

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

U.S.T.H.B

3/82

24

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

Département Génie Mécanique



PROJET DE FIN D'ETUDES

**INSTALLATION DE SECHAGE D'ABRICOTS**

**PAR ENERGIE SOLAIRE**

( VILLAGE SOLAIRE INTEGRE DE BOU-SAADA )

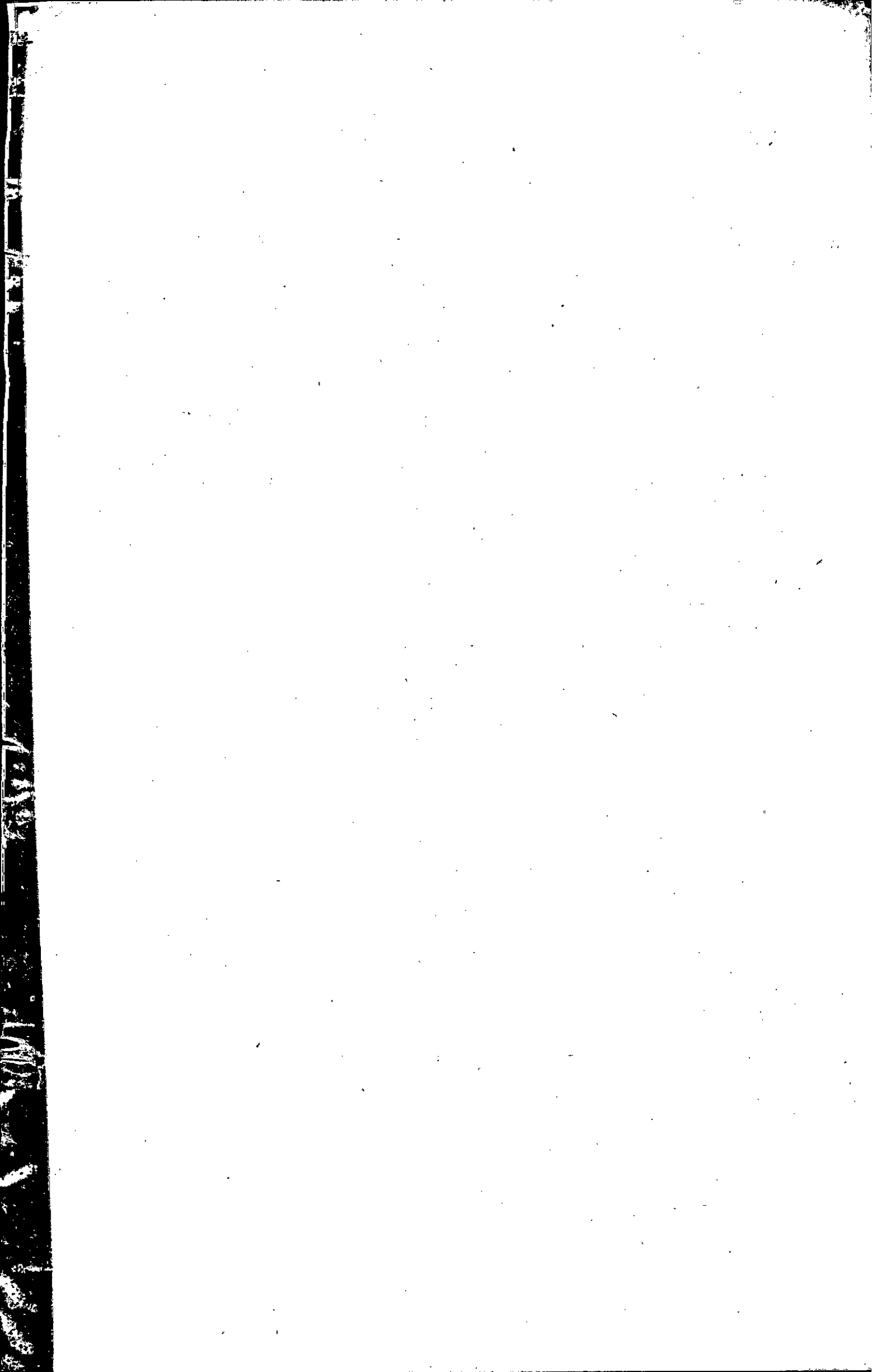
PROPOSE PAR

Mr D. DIMITROV Maître de Conférences

ETUDIE PAR

Mohamed ACHAIBOU

PROMOTION JUIN 1982



## REMERCIEMENTS

A l'occasion de la présentation de ce travail, je tiens à remercier très vivement M<sup>r</sup> D. DIMITROV, Maître de conférences à l'ENPA pour m'avoir proposé ce sujet et pour m'avoir assuré son encadrement.

Qu'il admette maintenant mes remerciements et qu'il trouve ici l'expression la plus sincère de ma reconnaissance.

Je saisis l'occasion aussi pour adresser mes remerciements au corps enseignant du département de Génie Mécanique pour avoir donné de leur mieux pour notre formation.

Je tiens aussi à remercier très vivement M<sup>r</sup> Mustapha BOUDIAF, enseignant-chercheur au CRAU-EPAU, pour l'aide désintéressée qu'il m'a consentie. Je l'assure de mon entière amitié.

Je remercie aussi tous ceux qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réalisation de ce travail.

## DÉDICACES

Je dédie ce travail :

- à tous ceux qui se sont sacrifiés pour la Science, dans tous les domaines, dans le but de libérer l'Homme de l'obscurantisme, et de l'esclavage de la Nature et des hommes.

- à toute ma famille qui n'a cessé de m'apporter son soutien moral et matériel.

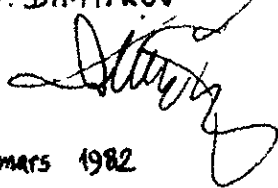
- à tous mes camarades, durant toute ma scolarité et plus particulièrement ceux du département de Génie Mécanique.

- à tous mes amis.

Thème de Projet de fin d'études

1. Intitulé: Séchoir d'abricots à l'énergie solaire dans la région de Bou-Saada (village solaire)
2. Données de base: L'installation sera conçue dans le cadre de création de petites industries locales suivant le projet du village solaire. La source de chaleur sera l'énergie solaire. L'énergie motrice des ventilateurs sera fournie par une éolienne.  
 Les conditions climatiques sont à prélever des tableaux météorologiques pour la région concernée.  
 La teneur en eau du fruit à sécher est de ...%. Elle doit être ramener à ...% après séchage.  
 La capacité horaire est de ... kg/h de fruit à sécher. Etudier la possibilité d'utilisation du séchoir pour d'autres fruits et légumes de la région dans le but d'étendre la campagne d'utilisation de l'unité sur une période aussi longue que l'approvisionnement le permet.  
 Etudier les variantes de fonctionnement en continu (tunnel de séchage) et par charges (étuve).  
 Le choix de paramètres relatif au produit et à la technique est à faire par le biais de la documentation.
2. Notice explicative: Elle comprendra une partie descriptive de l'ensemble complétée de justifications de la solution envisagée, suivie d'une partie réservée aux calculs techniques et aux diagrammes.
4. Travaux graphiques:
  1. Plan de masse illustrant le chantier - aire de stockage, de manutention, de tri, de conditionnement etc...
  2. Plans du séchoir, avec les coupes transversales et longitudinales afférentes; des charriots, des plateaux, des convoyeurs, etc...; détails relatifs aux capteurs solaires retenus.
  3. Plans de montage des ventilateurs et des mécanismes différents.
  4. Plans détaillés d'une section constituant l'ensemble.
  5. Schéma de réglage et d'automatisme.

