface de réflecteur dans la zone}}{\text{surface de la zone vue du récepteur}}$$

$$\tau = \frac{S_m}{S_0 \cos(\epsilon, c)}$$

La détermination par des méthodes adéquates ⁽³⁾ de ce taux de remplissage pour chaque zone du champ fournit le champ adapté à un certain nombre de contraintes données. L'implantation des réflecteurs s'obtient alors comme suit :

- en coordonnée sphérique on peut écrire (Fig. 5) :

$$S_0 \cos(\epsilon, c) = D^2 \cdot \cos A \cdot \Delta A \cdot \Delta \psi$$

Si l'on prend pour S_m la surface d'un réflecteur, il vient :

$$S_m = L \cdot H \quad \begin{array}{l} L = \text{largeur du réflecteur} \\ H = \text{hauteur du réflecteur} \end{array}$$

d'où :

$$\tau = \frac{L \cdot H}{D^2 \cos A \cdot \Delta A \cdot \Delta \psi}$$

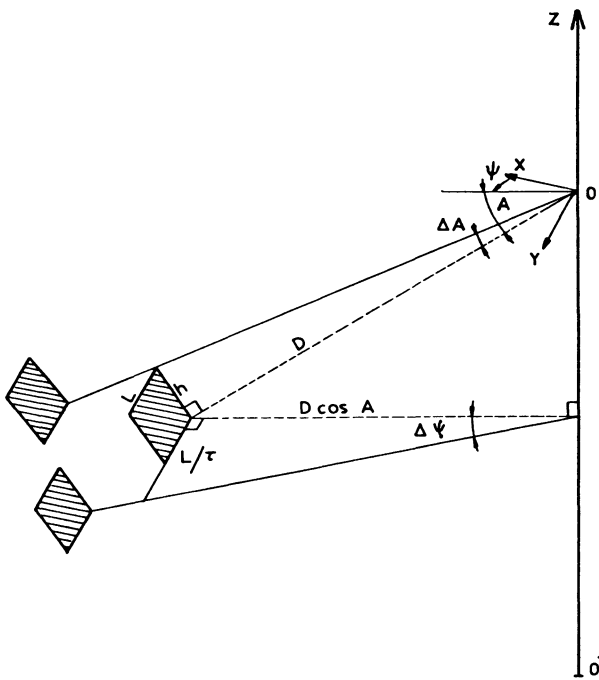


Fig. 5. — Schéma d'implantation des réflecteurs.

[Implantation of heliostats.]

⁽³⁾ Voir paragraphe 5 et figure 9.

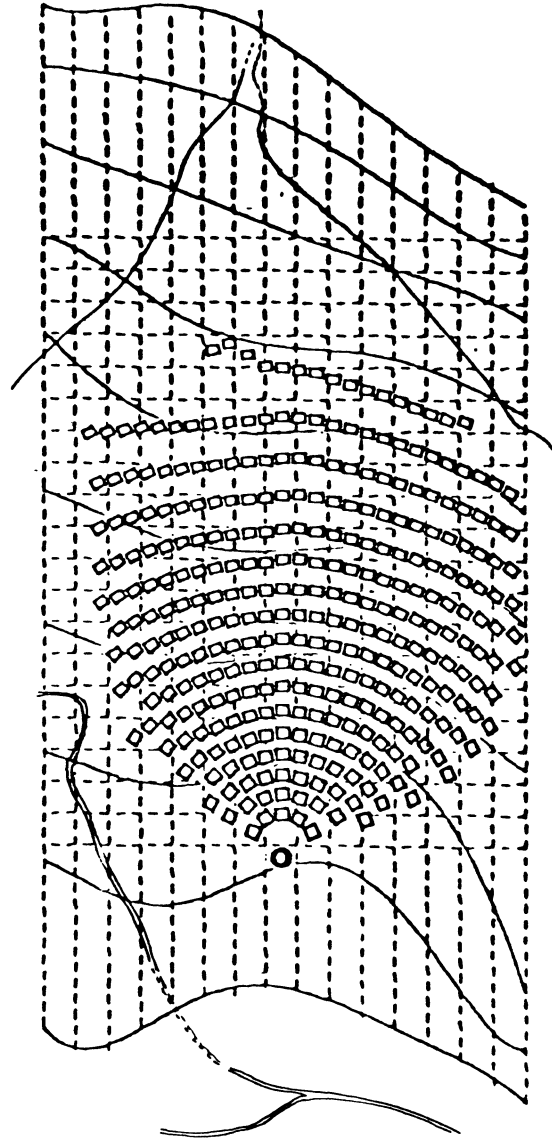


Fig. 5bis. — Implantation type (325 héliostats).

[Result of the implantation method.]

Si l'on plante arbitrairement un premier réflecteur, les réflecteurs voisins sont définis par :

$$\Delta A = H/(\tau_H \cdot D)$$

$$\Delta \psi = L/(\tau_L \cdot D \cdot \cos A)$$

avec :

$$\tau = \tau_H \cdot \tau_L$$

La répartition τ_H, τ_L dépend du réflecteur, qui n'est pas forcément rectangulaire, de son encombrement au sol, etc... Ce point sera précisé plus loin dans le paragraphe 4.4.3.

4.2.3 Développement succinct du modèle (ombre, puissance et énergie, rendement). — On précise dans les lignes qui suivent quelques implications du modèle présenté ici.

4.2.3.1 *Effet d'ombre.* — On distingue plusieurs cas :

a) A la réception du flux (*toute surface vue du soleil*).

• Surface apparente de la zone de terrain < surface apparente de réflecteur sur la zone, soit

$$S_0 \cos(\epsilon, s) < S_m \cos[(s, c)/2].$$

On ne peut utiliser toute la surface des réflecteurs, il y a de l'ombre à l'incidence.

• Surface apparente de la zone de terrain > surface apparente de réflecteur sur la zone, soit

$$S_0 \cos(\epsilon, s) > S_m \cos[(s, c)/2].$$

Dans ce cas, on ne subit, à la réception, que l'effet *cosinus* traduit par : $\cos[(s, c)/2]$.

b) La transmission du flux (*toute surface vue du récepteur*).

• Surface apparente de la zone de terrain < surface apparente de réflecteur sur la zone, soit

$$S_0 \cos(\epsilon, c) < S_0 \cos[(s, c)/2].$$

De même, on ne peut utiliser toute la surface des réflecteurs. Il y a cette fois *ombre à l'émergence* (blocage) :

• Surface apparente de la zone de terrain > surface apparente de réflecteur sur la zone, soit

$$S_0 \cos(\epsilon, c) > S_0 \cos[(s, c)/2].$$

On ne subit, à la transmission, que l'effet *cosinus*.

4.2.3.2 *Puissance et énergie.* — A l'instant t à la latitude λ , le flux solaire a pour intensité : $P_\lambda(t)$ et pour direction : $s = S(t)$.

Dans une zone « i » donnée, la puissance renvoyée vers le récepteur est :

$$P_i = P_\lambda(t) \min [S_{0i} \cos(\epsilon_i, c_i); S_{mi} \cos[(s, c_i)/2]; S_{0i} \cos(\epsilon_i, s)].$$

Soit en faisant intervenir le taux de remplissage :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_i = \frac{S_{mi}}{S_{0i} \cos(\epsilon_i, c_i)} \\ P_i = P_\lambda(t) \min \left[1; \tau_i \cos[(s, c_i)/2]; \frac{\cos(\epsilon_i, s)}{\cos(\epsilon_i, c_i)} \right] \times S_{0i} \cos(\epsilon_i, c_i). \end{array} \right.$$

On constate que :

• si le taux de remplissage est inférieur à 1, le terme $\tau_i \cos[(s, c_i)/2]$ est toujours inférieur à 1 et l'expression devient :

$$P = P_\lambda(t) \min \times \left[\tau_i \cos[(s, c_i)/2]; \frac{\cos(\epsilon_i, s)}{\cos(\epsilon_i, c_i)} \right] S_{0i} \cos(\epsilon_i, c_i).$$

Le terme correspondant aux ombres à l'émergence est éliminé :

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour des taux de remplissage inférieur à 1, il n'y a pas d'ombre à l'émergence (blocage) dans le champ;} \end{array} \right.$

• si le taux de remplissage devient très grand ⁽⁴⁾ le terme $\tau_i \cos[(s, c_i)/2]$ s'élimine pratiquement de l'expression qui devient :

$$P = P_\lambda(t) \min \left[1, \frac{\cos(\epsilon_i, s)}{\cos(\epsilon_i, c_i)} \right] S_{0i} \cos(\epsilon_i, c_i).$$

On est toujours en présence d'ombre, la surface de réflecteur n'influe plus. En pratique, cela veut dire que du récepteur on ne voit que de la surface réfléchissante, on est au maximum d'utilisation de la zone :