Le promoteur:  
M.D. DIMITROV



Alger, mars 1982

L'étudiant:  
M. Mohamed ACHAÏBOU



# TABLES DES MATIERES

Introduction	1
Première partie	
Bases technologiques et données climatiques	
Chapitre I : Généralités sur le séchage	3
I.0 : Aperçu historique	3
I.1 : Principes et procédés de séchage	3
I.2 : Notion d'équilibre hygroscopique	4
I.2.0 : Nature de l'humidité dans les fruits et légumes	4
I.2.1 : Isotherme de sorption - équilibre hygroscopique	4
I.2.2 : Enthalpie de liaison	5
I.2.3 : utilisation des courbes de sorption	5
I.3 : Mouvement de l'humidité dans le produit	5
I.3.1 : transfert de liquide dans le produit	5
I.3.2 : transfert de vapeur d'eau dans le produit	6
I.4 : Evaporation de la couche superficielle (transfert d'humidité vers l'air)	6
I.5 : Durée de séchage	7
I.5.1 : température de séchage	7
I.5.2 : Méthode de détermination du temps de séchage	8
I.5.2.1 : courbe d'inflexion	8
I.5.2.2 : tracé de la courbe approximative	8
I.5.2.3 : détermination de la durée de séchage	10
I.5.2.4 : généralisation de la méthode	10
Chapitre II : Recueil météorologique et rayonnement solaire	12
II.0 : Situation géographique	12
II.1 : Données météorologiques	12
II.2 : Ensoleillement	12
II.2.0 : Nature du rayonnement solaire	12
II.2.1 : éléments de cosmographie	13
II.2.2 : choix de l'orientation des capteurs	14
Deuxième partie	
Calculs techniques	
Chapitre III : Les différents types de séchoirs et choix du séchoir	28
III.1 : les différents types de séchoirs	28
III.2 : choix du type de séchoir	28
Chapitre IV : Calculs relatifs au séchage	31

IV. 0 : Données principales	31
IV. 0.1: Paramètres de l'abricot	31
IV. 0.2: Conditions de séchage	31
IV. 1 : formules générales pour la détermination du bilan matière et du bilan thermique	31
IV. 2 : Bilans matière	33
IV. 2.1: bilan-matière produit	34
IV. 2.2: bilan-matière air	34
IV. 3 : Détermination du temps de séchage	34
IV. 3.0: Caractéristiques géométriques de l'abricot	34
IV. 3.1: Dimensions des plateaux et des charriots	35
IV. 3.2: Courbe de séchage et durée de séchage	35
IV. 4: Bilan thermique	37
chapitre V : Calculs relatifs au capteur solaire	44
V. 0: Généralités et choix :	44
V. 1: Calcul de l'énergie captée :	45
V. 5: Calcul des dimensions et du rendement du capteur	47
chapitre VI : Détermination de la puissance du ventilateur.	69
chapitre VII : L'énergie éolienne	71
chapitre VIII : Contrôle et régulation	78
Conclusion	82
Annexe 1: Formulation mathématique des isothermes de sorption	
Annexe 2: Relevés météorologiques	
Annexe 3: Opérations préliminaires au séchage des fruits et légumes.	

## SYMBOLES

Les symboles sont définis pour la plupart dans le texte, sauf pour le chapitre II, dont nous donnons la signification ici.

### Symboles relatifs à l'air :

- $c_p$  = chaleur spécifique à pression constante [kcal/kg. degré]
  - $i$  = enthalpie [kcal/kg d'air sec]
  - $x$  = teneur absolue en vapeur d'eau (humidité absolue) dans l'air [kg d'eau/kg d'air sec]
  - $G$  = débit [kg/h]
  - $\theta$  = température [ $^{\circ}$ C]
  - $r$  = chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température  $0^{\circ}$ C. [kcal/kg]
- indice :
- sans = air humide
  - a s = air sec
  - v. e = vapeur d'eau
  - 1 = à l'extérieur
  - e = à l'entrée du séchoir
  - s = à la sortie du séchoir

### Symboles relatifs au produit :

- $c$  = chaleur spécifique [kcal/kg. degré]
  - $I$  = enthalpie [kcal/kg]
  - $x$  = teneur en humidité rapportée à la matière sèche [%]
  - $G$  = débit [kg/h]
  - $\theta$  = température [ $^{\circ}$ C]
- indice :
- m s = matière sèche
  - p. h = produit humide
  - e = eau
  - 1 = à l'entrée
  - 2 = à la sortie

## FIGURES

Les figures sont regroupées à la fin de chaque chapitre, pour la plupart. Leurs significations se trouvent dans le texte.

## INTRODUCTION

Un effort important est actuellement entrepris par l'Algérie pour le développement de la recherche en matière d'utilisation des énergies nouvelles et principalement des énergies renouvelables (solaire sous toutes ses formes). C'est ainsi qu'un projet de village solaire intégré (V.S.I.), dont l'implantation est prévue dans la région de Bou-Saada, est à l'étude depuis quelques années.

Le projet de V.S.I est un exemple vivant de la manière dont doit être liée la recherche aux efforts de développement. En effet, il a pour mission:

a) de mobiliser et de drainer les efforts de l'Université, des centres de recherche de l'O.N.R.S, des chercheurs et ingénieurs, afin qu'ils participent à l'enrichissement de la méthodologie de conception des villages de la Révolution Agraire.

b) d'être le catalyseur et le moteur des efforts dans le domaine de la recherche en matière d'utilisation des énergies renouvelables.

Ce projet de V.S.I vise trois objectifs principaux:

1° Construire un village entrant dans le cadre du programme des 1000 villages de la Révolution agraire, c'est à dire un village comprenant l'habitat et l'activité à prédominance agricole;

2° Construire un village solaire, c'est à dire un établissement humain, dont les besoins énergétiques devraient être couverts, dans les limites technologiques, économiques et sociologiques possibles, par les énergies renouvelables (solaire, éolienne, biogaz).

3° Un vaste projet expérimental. Cet objectif consiste à rechercher un ensemble intégré qui permette le maximum de recherches possibles sur l'application des énergies renouvelables aux besoins domestiques, agricoles et industriels.

Le projet comprend 4 parties principales:

- la construction d'un village d'environ 2400 habitants,
- la mise en valeur d'un périmètre d'environ 2000 hectares,
- la réalisation de petites unités agro-industrielles,
- la réalisation de petites unités industrielles,

La présente étude a été entreprise en vue de contribuer à la création d'une petite industrie alimentaire dans le cadre de ce vaste projet de V.S.I.

Le séchage solaire qui constitue l'objet de cette étude, est une des voies de recherches entreprises dans le domaine d'utilisation de l'énergie solaire par des chercheurs en Algérie (CRENO), au Sénégal (CERER - Université de Dakar), en France (ENSAT - Toulouse), et ailleurs. Contrairement à ces recherches, que nous considérons assez timides car se basant sur l'utilisation des lentes solaires (en matière plastique et de faible capacité): au Sénégal (séchage de fruits et légumes) et en Colombie (séchage du tabac), notre étude se veut modestement ambitieuse car c'est une véritable petite industrie alimentaire dont l'énergie utilisée est essentiellement l'énergie solaire, qui en est l'objet.



Le produit à sécher que nous avons choisi est l'abricot. Le choix n'est pas fortuit mais répond à certaines considérations ; en premier lieu le fait qu'en cours du printemps 1981, ce fruit a subi des déboires de par la surproduction qu'a connue la Wilaya de Batna, alors qu'il était possible de le conserver soit sous forme de confiture, soit sous forme de produit séché.

Nous aurions pu choisir de sécher d'autres fruits ou d'autres légumes, ou bien du fourrage, ou aussi du bois (auquel il faut déjà penser avec l'exploitation future des produits du Barrage Vert). C'est pour cela que nous essayerons de développer dans cette étude certaines notions générales dans la technologie du séchage et donner en annexes quelques éléments pour les autres fruits et légumes qui pourront être séchés dans l'installation ; de même que nous nous efforcerons de maintenir l'idée d'étendre la campagne d'utilisation de l'installation durant toute l'année, toujours dans cette optique.

Nous pensons que cette étude pourrait être utile à plus d'un titre puisqu'elle traite de la technologie du séchage dans le domaine des industries alimentaires, lesquelles demandent une vive impulsion dans l'effort de développement, surtout lorsque nous savons que les fruits secs (raisins secs, pruneaux secs, figues séchées, etc...) constituent des produits très appréciés dans la cuisine algérienne, ce qui se manifeste par un grand volume d'importation.

En plus de ce volet séchage, il y a l'utilisation de l'énergie solaire sous sa forme rayonnement thermique et sous sa forme dérivée : l'énergie éolienne, qui fait aussi l'objet de cette étude. En effet la Terre reçoit toute son énergie du Soleil, sous forme de rayonnement électromagnétique composé de 3% d'ultra-violet, 42% de visible et 55% d'infra-rouge. Tout le rayonnement électromagnétique est transformable en énergie thermique. Toutes les autres "sources" d'énergie utilisées jusqu'à présent (en dehors du nucléaire) ne sont en fait que de l'énergie solaire dérivée ou transformée ; l'énergie du vent (éolienne) en est une, de même que les énergies fossiles et hydraulique.

La Terre reçoit environ  $16 \cdot 10^{15}$  kWh/an alors que la consommation mondiale globale en énergie était de l'ordre de  $4 \cdot 10^{11}$  kWh pour l'année 1965, ce qui donne  $4 \cdot 10^4$  fois environ les besoins énergétiques du monde. Longtemps délaissée, du fait du prix dérisoire des énergies fossiles, de leur facilité d'exploitation et de leur maîtrise du point de vue technologique, la source d'énergie que constitue le Soleil n'a repris de l'intérêt qu'une fois la crise de l'énergie éclatée au grand jour (années 70) ; par opposition aux énergies fossiles, l'énergie solaire est inépuisable à l'échelle humaine, ce qui lui a valu le qualificatif de renouvelable. Mais son utilisation pose encore des problèmes dont nous parlerons dans notre étude.

L'Algérie occupe une position géographique privilégiée ; si on prend comme référence la région de Bou-Saada, pour une plaque horizontale, la durée d'ensoleillement est en moyenne de 4246h/an (sur 8760h = 1an) et l'énergie reçue est en moyenne de 5 kWh/m<sup>2</sup>/jour. Ce qui nous donne quelques 1825 kWh/m<sup>2</sup>/an.

La production nationale en électricité était de 6220 kWh en 1980, ce qui représenterait 3,5 km<sup>2</sup> de surface horizontale ensoleillée.

# 1ere PARTIE

Bases technologiques  
et  
données climatiques

# chapitre I: GENERALITES SUR LE SECHAGE

## I.0: Aperçu historique:

La pratique du séchage est très ancienne, mais ses principes n'ont pu être définis qu'au cours de ce siècle. En effet, l'homme a depuis longtemps procédé au séchage des produits tels que fruits, viande et poisson, au vue de leur conservation. Le séchage se faisait à l'air libre - cette pratique existe toujours dans nos campagnes - utilisant aussi, d'une manière inconsciente, l'énergie solaire sous ses formes dérivées (vent, température de l'air) et sous sa forme directe (rayonnement du soleil). Au cours de l'histoire, il s'aperçut que le vent et/ou la chaleur, de même que l'étalement (surface exposée) favorise le séchage et diminue sa durée.

Au début de ce siècle, le séchage artificiel a fait son apparition, avec l'utilisation technique de ces constatations c'est à dire avec l'utilisation d'air chauffé (par combustion ou par résistance électrique) et une ventilation soit naturelle, soit forcée. Cependant, il ne réussit à s'imposer que bien plus tard, surtout dans le séchage du bois, à cause de la méconnaissance d'un facteur très important: l'hygrométrie de l'air.

Le séchage naturel (à l'air libre) a des problèmes et des limites qui plaident favorablement pour le séchage artificiel (industriel).

- grande durée de séchage
- grand risque de pourrissement et de développement de moisissures et champignons.
- grand risque d'attaque par les insectes qui y déposent leurs œufs, d'où l'apparition de larves (des vers).

## I.1: Principes et procédés de séchage:

Le séchage est l'élimination de l'eau contenue dans un produit en vue:

- de le conserver\* (industries alimentaires)
- d'obtenir des concentrés (industries pharmaceutiques et chimiques)
- d'obtenir des matériaux secs (bois, briques, etc...).

Cette élimination de l'eau se fait soit:

- par un procédé de déshydratation mécanique (presse)
- par vaporisation c'est à dire avec un apport ou génération de chaleur:
  - + séchage diélectrique (par hyperfréquences)
  - + séchage par rayonnement infra-rouge.
  - + séchage par conduction.