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour des taux de remplissage très supérieur à 1, seule la surface apparente de terrain vue du récepteur intervient dans les performances.} \end{array} \right.$

Sur une durée T l'énergie fournie par la zone « i » est :

$$E_i = \int_T P_\lambda(t) \cdot \min [S_{0i} \cos(\epsilon_i, c_i); S_{mi} \cos[(s, c_i)/2]; S_{0i} \cos(\epsilon_i, s)] dt$$

que l'on peut séparer en :

$$E_i = S_{mi} \int_{T_1} P_\lambda(t) \cdot \cos[(s, c_i)/2] dt + S_{0i} \int_{T_2} P_\lambda(t) \cdot \min [\cos(\epsilon_i, c_i); \cos(\epsilon_i, s)] dt$$

avec :

$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = \text{ensemble des instants sans ombre} \\ T_2 = \text{ensemble des instants avec ombre (incidence et émergence).} \end{array} \right.$

Ce qui peut s'écrire en fonction du taux de remplissage :

$$E_i = S_{mi} \left\{ \int_{T_1} P_\lambda(t) \cdot \cos[(s, c_i)/2] dt + \frac{1}{\tau_i} \int_{T_2} P_\lambda(t) \cdot \min \left[1, \frac{\cos(\epsilon_i, s)}{\cos(\epsilon_i, c_i)} \right] dt \right\}.$$

Il faut remarquer que les ensembles T_1 et T_2 ne sont pas disjoints : d'une part leur réunion représente la durée totale d'ensoleillement et ce qu'ils contiennent dépend du taux de remplissage :

⁽⁴⁾ Un taux très supérieur à 1 est possible mais physiquement inutile.

- Si le taux est très faible, il n'y a jamais d'ombre et :

$$\tau \rightarrow 0 \Rightarrow \begin{cases} T_1 \simeq T & \text{— effet cosinus du réflecteur isolé} \\ T_2 \simeq \emptyset & \text{— jamais d'ombre.} \end{cases}$$

- Si le taux est très fort, il y a toujours de l'ombre et :

$$\tau > 1 \Rightarrow \begin{cases} T_1 \simeq \emptyset & \text{— jamais d'effet cosinus} \\ T_2 = T & \text{— ombre en permanence.} \end{cases}$$

4.2.3.3 *Rendement.* — Pour une zone « i » donnée, le rendement énergétique de l'unité de surface de réflecteur est défini comme :

$$y_i = \frac{E_i}{E_s \cdot S_{m_i}}$$

où : E_s représente l'énergie du flux solaire recueillie sur un mètre carré exposé normalement au flux pendant une durée T .

$$E_s = \int_T P_\lambda(t) \cdot dt$$

soit, ici :

$$y_i = \frac{1}{E_s} \cdot \int_{T_1} P_\lambda(t) \cdot \cos[(s, c_i)/2] dt + \frac{1}{\tau_i} \cdot \frac{1}{E_s} \cdot \int_{T_2} P_\lambda(t) \min\left(1, \frac{\cos(\epsilon_i, s)}{\cos(\epsilon_i, c_i)}\right) dt$$

qui se met sous la forme :

$$y_i = R_{c_i} + \frac{1}{\tau_i} \cdot R_{0_i}$$

où :

$$R_{c_i} = \frac{1}{E_s} \cdot \int_{T_1} P_\lambda(t) \cdot \cos[(s, c_i)/2] dt$$

représente le *rendement énergétique par effet cosinus calculé sur les instants sans ombre* (si le taux est très faible on obtient le rendement cosinus du réflecteur isolé).

$$R_{0_i} = \frac{1}{E_s} \cdot \int_{T_2} P_\lambda(t) \cdot \min\left[1, \frac{\cos(\epsilon_i, s)}{\cos(\epsilon_i, c_i)}\right] dt$$

représente le *rendement énergétique du mètre carré apparent de terrain vu du récepteur, calculé pendant les instants avec ombre* (si le taux est très fort, toute surface de réflecteur en plus est inutile car toujours à l'ombre. Le rendement « y_i » décroît en $1/\tau_i$, c'est-à-dire en $1/S_{m_i}$).

Si l'on définit pour l'ensemble du champ des rendements moyens identiques :

$$R_c = \frac{\sum_i S_{m_i} \cdot R_{c_i}}{\sum_i S_{m_i}} \quad \text{et} \quad R_0 = \frac{\sum_i S_{0_i} \cdot \cos(\epsilon_i, c_i) R_{0_i}}{\sum_i S_{0_i} \cdot \cos(\epsilon_i, c_i)}$$

l'énergie fournie par le champ est alors :

$$E = \sum E_i = (S_m \cdot R_c + S_M \cdot R_0) E_s$$

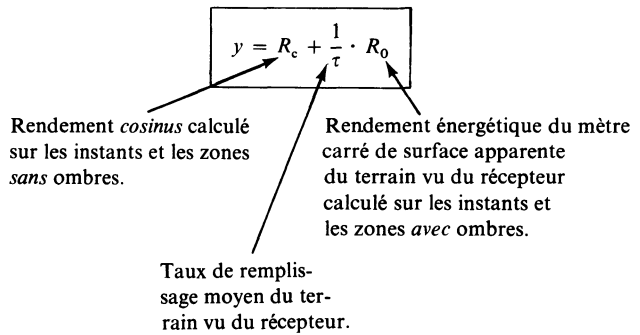
où :

$$S_m = \sum_i S_{m_i} = \text{surface totale de réflecteur installée}$$

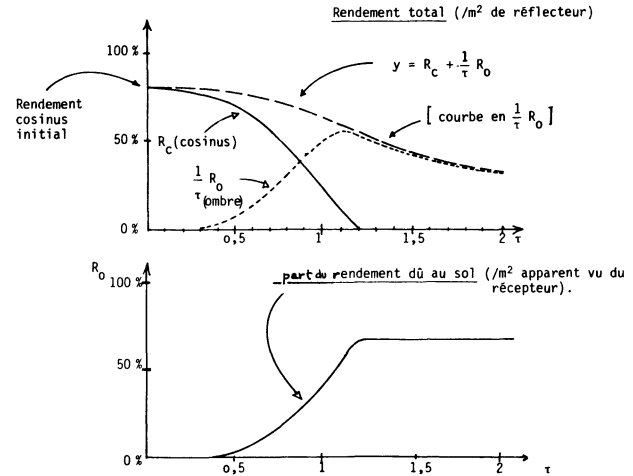
$$S_M = \sum_i S_{0_i} \cdot \cos(\epsilon_i, c_i)$$

= surface apparente du terrain vu du récepteur ,
(= surface réfléchissante utile maximale) ,

et le rendement devient :



L'allure générale de la variation de ce rendement est la suivante :



4.3 LE RÉCEPTEUR. — 4.3.1 *Insertion du récepteur dans le modèle.* — Au point de vue abordé ici et comme signalé plus haut, la caractéristique du récepteur qui importe est la surface de captation du flux réfléchi et le niveau des pertes par unité de surface de captation.

Le problème posé est donc l'évaluation de la surface nécessaire à la captation du flux réfléchi par un champ donné. On ne se pose pas le problème de l'évaluation des pertes du récepteur, problème que l'on laisse aux concepteurs du récepteur, quitte à reconsidérer le problème global pour arriver à un compromis optimal entre les performances thermiques en aval et les performances optiques en amont.

On reportera sur les réflecteurs les pertes par réflexion parasites de la chaudière et on ne considérera que les pertes par rayonnement et convection.

Soit :

$$\begin{cases} S_r = \text{surface de captation du récepteur.} \\ P_r = \text{la perte moyenne en puissance par mètre carré de surface de réception.} \end{cases}$$

Sur l'année, la perte énergétique due à la chaudière est donc :

$$S_r \int_T P_r \cdot dt = S_r \cdot E_r$$

où E_r = perte énergétique/m².

L'énergie recueillie par l'ensemble champ/récepteur est alors :

$$E_{\text{tot}} = E - E_r \cdot S_r$$

et le rendement énergétique est :

$$y_{\text{tot}} = \frac{E_{\text{tot}}}{E_s \cdot S_m} = y - \frac{E_r \cdot S_r}{E_s \cdot S_m}$$

Si l'on définit la concentration géométrique par :

$$C = S_m / S_r$$

et la perte énergétique relative du récepteur par :

$$e_r = \frac{\text{énergie perdue par m}^2 \text{ de récepteur}}{\text{énergie directe fournie par le soleil par m}^2} = \frac{E_r}{E_s}$$

en désignant par ρ le coefficient de réflexion des surfaces réfléchissantes, l'expression du rendement énergétique devient :

$$y_{\text{tot}} = \rho \left(R_c + \frac{1}{\tau} \cdot R_0 \right) - \frac{e_r}{c}$$

Diagram illustrating the components of the equation:

- ρ : coefficient de réflexion
- R_c : rendement dû à l'effet cosinus calculé sur les zones et les instants sans ombres.
- $\frac{1}{\tau} \cdot R_0$: rendements dus aux effets d'ombre, calculés sur les zones et les instants avec ombre.
- $\frac{e_r}{c}$: perte relative chaudière
- c : concentration géométrique
- τ : taux de remplissage moyen du champ

Il s'agira donc d'optimiser cette expression.