\* Le séchage est nécessaire pour la conservation car l'élimination de l'eau inhibe l'action des germes microbien (bactéries, moisissures, etc...). Le séchage peut aussi être une opération préliminaire pour la conservation car il réduit le volume et le poids du produit.

... par évaporation c'est à dire par un apport de chaleur par ventilation.

Les deux premiers procédés ne sont pas applicables pour le séchage de l'abricot; avec le premier il y a risque de perdre les valeurs nutritives et avec le deuxième il y a risque de détériorer le fruit. Par contre le séchage par évaporation y est convenable. Dans ce procédé nous avons un transfert de chaleur et un transfert de matière simultanés par convection, grâce à une ventilation (naturelle ou forcée) d'air chaud (agent séchant).

## I.2: Notion d'équilibre hygroscopique:

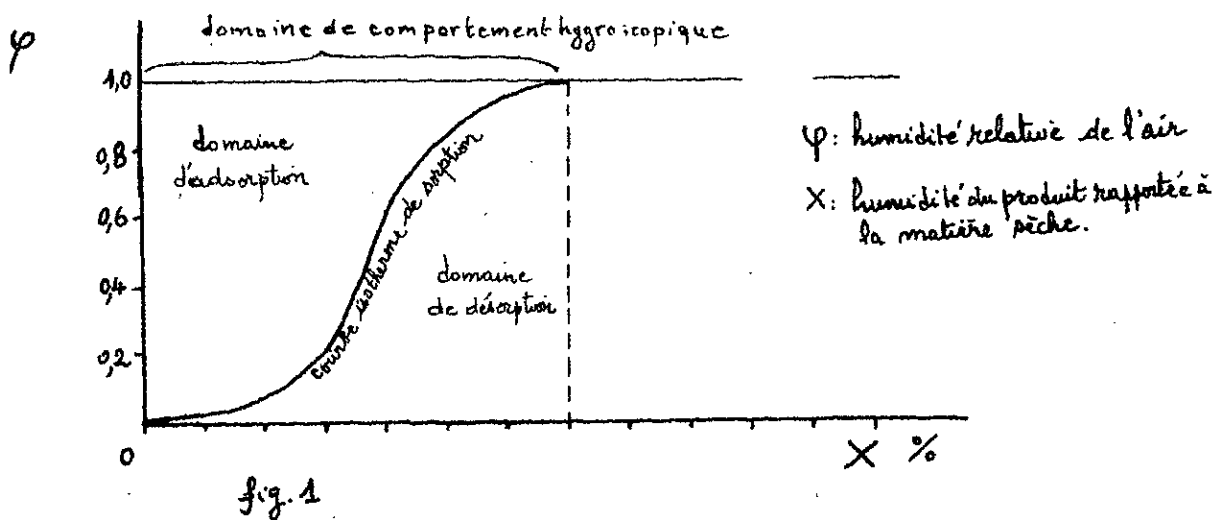
### I.2.0: Nature de l'humidité dans les fruits et légumes:

L'humidité dans les fruits se présente sous forme d'une solution dans laquelle l'eau constitue le solvant. Cette solution est capable de se cristalliser d'où l'appellation de solution colloïdale. Le liquide se présente sous trois formes:

- liquide adhérent c.à.d. une mince couche d'eau recouvrant le fruit,
- liquide capillaire c.à.d. se trouvant dans les canaux,
- liquide au gonflement c.à.d. se trouvant à l'intérieur des cellules.

### I.2.1: Isotherme de sorption - équilibre hygroscopique

Lorsque nous plaçons un produit dans une atmosphère contenant de la vapeur d'eau jusqu'à atteindre un équilibre: ce phénomène est appelé l'adsorption. Lorsque au contraire nous la plaçons dans une atmosphère sèche, elle se dessèche jusqu'à ce que la vapeur jusqu'à égaliser les tensions partielles de vapeur d'eau dans les deux milieux: c'est la désorption. Ces deux phénomènes sont regroupés sous le nom de sorption. La courbe de la figure 1 exprime ceci.



\* Pour certains produits tels que les fourrages, briques on utilise aussi comme agent séchant les gaz de combustion.

\*\* Il existe d'autres allures de la courbe isotherme de sorption  $\varphi(X)$ .

Le phénomène de sorption dépend de la température (voir fig. 2).

De nombreuses recherches ont menées pour trouver une formulation mathématique à ces courbes, certaines formules très approchées ont été proposées par différents auteurs (voir Annexe 1). Mais en général, ces courbes sont déterminées expérimentalement. Pour l'abricot et les prunes, ne pouvons procéder à l'expérience, nous nous contentons de donner la courbe (fig 3) tirée de la référence n° 21.

### I.2.2: Enthalpie de liaison:

L'eau contenue dans le produit est retenue par des forces capillaires et par des tensions osmotiques (fameux phénomène d'osmose). L'agent sécheur doit fournir, en plus de l'énergie d'évaporation, une énergie supplémentaire pour vaincre ces forces. On appelle cette énergie, enthalpie de liaison ou énergie de rétention. Elle dépend de la teneur en humidité (voir fig 4).

### I.2.3: Utilisation des courbes de sorption:

Les courbes de sorption ne sont pas directement utiles au séchage de l'abricot, celui-ci s'effectuant avec une humidité relative de l'air très basse, ce qui nous permet d'atteindre l'humidité voulue. L'abricot ne se comporte comme substance hygroscopique qu'en fin de séchage. Les études françaises sur l'alimentation limitent l'humidité des fruits entre 14 et 15% (en humidité des parties de masse), nous devons en tenir compte, car le fruit séché reprendra l'humidité à l'air ambiant. Pour cela, l'emballage doit s'effectuer immédiatement après séchage.

### I.3: Mouvement de l'humidité dans le produit:

Le transfert d'humidité dans le produit se fait principalement sous deux formes distinctes et successives:

- 1° transfert de liquide dû aux forces capillaires;
- 2° transfert de vapeur dû aux différences de tensions de vapeur.

#### I.3.1: transfert de liquide dans le produit:

Au fur et à mesure que l'eau s'évapore à la surface, la couche d'eau superficielle se renouvelle grâce à l'apport du liquide à travers les capillaires, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'eau sous forme liquide. Krischer propose une formulation mathématique de ce mouvement de liquide.

$$G = -F \cdot k \cdot \rho_{ms} \cdot \frac{dx}{dl}$$

avec  $G$  = humidité déplacée [kg/h]

$F$  = section normale au mouvement [ $m^2$ ]

$k$  = coefficient de diffusivité d'humidité [ $m^2/h$ ]

$X$  = teneur en humidité rapportée à la matière sèche [kg/kg]

$l$  = distance parcourue [m]

$\rho_{ms}$  = densité de matière sèche [kg/ $m^3$ ]

$\frac{dx}{dl}$  = gradient d'humidité [ $1/m$ ]

En fin de séchage ou lors d'une relative d'humidité élevée, ou dans le séchage à l'air libre, la connaissance des courbes de sorption est importante.