4.3.2 Evaluation de la surface nécessaire du récepteur. — Pour un type de réflecteur donné on peut considérer, comme évaluation de la surface nécessaire, la surface qui contient l'ensemble des taches lumineuses fournies par chaque réflecteur à chaque instant. Si l'on nomme tache énergétique d'un réflecteur, la tache résultant du cumul des taches instantanées, la surface de captation peut être définie par la surface limitée par la courbe enveloppe des contours

de toutes les taches énergétiques des réflecteurs formant le champ.

Le point délicat est la définition de la tache énergétique d'un réflecteur et son estimation. On reprendra ce point au paragraphe suivant.

4.4 LES RÉFLECTEURS. — **4.4.1 Calcul du flux réfléchi (distribution-intensité).** — La surface réfléchissante de l'héliostat considéré est approximée par un certain nombre de facettes planes dont les dimensions sont fonction du rayon de courbure de la surface réelle. Si l'héliostat réel est lui-même formé de facettes, le choix de ces dernières pour le calcul est évident.

L'intensité du flux réfléchi par une facette en un point donné est une fraction du flux solaire qui correspond au rapport entre la surface commune de la facette avec la projection (suivant la direction du flux réfléchi) du disque de divergence du flux solaire au point d'observation, et la surface totale du disque solaire (Fig. 6).

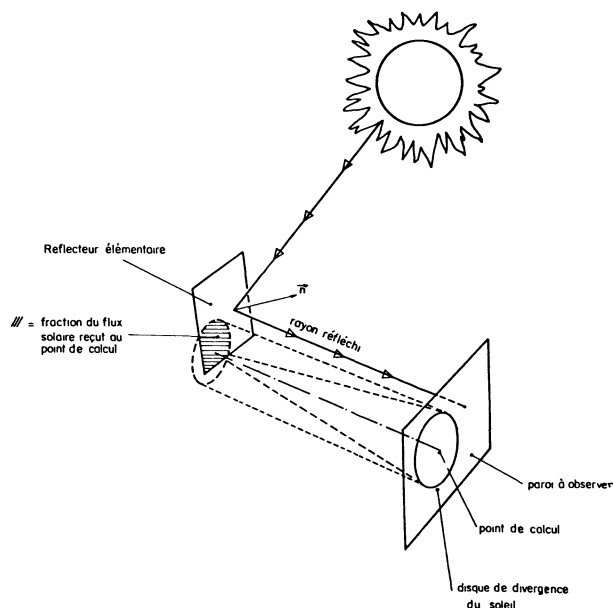
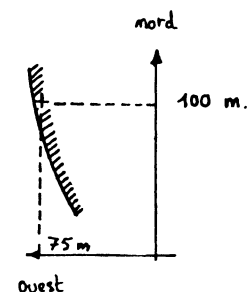
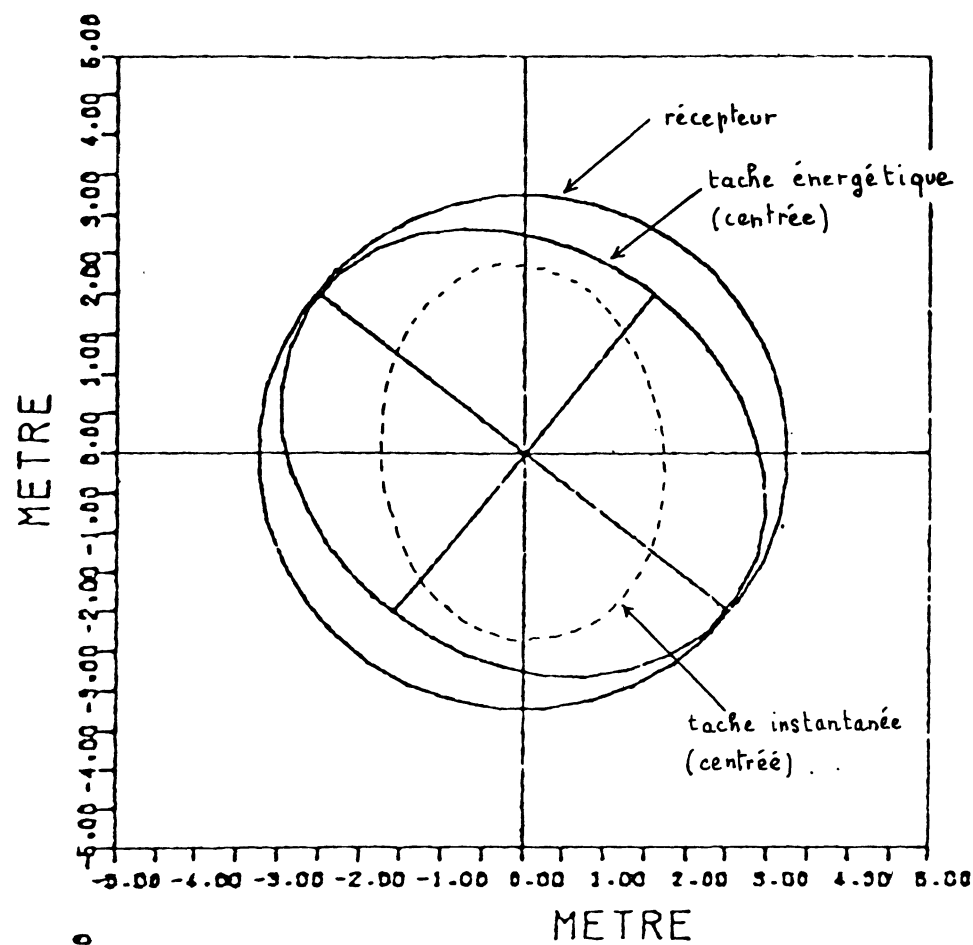


Fig. 6. — Principe du calcul du flux réfléchi par un héliostat. [Flux calculus.]

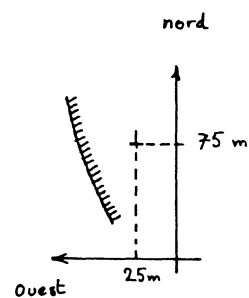
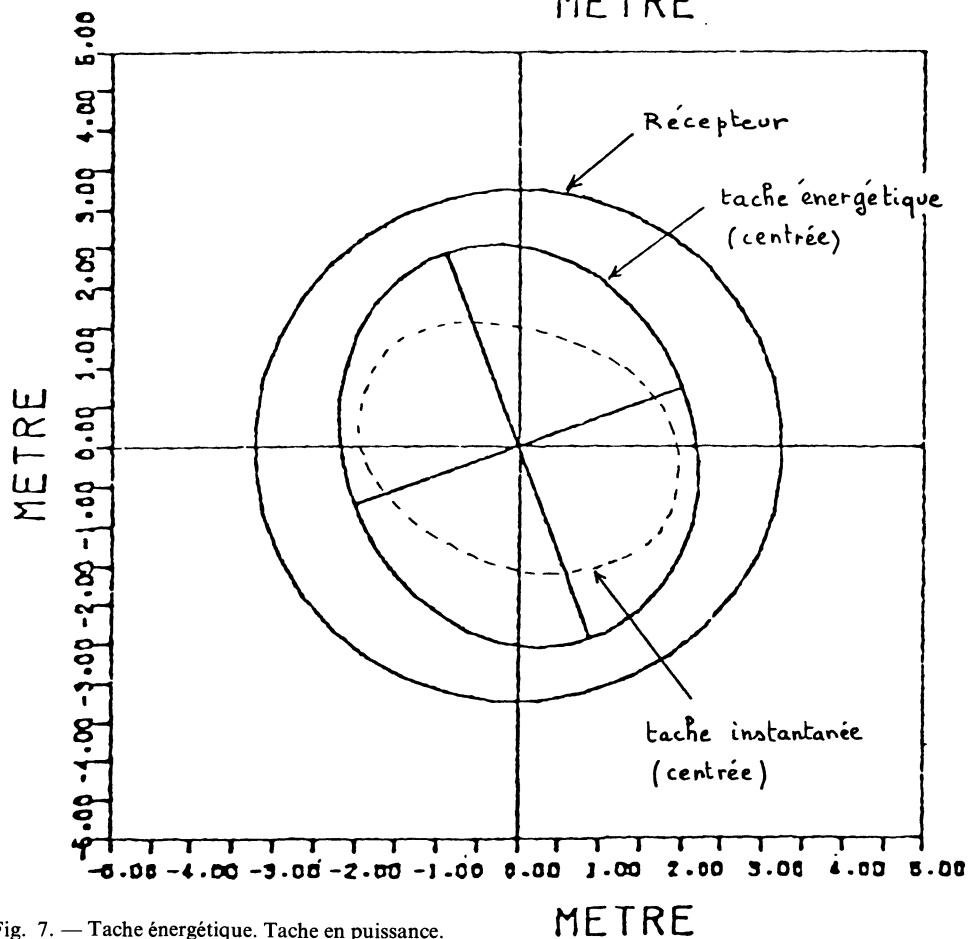
Le flux total en un point est le cumul de ce résultat pour toutes les facettes composant l'héliostat. Plusieurs méthodes approchantes ont été proposées ; elles donnent des résultats plus ou moins précis mais généralement satisfaisants [6, 7] et sont beaucoup plus rapides que la méthode exacte ⁽⁵⁾.

4.4.2 Choix de la définition de la tache énergétique. — La tache énergétique fournie par un héliostat, cumul de toutes les taches instantanées, résulte de plusieurs facteurs. Les plus significatifs sont :

⁽⁵⁾ La précision des divers modèles est difficile à évaluer vis-à-vis d'une distribution réelle de flux, cette dernière n'ayant à l'heure actuelle fait l'objet que de très peu de mesure.



- Réflecteur en bord de champ



- Réflecteur à l'intérieur du champ

Fig. 7. — Tache énergétique. Tache en puissance.

[Relative size and position of energetic spot and power spot of heliostat *versus* size of receiver.]

- les dimensions du réflecteur,
- le type de réflexion (focalisation),
- la stabilité et la précision de l'orienteur.

Le choix de la focale sera abordé plus loin. Les dimensions du réflecteur ont fait l'objet d'études technico-économiques [10] qui ont conduit à des dimensions dites optimales. Les critères sont valables au niveau du réflecteur individuel ; il faudrait reprendre ces études au niveau du champ global. On peut montrer, en effet, que les dimensions des taches fournies par un réflecteur augmentent plus que proportionnellement avec les dimensions et donc accroissent la surface nécessaire de captation du récepteur.

La stabilité et la précision de l'orienteur doivent évidemment être les meilleures possible mais leur modélisation est extrêmement délicate. En effet, la distribution statistique dans le temps et l'espace de l'écart par rapport au point de visée dépend du type de monture (Alt-azimutale, équatoriale, etc...) de la direction de visée par rapport aux axes de rotation, de la réalisation technologique des mouvements.

Enfin, la limite utile des taches énergétiques est située à un niveau tel que les pertes correspondantes au niveau du récepteur soient au moins compensées. Cette limite est très délicate à déterminer sinon impossible en raison des imprécisions sur l'évaluation des pertes du récepteur et sur la distribution de la tache énergétique d'un réflecteur.

On choisit donc d'évaluer le contour de la tache énergétique d'un réflecteur par la courbe définissant la plus petite surface contenant 100 % de l'énergie réfléchi par le réflecteur, calculée en fonction de sa position dans le champ au cours d'une année type modélisée, en faisant l'hypothèse que le réflecteur vise parfaitement le centre du récepteur à tout instant.

Une justification de ce choix réside en ce qui suit :

- la surface résultante pour le récepteur est telle que la majorité des réflecteurs disposent d'une marge suffisante pour absorber des stabilités et précisions technologiquement réalisables (Fig. 7),

- on peut appliquer, après la détermination de la surface *nécessaire* de réception, une procédure de détermination de la surface *utile* de récepteur en faisant des hypothèses plus précises sur les pertes thermiques et sur les qualités de pointage des réflecteurs [8].

Le type d'évaluation choisi donne des résultats qui sont cohérents avec les dimensions ordinairement déterminées et permet surtout d'évaluer l'influence des zones du champ vis-à-vis de la variation de la surface nécessaire de captation qui leur est due ⁽⁶⁾.

4.4.3 Caractéristiques principales du réflecteur (point de vue de l'implantation). — Dans le modèle de champ, on ne fait aucune hypothèse sur les valeurs

que peut prendre le taux de remplissage. Il apparaît déjà dans l'algorithme d'implantation une certaine répartition du taux. En pratique, la constitution du réflecteur et son encombrement au sol imposent une limite au taux de remplissage et à sa répartition.

En effet, le problème de l'implantation est de remplir la surface apparente vue du récepteur avec des éléments de forme quelconque a priori (forme du réflecteur) et de dimension apparente décroissante avec la distance de l'élément au récepteur.

On s'aperçoit rapidement que pour remplir au mieux le terrain disponible, il faut disposer les réflecteurs en rangées courbes résultant de l'assemblage de mailles *rectangulaires* contenant le réflecteur (Fig. 8).

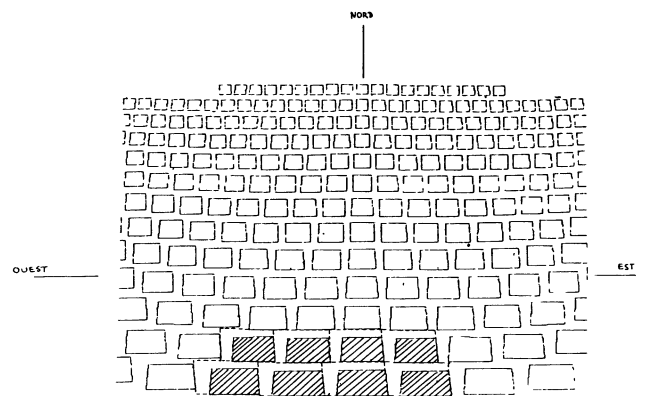


Fig. 8. — Maille associée à un réflecteur.

[Aspect of a field seen from the receiver.]

Comme indiqué au paragraphe *Synthèse du modèle de champ*, les dimensions de cette maille rectangulaire sont définies par :

$$\Delta\psi = L/(\tau_L \cdot D \cdot \cos A)$$

$$\Delta A = H/(\tau_H \cdot D)$$

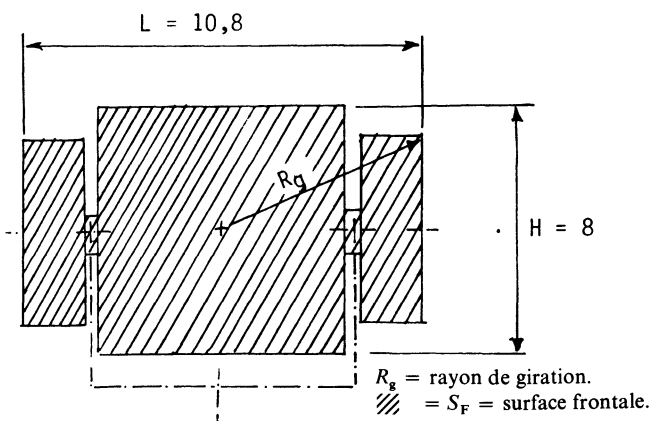
avec

$$\tau = \tau_L \times \tau_H = \frac{\text{surface réflecteur}}{\text{surface de la maille}}$$

(les valeurs de τ et ΔA ou $\Delta\psi$ permettent de déterminer τ_L et τ_H).

On va préciser en quoi les dimensions du réflecteur, sa *surface frontale*, son *rayon de giration* influent sur le taux de remplissage.

Soit à titre d'exemple le réflecteur fictif suivant :



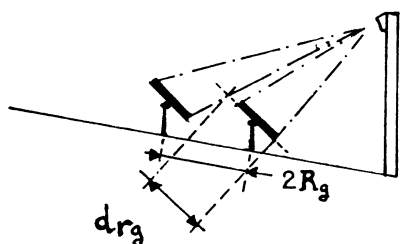
⁽⁶⁾ Il apparaît ici que le choix des zones constituant le modèle du champ devra également être tel que la tache énergétique des réflecteurs installables dans une zone reste sensiblement constante.

On appelle *surface frontale* l'ensemble de la surface hachurée S_F c'est-à-dire le total des surfaces interceptant le flux solaire.

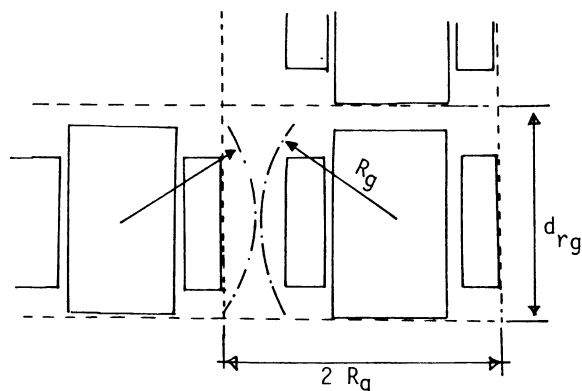
On appelle hauteur du réflecteur la dimension verticale H du panneau mobile et largeur la dimension horizontale L .