Le coefficient  $k$  dépend de la répartition des capillaires dans le produit, de la tension superficielle, de la viscosité du liquide ainsi que de l'humidité. Il n'est pas constant et est déterminé expérimentalement (voir fig 5)

### I.3.2: Transfert de vapeur d'eau dans le produit.

Une fois qu'il n'y a plus d'eau libre dans le produit son transfert de vapeur d'eau succède au transfert de liquide. Le transfert de vapeur d'eau, à température constante et dans le cas d'une substance hygroscopique, est donné par la formule:

$$\dot{G} = -F \left[ k \cdot \rho_{\text{m.s}} \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{D}{\mu} \cdot \frac{1}{R_{\text{v.e.}} T} \cdot \frac{P}{P - P_{\text{v.e.m}}} \left( \frac{\partial P_{\text{v.e.}}}{\partial X} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \right) \right]$$

avec  $D$  = coefficient de diffusion du mélange air-vapeur d'eau [ $\text{m}^2/\text{h}$ ]

$\mu$  = coefficient de résistance à la diffusion [S.U.]

$R_{\text{v.e.}}$  = constante des gaz de la vapeur d'eau [ $\text{kJ}/\text{kg}/\text{degré}$ ]

$T$  = température absolue [ $^{\circ}\text{K}$ ]

$P$  = pression de l'air [ $\text{atm}$ ]

$P_{\text{v.e.m}}$  = pression partielle moyenne de la vapeur d'eau [ $\text{atm}$ ]

$P_{\text{v.e.}}$  = pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air

$P_{\text{v.e.m}} = \frac{P_{\text{v.e.}} + P_{\text{v.e.s}}}{2}$  ;  $P_{\text{v.e.s}}$  = pression de saturation en vapeur d'eau de l'air à la température  $T$ .

Les autres symboles sont indiqués plus haut.

$D$  peut être calculé par la formule de Schirmer, valable entre  $20^{\circ}\text{C}$  et  $30^{\circ}\text{C}$ .

$$D = 0,083 \cdot \frac{1000}{P} \left( \frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad [\text{m}^2/\text{h}] ; P \text{ en [atm].}$$

### I.4: Evaporation de la couche superficielle (Transfert d'humidité vers l'air):

Lorsque le produit contient suffisamment d'humidité une couche superficielle de liquide est assurée par le transfert de ce dernier de l'intérieur vers la surface. C'est cette couche qui est le siège de l'évaporation (transfert de matière et de chaleur par convection). Cette évaporation est due à la différence des tensions de vapeur d'eau dans la couche superficielle (saturée) et dans l'air (non saturée).

Si le séchage s'effectue à une température constante et un degré hygrométrique (humidité relative) de l'air constant, la formule liant le transfert de matière au transfert de chaleur est:

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha (T_a - T_0) = G_{\text{v.e.}} \cdot r = S \cdot \frac{\rho_{\text{h}}}{R_{\text{v.e.}} \cdot T_a} \cdot r (P_{\text{v.e.0}} - P_{\text{v.e.a}})$$

ou aussi:

$$T_a - T_0 = \frac{\rho_{\text{h}}}{\alpha} \cdot \frac{r}{R_{\text{v.e.}} \cdot T_a} (P_{\text{v.e.0}} - P_{\text{v.e.a}})$$

avec:

$\dot{Q}$  = débit de chaleur [ $\text{kJ}/\text{h}$ ]

$S$  = surface présentée à l'évaporation [ $\text{m}^2/\text{h}$ ]

$\alpha$  = coefficient de transfert de chaleur par convection [ $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$ ]

$T_a$  = température de l'air [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_0$  = température de la surface liquide [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$G_{v,e}$  = débit de vapeur d'eau entre la couche superficielle et l'air [ $\text{kg/h}$ ]

$r$  = chaleur de vaporisation de l'eau à  $t_0$  [ $\text{kJ/kg}$ ]

$\beta_k$  = coefficient de transfert de matière [ $\text{m/h}$ ]  
(l'indice  $k$  indique que la couche limite air-eau n'est perméable que d'un seul côté, i.e. la vapeur d'eau s'écoule dans le sens eau-air).

$R_{v,e}$  : constante des gaz pour la vapeur d'eau [ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{segré}}$ ]

$T_a$  : température absolue de l'air [ $^{\circ}\text{K}$ ]

$P_{v,e_0}$  : pression partielle de la vapeur d'eau à la surface de la couche limite

$P_{v,e_a}$  : pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air.

Certains ouvrages donnent des formules liant  $\alpha$  et  $\beta_k$  déterminées par la théorie de la similitude (référence n°1)

Le diagramme de l'air humide a une grande importance car il s'agit d'une évaporation. Nous en donnons un exemplaire.

### I.5 : Durée de séchage :

La détermination de la durée de séchage est indispensable. Sa connaissance nous permet de dimensionner le séchoir, une fois les conditions de séchage et le débit de matière à sécher fixés. C'est une donnée tout aussi importante que le diagramme de l'air humide pour la conception d'une installation de séchage.

La durée de séchage dépend de divers facteurs : nature du produit, dimensions du produit, conditions de séchage, etc...

La courbe de séchage existe, dans les ouvrages, sous différentes formes :

\*  $X = f(t)$  : humidité du produit en fonction du temps (fig. 6)

\*  $g = \frac{dX}{dt} = f(t)$  : vitesse de séchage en fonction du temps (fig. 7)

\*  $g = \frac{dX}{dt} = f(X)$  : vitesse de séchage en fonction de l'humidité (fig. 8)

C'est cette dernière forme que nous utiliserons dans notre étude, car elle nous permet de voir les différentes étapes de séchage. (voir fig. 8)

I. période de mise en température (négligeable, en général)

II. 1<sup>ère</sup> période de séchage (évaporation superficielle).

III. comportement non hygroscopique du produit

IV. comportement hygroscopique du produit } 2<sup>ème</sup> période de séchage  
(transport d'humidité directement sous forme de vapeur).

#### I.5.1 : Température de séchage :

Il est connu que plus la température est élevée et plus le séchage est rapide. Cependant il existe une limite à cette élévation de température pour les raisons suivantes :

1° le débit de vapeur de la couche superficielle doit être égal au débit de liquide (ou de vapeur) de l'intérieur du produit vers la surface. A défaut de ceci, une croûte superficielle apparaît et empêche le déplacement de liquide et de vapeur de l'intérieur vers la surface. Dans le cas du bois, au plus du phénomène de retrait, il y a apparition indésirable de fentes.

2° à cause du risque de caramélisation des sucres.  
 La température limite préconisée par différents auteurs varie entre 65 et 85°C pour les fruits dont l'abricot. Nous prendrons une température de 70°C pour les calculs.