Enfin, le rayon de giration est le rayon du plus grand cercle nécessaire à l'héliostat pour ses rotations diverses.

Dans le sens vertical, le fait qu'il faille laisser entre deux rangées au moins la place nécessaire à la libre rotation, provoque une limitation mécanique.



Cette même raison intervient entre les réflecteurs voisins dans le sens horizontal et finalement, vu du récepteur, l'ensemble maille/réflecteur apparaît sous la forme :



d_{rg} = distance (telle que le rayon de giration soit respecté).

et le taux de remplissage maximum réalisable est :

$$\tau_m = \frac{\text{surface frontale du réflecteur}}{\text{surface de la maille}} = \frac{S_F}{2 R_g \cdot d_{rg}}$$

La distance d_{rg} , telle que le rayon de giration soit respecté, est dépendante de la position des rangées par rapport au récepteur et si elle est inférieure à la hauteur H du réflecteur, la maille est pratiquement limitée par cette dernière et le taux maximum est :

$$\tau_m = \frac{S_F}{2 R_g \cdot H}$$

En anticipant sur les résultats de l'optimisation du champ, on s'aperçoit qu'au-delà d'une certaine distance de la tour il faut s'efforcer de réaliser des taux de remplissage proches de 1. Les réflecteurs

compacts, présentant un faible rayon de giration, sont alors avantageux.

Il faut noter qu'au point de vue de la conception du champ c'est la surface frontale qui est prise en compte pour les ombres et pas seulement la surface de matériau réfléchissant. On conçoit évidemment que, pour un héliostat comportant d'importantes parties opaques sur la surface frontale, les pertes par ombres rapportées à la surface réfléchissante sont plus importantes que pour un héliostat offrant une surface frontale totalement réfléchissante.

Le rapport surface réfléchissante/surface frontale peut être considéré comme un coefficient de réflexion apparent et donne une idée de la dégradation de l'efficacité du réflecteur.

Pour le réflecteur représenté plus haut, on obtient :

largeur	$L = 10,8 \text{ m}$
hauteur	$H = 8,0 \text{ m}$
rayon de giration	$R_g = 6,18 \text{ m}$
surface frontale	$S_F = 72,32 \text{ m}^2$
surface réfléchissante	$S_M = 71,16 \text{ m}^2$

Proche de la tour, la distance « d_g » vaut sensiblement $2 R_g$, d'où, en surface réfléchissante :

• taux de remplissage maximum proche de la tour :

$$\tau_1 \max = \frac{S_F}{4 R_g^2} \times \frac{S_M}{S_F} = 0,474 \times 0,984 = 0,466$$

et loin de la tour, la distance d_g est limitée à H , d'où :

• taux de remplissage maximum loin de la tour :

$$\tau_2 \max = \frac{S_F}{2 R_g \cdot H} \times \frac{S_M}{S_F} = 0,732 \times 0,984 = 0,720$$

Les conséquences de ces chiffres sont illustrées par l'exemple suivant. Pour deux héliostats ayant les caractéristiques suivantes :

	$S_M/4 R_g^2$	$S_M/2 R_g \cdot H$
Héliostat 1	0,487	0,688
Héliostat 2	0,364	0,552

A qualités optiques égales (coefficient de réflexion, image énergétique, etc...), l'implantation pour obtenir 17 000 m² de surface réfléchissante, demande entre 1,5 et 2 hectares de terrain en plus pour l'héliostat 2. Ceci se traduit par une surface nécessaire de réception plus grande et une légère dégradation du rendement. Cette tendance s'accroît de plus en plus quand la surface à installer s'accroît.

On voit que les réalisations technologiques des réflecteurs ne sont pas des caractéristiques négligeables dans la réalisation du champ.

5.5 CONCLUSION SUR LE MODÈLE. — Ce modèle a été utilisé pour la conception des centrales du programme THEM (EDF-C.N.R.S.). Sa vérification

par d'autres modèles, calculant pour chaque héliostat les ombres de ses voisins, a donné des résultats en bon accord, montrant que la synthèse du modèle par le programme d'implantation ne provoque pas de distorsion notable vis-à-vis des calculs avec les taux de remplissage locaux. Cette concordance est d'autant meilleure que le nombre de réflecteurs dans le champ est grand.

5. Optimisation du système soleil-champ-récepteur.

— 5.1 CONDITIONS DE L'OPTIMISATION. — On se place dans le contexte suivant : pour un certain nombre d'éléments fixés on cherche la forme du champ et la distribution des taux de remplissage des zones du champ qui maximise le rendement énergétique. Les éléments choisis à priori sont faciles à faire varier pour obtenir d'autres situations optimales (excepté le relief).

Les choix à priori ou résultats d'optimisations partielles sont :

- la latitude et le terrain (il en résulte le micro-climat),
- le type d'héliostat (dimension, qualité de réflexion, etc...),
- la hauteur de la tour,
- l'inclinaison de la surface de réception et le niveau des pertes par m² de surface,
- la surface de réflecteur à installer.

5.2 PROBLÈMES À RÉSOUDRE POUR L'OPTIMISATION. — Le premier problème semble être la forme du champ, on verra qu'en fait elle découle d'autres résultats. Le deuxième est la valeur du taux de remplissage dans chaque zone.

Supposons que l'on ait trouvé un champ formé de « n » zones chacune équipée d'une surface de réflecteurs S_{m_i} fournissant chacune l'énergie E_i . On veut :

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \sum_{i=1}^n E_i \quad \text{énergie maximale} \\ S_m = \sum_{i=1}^n S_{m_i} \quad \text{surface de réflecteur fixée.} \end{array} \right.$$

La question est de savoir quelle valeur donner à S_{m_i} , S_{m_j} , S_{m_k} , ... etc... dans les zones i , j , k , ... etc... pour réaliser ces objectifs.

L'application de la méthode de Lagrange sur les maxima liés donne la condition suivante :

$$\frac{\partial E_i}{\partial S_{m_i}} = \frac{\partial E_j}{\partial S_{m_j}} = \frac{\partial E_k}{\partial S_{m_k}} = \dots = r_m$$

c'est-à-dire que dans un champ de forme donnée, la répartition des réflecteurs est optimale si le rendement énergétique marginal de la surface de réflecteur, c'est-à-dire l'énergie fournie par le dernier mètre carré de réflecteur installé, est le même partout dans le champ.

Or, si l'on reprend la formulation de l'énergie fournie par une zone (voir § 4.2.3.2), on obtient :

$$E_i = \rho E_s (S_{m_i} \cdot R_{c_i} + S_{o_i} \cdot R_{o_i}) - \Delta_i E,$$

où $\Delta_i E$ représente les pertes au récepteur dues à la zone « i ». Si l'on a choisi les zones de façon telle que ses paramètres géométriques (ϵ_i , c_i) varient peu sur son étendue, la surface du récepteur ne dépend pas du dernier mètre carré de verre installé sur la zone mais seulement de l'installation d'une quelconque surface de réflecteur dans cette zone. Donc une fois la zone déterminée comme utile, c'est-à-dire pour une forme de champ donnée, le terme $\Delta_i E$ ne dépend plus de S_{m_i} . Il vient donc :

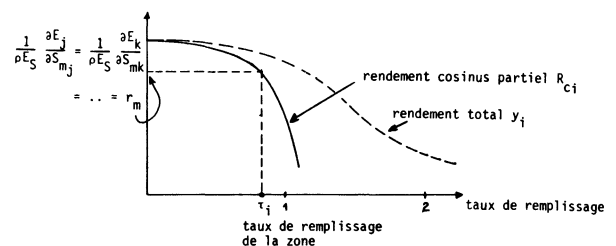
$$\frac{\partial E_i}{\partial S_{m_i}} = \rho E_s R_{c_i}$$

c'est-à-dire que, à un terme constant près (ρE_s), le rendement marginal de la surface de réflecteur dans une zone est égal au rendement *cosinus* de cette zone calculé sur les instants sans ombre.

Cela peut se comprendre ainsi : si l'on rajoute un mètre carré de réflecteur, ce mètre carré n'est efficace que pendant les instants sans ombre puisque en dehors de ceux-là il y a déjà trop de surface de réflecteur. Et, ce que rapporte ce mètre carré supplémentaire est évidemment affecté de l'effet cosinus du lieu pendant ces instants sans ombre.

Enfin, il est clair que ce n'est pas ce dernier mètre carré qui va profondément modifier la surface du récepteur.

On sait donc à priori que chaque zone déterminée sera telle que son rendement cosinus sur les instants sans ombre (que l'on appellera *rendement cosinus partiel*) sera le même que toutes les autres zones. Le taux de remplissage local est donc déterminé par cette condition.



Le choix des zones est déjà simplifié car il est clair que toutes les zones qui ont un rendement cosinus initial inférieur à r_m ne peuvent convenir.

On voit ici que les dernières zones possibles suivent des courbes *isocosinus* (équi-rendement par effet cosinus — cf. Fig. 2). C'est en effet l'endroit où le seul moyen d'avoir $\frac{1}{\rho E_s} \frac{\partial E_i}{\partial S_{m_i}} = r_m$ est de faire $\tau_i = 0$, c'est-à-dire de ne pas mettre de réflecteur.

En particulier, les champs utilisés sur des récep-

teurs sans pertes sont inclus dans la plus petite zone isocosinus qui contient la surface voulue.

Ces champs sur récepteur *froid* (sans perte) ont un rendement moyen toujours décroissant en fonction de la surface de réflecteur à installer. En effet, le rendement moyen s'écrit :

$$y = \rho R_c + \rho \cdot \frac{1}{\tau} R_0 \quad (\text{cf. § 4.2.3.3}),$$

or, le rendement marginal de ces champs est R_c (le rendement cosinus partiel) et l'on voit bien par l'égalité ci-dessus que le rendement marginal est inférieur au rendement moyen, condition suffisante pour la décroissance du rendement moyen.

Il n'en est pas de même lorsque le récepteur est soumis à des pertes importantes vis-à-vis de l'apport d'un réflecteur. Dans ce cas, il faut installer déjà suffisamment de réflecteurs pour compenser les pertes ;

S = surface à installer.
 Σ = surface déjà installée.
 S_{mi} = surface installée dans la zone i .
 S_r = surface récepteur déjà en place.
 S_{ri} = surface du récepteur nécessaire au champ en place + zone i .
 y = rendement du champ.
 y_i = rendement marginal du champ (rendement de la zone i).
 r_m = rendement marginal du mètre carré de réflecteur dans les zones.

E = énergie obtenue du champ déjà en place.
 E_i = énergie obtenue de la surface installée dans la zone i
 $(y_i = E_i/S_{mi})$.

τ_i = taux de remplissage de la zone i .
 r_{m0} = { première valeur choisie du rendement marginal des réflecteurs.

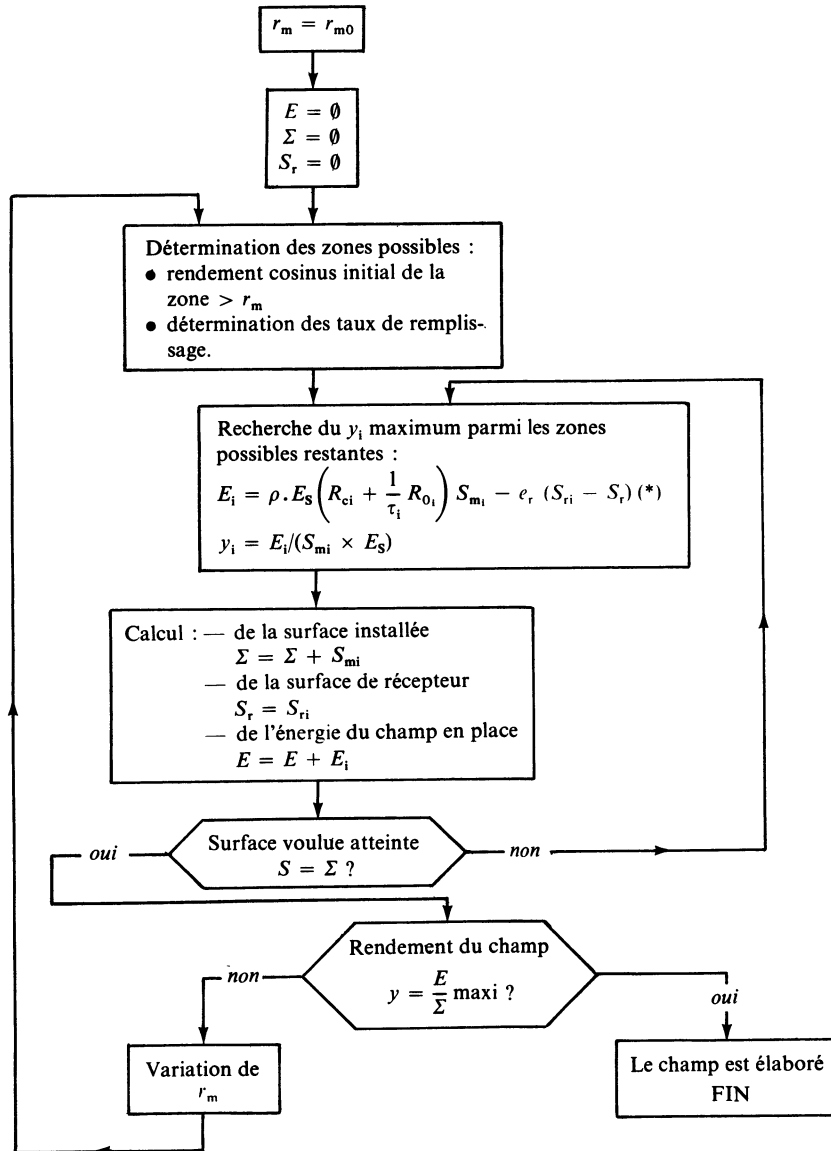


Fig. 9. — Organigramme d'optimisation.

[Schematic representation of the method.]

le rendement commence par croître avec la surface à installer : le sentiment d'une zone optimale apparaît.

5.3 PROCÉDURE D'OPTIMISATION. — Compte tenu des propriétés précédentes, on propose une méthode qui permet de résoudre le problème suivant :

• A latitude, terrain (relief), type de réflecteurs, hauteur de tour, position et pertes récepteur donnés (résultant d'optimisations partielles), comment installer une surface totale S de réflecteur pour maximiser le rendement énergétique ?

La procédure est la suivante :

- 1) On sépare le terrain en zones (⁷).
- 2) On choisit le rendement marginal du mètre carré de réflecteur (r_m = rendement cosinus partiel) comme paramètre.

Cela détermine déjà les zones possibles (c'est-à-dire équipables de telle façon que leur rendement cosinus partiel soit égal à r_m ce qui fournit le taux de remplissage local. En pratique, cela élimine toutes les zones de rendement cosinus initial inférieur à r_m).

- 3) On cherche successivement les zones ainsi équipées qui donnent le rendement local maximum, ce rendement local étant défini par :

$$y_i = \rho \left(R_{ci} + \frac{1}{\tau_i} R_{0i} \right) - \frac{e_r \times \Delta_i S_r}{S_{m_i}},$$

où : $\Delta_i S_r$ est défini comme la variation de la surface du récepteur lorsque l'on équipe la zone i .

(Si l'on considère le champ comme un ensemble de zones, y_i est le rendement de la dernière zone équipée, c'est-à-dire le rendement marginal du champ.)

- 4) On calcule la surface totale installée avec la dernière zone et le rendement moyen du champ dans ces conditions.

- 5) Si la surface totale voulue est atteinte, on fait varier le rendement marginal du mètre carré de réflecteur (r_m) et on recommence les opérations pour obtenir le rendement moyen du champ maximum.

Ces opérations de recherche de maxima peuvent s'effectuer par diverses méthodes.

L'organigramme de la figure 9 résume cette démarche que l'on peut énoncer ainsi :

• Pour une surface de réflecteurs donnée, le champ optimal est celui qui comporte l'ensemble des zones (équipées à rendement marginal du mètre carré de réflecteur uniforme) choisies successivement par sélection du rendement marginal de zone maximum, jusqu'à obtention de la surface de réflecteur voulue.

Le résultat de cette procédure consiste en la valeur pour chaque zone du taux de remplissage local. Ces valeurs sont considérées comme les valeurs au centre des zones d'une fonction continue qui est le taux de remplissage d'un endroit donné dans le champ (par interpolation, on connaît la valeur en chaque point).

Cette fonction permet d'implanter les héliostats de façon continue par la méthode décrite au paragraphe 4.2.2 sans avoir de problème de frontière entre les zones.

5.4 CONCLUSION SUR L'OPTIMISATION. — Cette méthode d'optimisation donne un optimum technique. Son unicité peut être remise en question ainsi que son critère. La méthode est cependant applicable facilement à des critères différents (coût de la thermie, courbe de charge type,...). La référence [12] traite de l'application au coût de l'énergie d'une méthode du même type. On notera cependant que les optima de ces systèmes sont toujours assez plats.