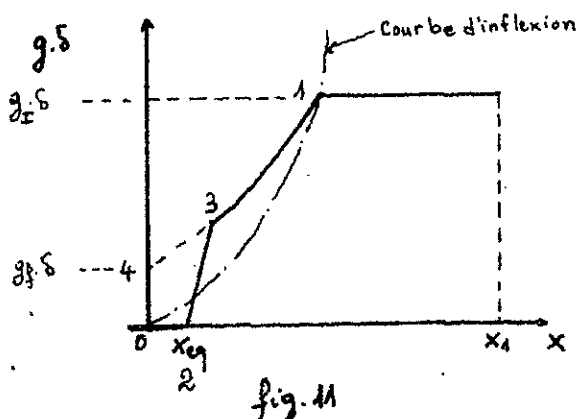
### I.5.2: Méthode de détermination du temps de séchage:

La détermination du temps de séchage se fait expérimentalement, en général. Néanmoins il existe des méthodes de détermination de la courbe approximative de séchage, basées sur les résultats de recherches de certains auteurs (voir réf 1 et 2)

#### I.5.2.1: Courbe d'inflexion:

C'est la courbe des points de jonction entre la première et la deuxième périodes de séchage (voir fig. 9). Le terme inflexion provient du fait qu'en ce point la vitesse de séchage commence à diminuer. La figure 10 représente les courbes d'inflexion pour différents produits.

#### I.5.2.2: tracé de la courbe approximative:



$x_1$ : humidité initiale rapportée à la matière sèche  
 $x_{eq}$ : humidité d'équilibre (voir I.2)  
 $g$ : vitesse de séchage [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ]  
 $\delta$ : demi-épaisseur (séchage des 2 côtés) [m]  
 indice 1: vitesse de séchage au début  
 indice 3: vitesse de séchage à la fin si la substance se comportait comme substance non hygroscopique jusqu'à la fin de séchage.

La courbe d'inflexion est une donnée.

$g_1 \cdot \delta$  (donc le point 1) est donné par la formule:

$$g_1 \cdot \delta = \frac{\alpha}{r} (\theta_1 - \theta_0)$$

$g_3 \cdot \delta$  (donc le point 4) est donné par la formule:

$$g_3 \cdot \delta = \frac{\lambda}{r \cdot \delta} (\theta_f - \theta_0)$$

$\theta_f$ : température du produit en fin de séchage s'il se comportait jusqu'à la fin comme substance non hygroscopique.

$$\theta_f \approx \frac{\theta + \frac{\lambda}{\alpha \cdot \delta} \theta_0}{1 + \frac{\lambda}{\alpha \cdot \delta}} \quad \text{avec } \lambda = \text{conductibilité thermique du produit sec}$$

Le point 3 est obtenu en traçant une ligne courbe entre 1 et 4, et une fois connue la droite 2-3. Celle-ci représente le comportement hygroscopique du produit (fruit), elle est donnée par la formule:

$$g = D \cdot \left(\frac{\pi}{\delta}\right)^2 (x - x_{eq})$$

$D$ : coefficient de diffusion de l'humidité dans le produit. Sa connaissance nous détermine la pente de la droite 2-3. D'où la détermination totale des points 1, 2, 3 et 4.



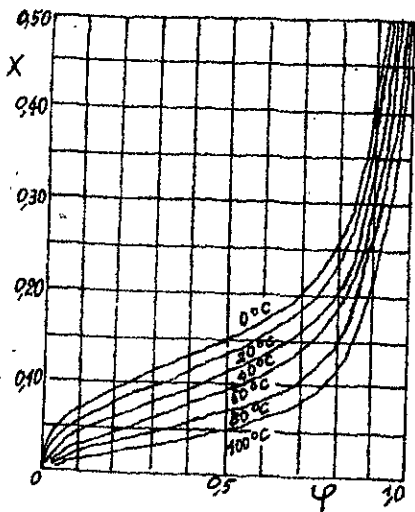
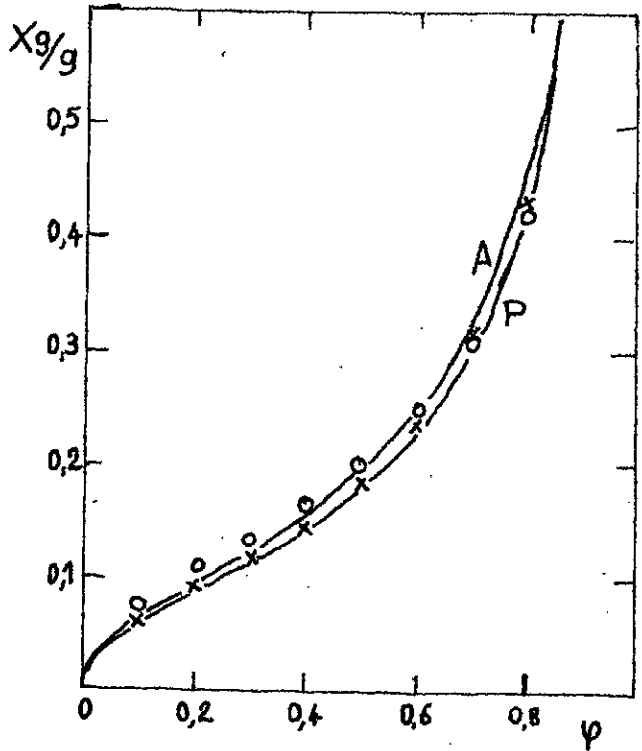


fig. 2



Apricots (A) and plums (P), 293°K. O apricots data (Filonenko and Chuprin, 1967), X plums data (Filonenko and Chuprin, 1967).

fig. 3

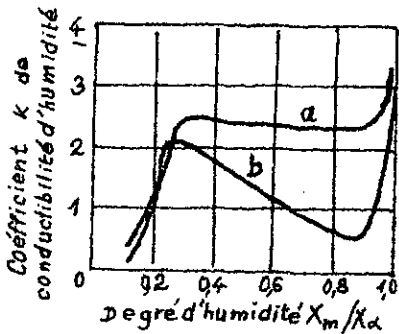


fig. 5. a: pomme de terre  
b: bois  
 $X_m$ : humidité moyenne du produit  
 $X_a$ : " initiale "

fig. 4: Enthalpie de liaison de quelques graminées (d'après Tuncer et Winkler).