6. Exemple d'application. L'effet de taille des champs.

6.1 CHOIX DE L'EXEMPLE. — On a vu précédemment, de façon succincte mais vérifiable, que le rendement d'un champ sur récepteur sans perte allait en décroissant avec la surface à installer et qu'au contraire un champ sur récepteur à pertes avait un rendement d'abord croissant. On s'est donc posé la question de savoir, lorsque l'on continue à augmenter la surface d'un champ sur récepteur avec pertes, jusqu'où le rendement croissait ?

6.2 VALEURS DES PARAMÈTRES. — On s'est placé dans la situation suivante :

* Latitude : 43° Nord,

* Ensoleillement : une demi-année de beau temps (coefficient d'ensoleillement $\simeq 0,5$) modélisée simplement par :

$$E = 1,21 \exp(1/6 \cdot s_z) \quad (\text{cf. § 4.1}).$$

Ce modèle fournit les caractéristiques d'ensoleillement suivantes :

- puissance crête : $\simeq 1\,014 \text{ W/m}^2$,
- ensoleillement direct annuel : $\simeq 1\,588 \text{ kWh/m}^2$,
- répartition des puissances (Nbre d'heures au-dessus de telle puissance).

Niveau de puissance	Nombre d'heures au-dessus du niveau
1 000	150
900	820
800	1 250
700	1 500
600	1 650
500	1 750
400	1 850
300	1 920
200	1 950
100	2 120

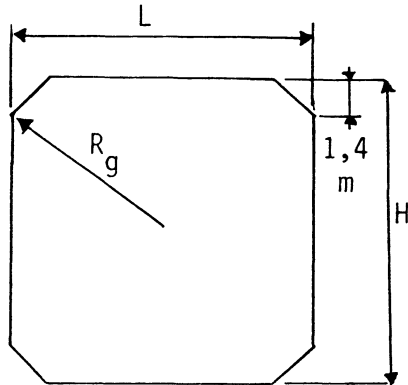
Cette modélisation est assez optimiste vis-à-vis des forts niveaux.

Dans le cas de la conception de systèmes à réaliser effectivement l'utilisation d'un relevé statistique sur le site est plus fiable, mais plus long à mettre en œuvre.

(⁷) Voir paragraphes 4.2.1 et 4.4.2.

* *Terrain* : Le relief optimal autre qu'une pente plane n'ayant pas vraiment fait l'objet d'études approfondies, on choisit arbitrairement un terrain plan horizontal illimité.

* *Héliostat* : On utilise un héliostat défini par la figure suivante :



$H = 7 \text{ m.}$
 $L = 7 \text{ m.}$
 $R_g = 4,08 \text{ m.}$
 $S_F = S_M = 45,08 \text{ m}^2.$

Le flux réfléchi est calculé en utilisant des facettes d'environ 1 m^2 et un coefficient de réflexion moyen de 0,8 (dans lequel on inclut les réflexions parasites du récepteur).

Sa focale est choisie égale à la distance du réflecteur au récepteur et du type axial. On peut montrer en effet que le choix focale = distance est celui qui donne la tache énergétique la plus *compacte* (l'écart-type de la répartition énergétique de la tache est le plus faible), même si de façon instantanée les plus fortes concentrations locales sont en avant du point focal [11].

On peut encore réduire la tache énergétique si l'on utilise une focalisation hors de l'axe (pour chaque héliostat, la focalisation est réglée pour une position moyenne du soleil), mais cette solution n'ayant pas encore été technologiquement retenue, on ne l'utilise pas non plus.

Le choix distance = focale est surtout important pour les héliostats en bordure du champ qui sont tous responsables d'une fraction du contour du récepteur. A l'intérieur du champ, une fois le champ réalisé, les tolérances sont plus larges.

— *Tour* : choisie arbitrairement de hauteur égale à 100 m.

— *Récepteur* : les pertes moyennes sur l'année du récepteur sont évaluées à 27 kW/m^2 , ce qui correspond sensiblement aux valeurs du projet initial THEM [9] qui fonctionnait aux environs de 450°C .

L'inclinaison de la surface de réception par rapport à la verticale a été choisie égale à 20° pour des variations de la surface de réflecteur à installer de $4\,000$ à $300\,000 \text{ m}^2$ et l'on a procédé à une petite étude de $4\,000$ à $32\,000 \text{ m}^2$ en faisant varier cet angle de 5° à 50° .

6.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION. — Les résultats sont donnés sur les figures 10, 11, 12, 13. Les rendements en question représentent le rapport entre l'énergie disponible dans le récepteur et l'énergie du flux solaire qu'aurait reçu sous incidence normale une surface équivalente à la surface de réflecteur.

— *Effet de l'angle du récepteur* (Fig. 10). — Les variations du rendement sont assez faibles pour les valeurs de la surface de réflecteur étudiées. Le détail des résultats montre que les faibles angles sont meilleurs pour les grands champs qui s'étendent assez loin, la chute du rendement en fonction de la surface installée s'effectuant pour des surfaces d'autant plus faibles que l'angle de la surface de captation est fort.

A surface égale, de forts angles ont pour tendance de rapprocher le champ, avec de faibles variations de rendement.

On s'aperçoit de l'influence non négligeable de la surface apparente du récepteur pour une position de réflecteur donnée, cette influence suffisant à modifier notablement la forme du champ en dépit des effets *cosinus et ombre*.

— *Variation du rendement en fonction de la surface de réflecteur* (Fig. 11). — Pour les valeurs de paramètres choisis, le rendement thermique de ce type de champ reste supérieur à 60 % de $9\,000 \text{ m}^2$ à $250\,000 \text{ m}^2$. En associant un système thermo-électrique à turbo-alternateur de rendement nominal d'environ 0,27, la gamme de puissance crête est de 1,7 à 45 MW électriques (Fig. 12).

On constate que cette zone de fonctionnement est essentiellement le résultat du comportement des pertes récepteur (voir courbe de concentration géométrique : figure 12, perte récepteur : figure 11). Par ailleurs, le détail des résultats montre qu'au-dessus de $15\,000 \text{ m}^2$ la quasi-totalité du champ est remplie au maximum par les héliostats et donc qu'à surface de réflecteur égale, une augmentation des pertes chaudière ne changerait que très peu les performances propres du champ tout en dégradant le rendement global proportionnellement à cette augmentation. L'allure des surfaces de réception est présentée figure 13.

Le fait qu'il faille remplir au maximum le champ montre aussi que le champ s'étend d'autant plus que le taux de remplissage maximum de l'héliostat est faible (cf. § 4.4.3).

7. Conclusion générale. — Le but de ce travail était de montrer qu'on peut trouver des méthodes pour concevoir une centrale électrosolaire à tour en prenant en compte l'interaction champ/récepteur qui s'avère assez importante. La mise en œuvre de la méthode et la précision des hypothèses sont toujours perfectibles. Cette méthode peut permettre avec des moyens accrus une étude plus complète de l'ensemble { soleil/champ/récepteur système thermo-électrique/besoins économique-énergétiques }.

SR (m ²)	Angle récepteur							
	5°		20°		35°		50°	
	RDT	SCHD	RDT	SCHD	RDT	SCHD	RDT	SCHD
4 000	0,495	22,9	0,525	19,8	0,539	18,0	0,537	18,1
8 000	0,574	28,0	0,580	28,3	0,588	22,4	0,585	27,8
12 000	0,599	33,0	0,612	28,8	0,614	28,2	0,604	29,5
16 000	0,610	37,9	0,621	33,2	0,619	35,3	0,613	33,9
20 000	0,614	45,1	0,626	37,6	0,622	37,9	0,616	40,7
24 000	0,618	47,6	0,628	39,5	0,628	39,6	0,616	50,3
28 000	0,626	49,9	0,631	43,7	0,630	43,5	0,620	52,6
32 000	0,628	51,0	0,633	46,7	0,630	49,3	0,618	62,2

SR = surface de réflecteur (m²)

RDT = rendement.

SCHD = surface récepteur (m²)

- latitude : 43°
- terrain plan
- tour : 100 m

- perte récepteur : 27 kW/m².
- réflecteur : 45 m² (voir texte).
- coefficient de réflexion : 0,8.