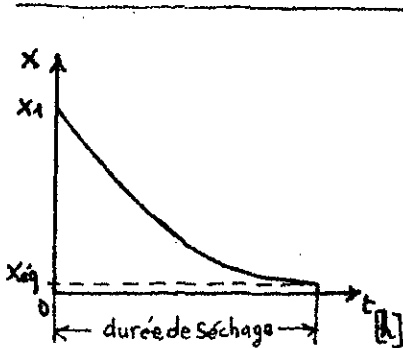
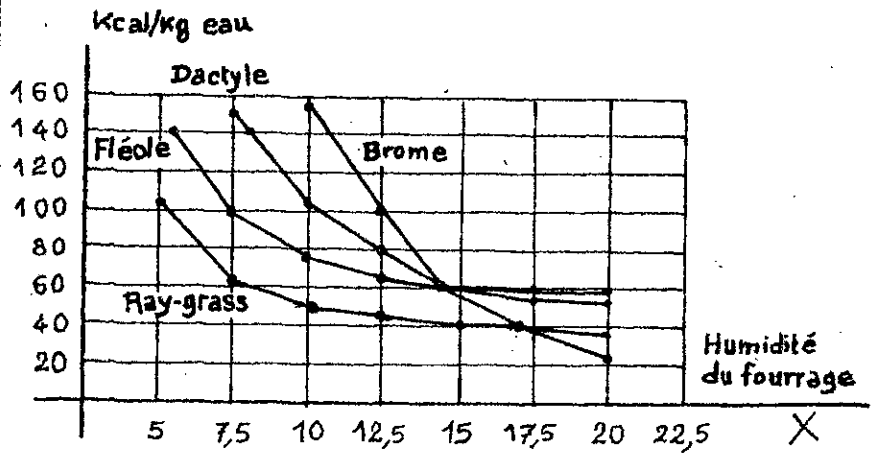


fig. 6

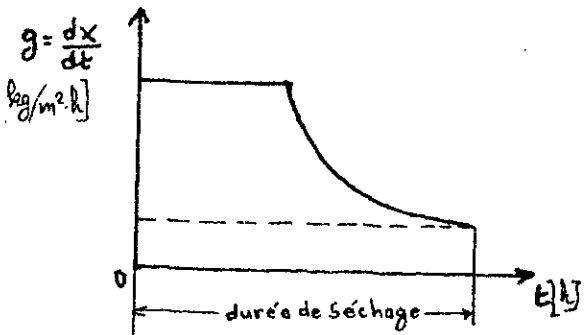


fig. 7

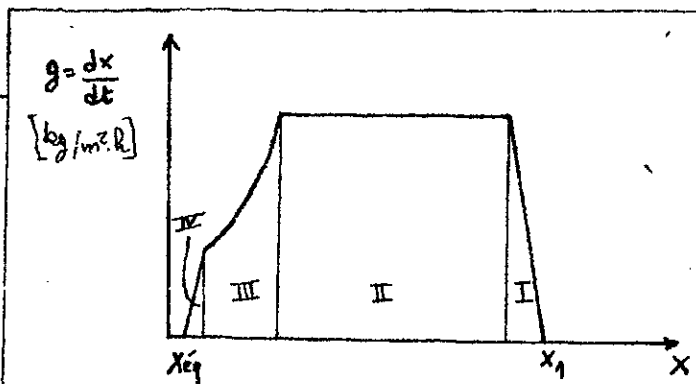
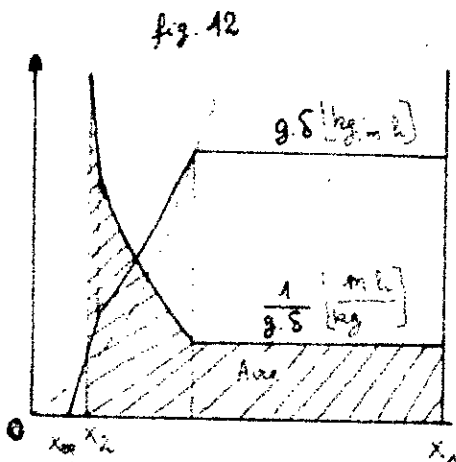


fig. 8

### I. 5.2.3: Détermination de la durée de séchage :



Par planimétrie on détermine l'aire hachurée une fois tracée la courbe  $\frac{1}{g.S}$ .

La formule donnant la durée de séchage est :

$$T = \text{Aire} \cdot S^2 \cdot S_{m.s}$$

### I. 5.2.4: Généralisation de la méthode :

Ce qui précède n'est valable que dans le cas où le produit est immobile (séchage en étuve ou armoire de séchage).

Si le produit est mobile nous avons deux cas :

1° sens de déplacement du produit et celui de l'air est le même (équi-courant)

2° sens de déplacement du produit contraire à celui de l'air (contre-courant)

Dans ces cas la courbe de séchage est modifiée. Selon Krischer, elle est de la forme :

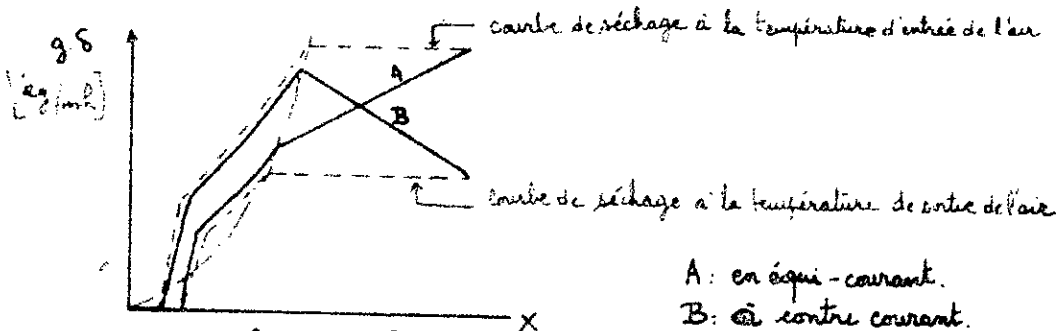


fig. 13

A : en équi-courant.

B : en contre courant.

L'évolution de la température de l'air et du produit au cours du séchage est représentée par les figures 14 et 15.