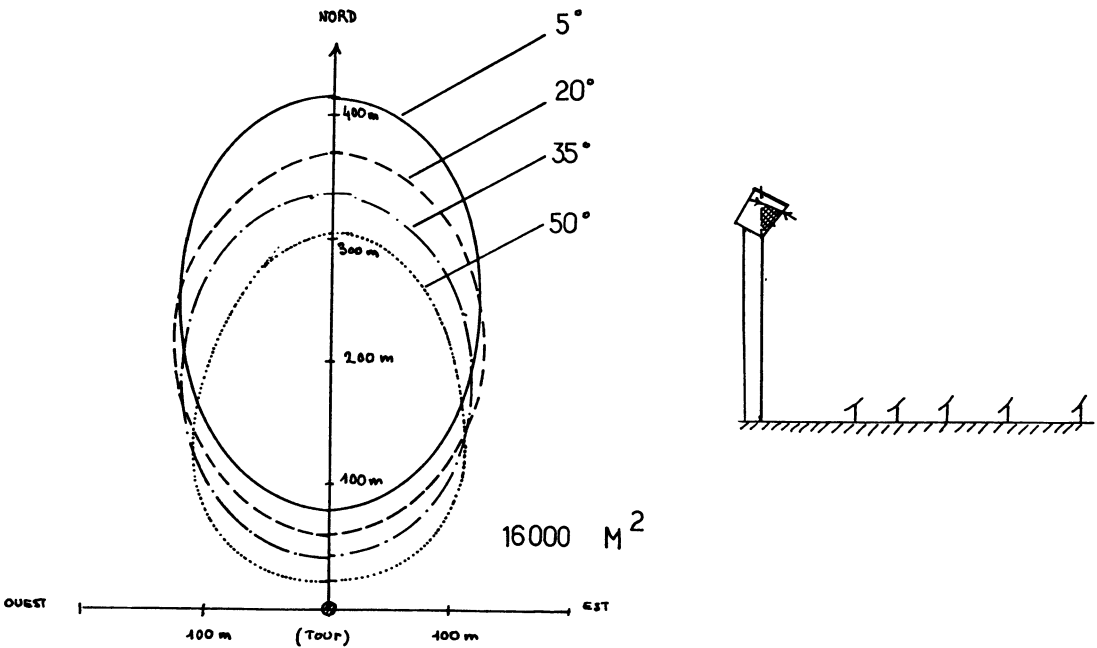


Fig. 10. — Influence de l'angle du récepteur.

[Effect of the angular position of the receiver.]

- Latitude : 43°
- Terrain plan
- Tour : 100 m
- Perte récepteur : 27 kW/m²
- Réflecteur : 45 m² (voir texte)
- Coefficient de réflexion : 0,8

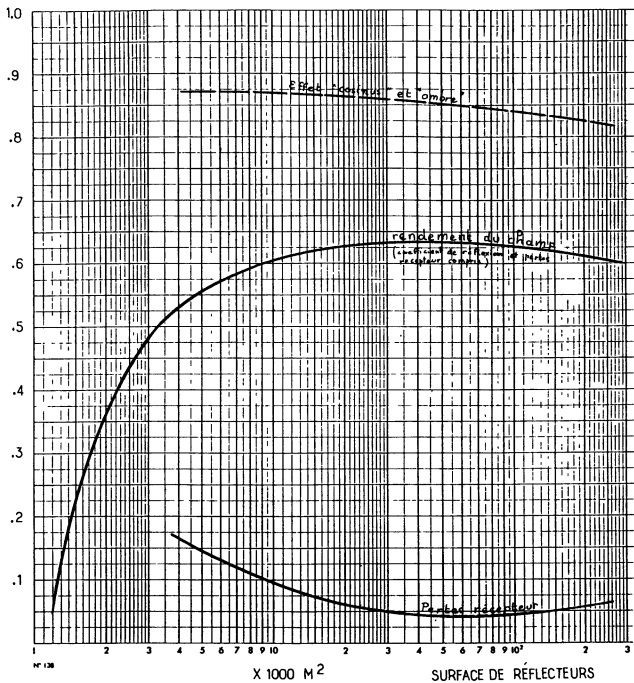


Fig. 11. — Rendement énergétique de 4 000 m² à 250 000 m².
[Energetic efficiency for reflective surface from 4 000 m² to 25 000 m².]

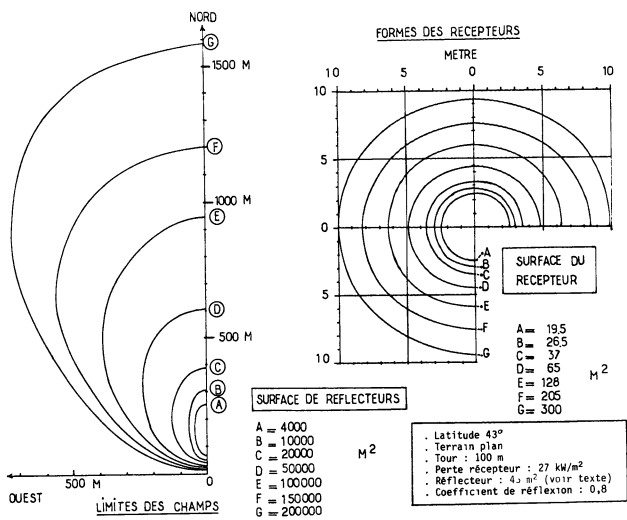


Fig. 13. — Forme de la surface des récepteurs et limite des champs.
[Shape of fields and receivers (cavity toward north).]

- latitude : 43°
- Terrain plan
- Tour : 100 m
- Perte récepteur : 27 kW/m²
- Réflecteur : 45 m² (voir texte)
- Coefficient de réflexion : 0,8

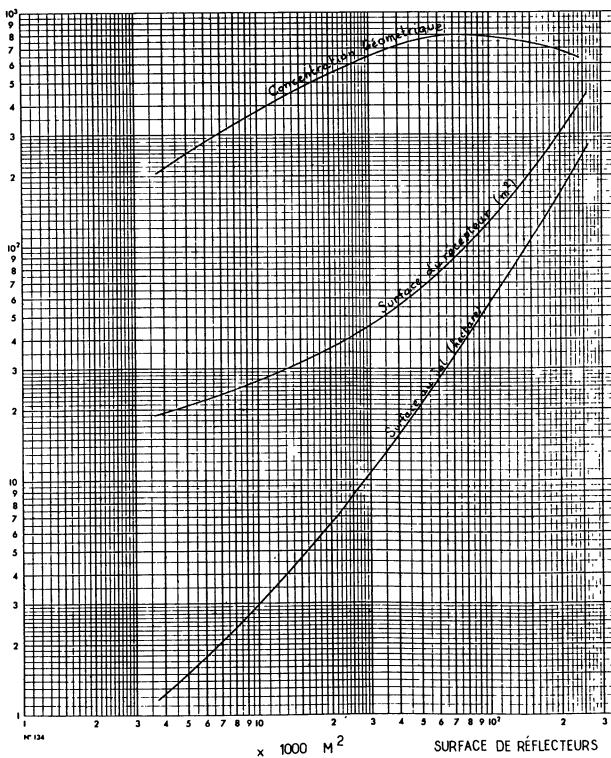


Fig. 12. — Concentration géométrique. Puissances crêtes.
[Geometrical concentration.]

Bibliographie

Les références citées ne sont pas nécessairement les références de base, mais contiennent les références de travaux antérieurs pris en compte.

- [1] MONTLUÇON, G., *Le rayonnement solaire*. Rapport EDF-ER-P. 42/206, mai 1976.
 - [2] DE BRICHAMBAUT, P., *Météorologie et énergie*, l'évaluation du gisement solaire.
 - [3] COURREGE, Ph., « Une évaluation de l'aire efficace d'un champ de miroirs en termes de répartition du verre installé ». *Electricité Solaire*. Colloque International, Toulouse (1976).
 - [4] RIAZ, M. R., « A theory of concentrators of solar Energy on a central receiver for Electric Power generation ». *Journal of Engineering for Power*, juillet 1976.
 - [5] MERISIER, C., « Modèle pour le calcul du flux thermique fourni par les champs de miroirs des centrales électrosolaires à tour », *Bulletin de la Direction des Etudes & Recherches* (EDF). Supplément au n° 1/2 (1976) série A.
 - [6] COURREGE, Ph., « Calcul des flux radiatifs d'une centrale solaire à concentration » Parties (1) et (2) 20/09/1976.
 - [7] GENTILI, B., « Programme de calcul du flux réfléchi par le champ d'héliostats de THEM 1 ». Rapport THEM 77-40, août 1977.
 - [8] BONDUELLE, B., Rapport THEM 78/08. *Optimisation de l'ouverture de la chaudière à cavité*.
 - [9] Groupe de Projet THEM. « Avant-projet THEM 1 », Rapport THEM 77-03, février 1977.
 - [10] GENTILI, B., *Modélisation du coût d'un héliostat*, Rapport THEM 76-19, juillet 1976.
 - [11] MERISIER, C., *Les réflecteurs focalisants*, Rapport EDF-ER-P. 13/D79, avril 1977.
 - [12] COURREGE, Ph. et LASRY, J. M., « Optimisation du champ de miroirs d'une centrale solaire à concentration ponctuelle ». Colloque international de l'IRIA, décembre 1976.
-