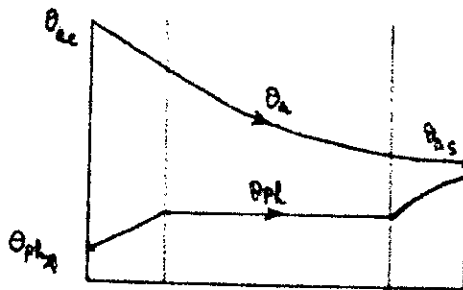


fig 14. équi-courant

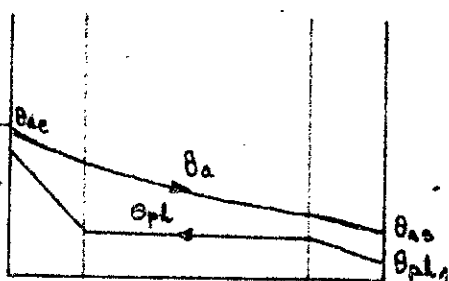


fig. 15. contre courant

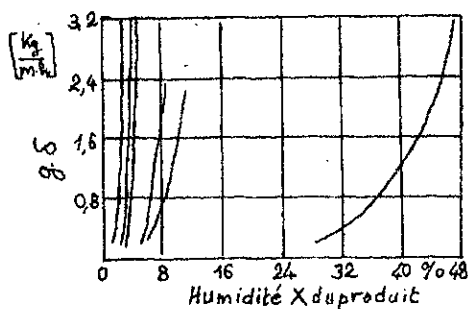
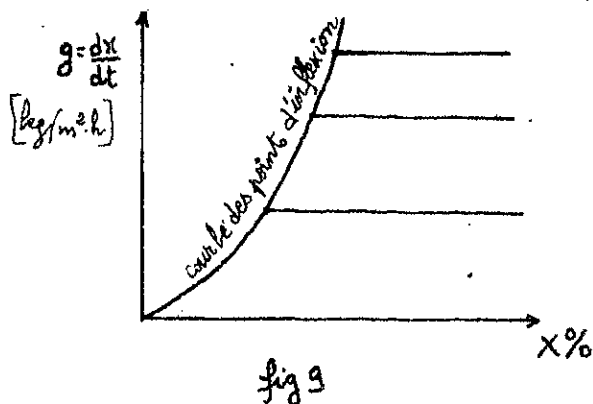
$\theta_{ae}$  = température de l'air à l'entrée

$\theta_{as}$  = " " " " à la sortie

$\theta_{pe}$  = température du produit à l'entrée

$\theta_{ps}$  = température du produit à la sortie

Dans le séchage des fruits et légumes qui sont sensibles à température ( $\theta_{max} = 70^{\circ}C$ ) le procédé à équi-courant est plus convenable. Le procédé nous permet d'utiliser une température de l'air à l'entrée très élevée, ce qui donnerait une grande puissance évaporatoire. Avec le procédé à contre courant il y a risque de défermer le fruit, l'air chaud attaquant le fruit le plus sec.



de gauche à droite : amas en vrac de matériaux à pores grossiers comme boules de verre, ou sable de mer ; matériaux à pores fins comme pierre à briques, plâtre ; tout à fait à droite, béton de pierre poreux. Selon KRISCHER et GÖRLING. (source Ref n° 4)

# Chapitre II: RECUEIL METEOROLOGIQUE ET RAYONNEMENT SOLAIRE

## II.0: Situation géographique

La région de Bou-Saada se trouve dans la zone des hautes plaines steppiennes. L'implantation du Village Solaire Intégré est prévue à Ed-diss dont les coordonnées sont:

latitude:  $35,40^\circ$   
altitude: 500 m  
longitude:  $4^\circ 11'$  (Bou-Saada)

## II.1: Données météorologiques:

La grande difficulté qui s'est posée à nous, dans cette étude est plus précisément l'insuffisance et parfois le manque de données climatiques (à différencier des données météorologiques). C'est là une des grandes difficultés dans une conception d'un procédé d'utilisation de l'énergie solaire. Nous avons pu réunir quelques données climatiques à partir de la référence n°16, bien qu'elles soient nettement insuffisantes et très anciennes, nous les reproduisons en annexe 2.

Pour une conception donnée de tout système dépendant des conditions atmosphériques (solaires, éoliennes, climatisation, chauffage), il s'agit de faire une différence entre les valeurs prises pour le dimensionnement, et les valeurs réelles à chaque instant dont il faut tenir compte lors de l'exploitation du système.

Dans le premier, en principe, il s'agit d'une étude approfondie qui nécessite un grand nombre de données pour procéder à une analyse, afin de déterminer les valeurs les plus fréquentes, donc les plus optimales. Or le manque de données statistiques ne nous permet pas de procéder à cette analyse; les valeurs que nous choisirons sont tout à fait arbitraires. La seule idée que nous voulons maintenir est d'assurer l'exploitation de l'installation durant toute l'année; ce qui nous amène à prendre la température probable à 9h en janvier, de  $12^\circ$ , un degré hygrométrique arbitrairement égal à 50%, en maintenant les conditions de séchage ( $70^\circ\text{C}$ ) invariable durant toute l'année, de même que la puissance évaporatoire de l'installation.

Pour la régulation des paramètres (exploitation), nous sommes amenés à adopter une surface de captage de l'énergie solaire variable.

Pour ce qui est du vent nous n'avons aucune donnée, même très ancienne.

## II.2: Ensoleillement:

### II.2.0. Nature du rayonnement solaire:

La figure 16 montre le spectre solaire hors atmosphère et au pôle. Il est remarquable que nous pouvons assimiler le soleil à un corps noir rayonnant à une température  $T \approx 5800^\circ\text{K}$  en vertu de la loi de Wien:

$$\lambda_{\max} T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad \text{avec } \lambda_{\max} \approx 0,5 \mu\text{m}.$$

Ou bien en utilisant la loi de Stephan-Boltzman:

$$E = \sigma T^4$$

avec  $\sigma = 4,3 \cdot 10^8 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^4$  et  $E =$  énergie de la réaction nucléaire du cycle hydrogène-hélium qui se produit à la surface du soleil, on détermine  $T = 5762^\circ\text{K}$ .

L'aire se trouvant sous la courbe du spectre hors atmosphère nous donne la constante solaire  $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ . C'est le flux d'énergie solaire que peut recevoir une plaque perpendiculaire aux rayons hors atmosphère.

En traversant l'atmosphère, ce flux est amoindri à cause de l'absorption d'énergie par les molécules gazeuses triatomiques ( $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) et les poussières en suspension. Le spectre solaire au sol est indiqué sur la figure 16.

L'énergie reçue par une plaque dépend de l'angle d'incidence du rayonnement. D'après la loi de Lambert:  $E_i = E_n \cdot \cos i$

$E_n$  = énergie reçue par une plaque perpendiculaire au flux énergétique  
 $E_i$  = " " " " plaque inclinée d'un angle  $i$  par rapport à la plaque perpendiculaire au flux.

Définitions de quelques notions:

\* Rayonnement direct: C'est le rayonnement reçu par une plaque, de direction déterminée, provenant directement du soleil.

\* Rayonnement diffus: C'est le rayonnement reçu par la plaque, provenant des molécules de gaz, des gouttelettes liquides et d'autres matières en suspension dans l'atmosphère et aussi de la réflexion du rayonnement direct par le sol environnant. Ce rayonnement n'a pas une direction privilégiée.

\* Rayonnement global: c'est la somme des rayonnements direct et diffus.

\* Fraction d'insolation: c'est le rapport entre la durée d'ensoleillement journalier réel et la durée d'ensoleillement par temps parfaitement clair.

## II.2.1: Eléments de cosmographie:

(voir fig 17, 18, 19).

où  $\varphi$ : latitude du lieu M

$\delta$ : déclinaison du soleil (variable dans l'année)

AH = angle horaire (zéro à midi vrai, négatif le matin, positif l'après midi)  
 60 mn  $\approx$  15°

$i$ : angle d'incidence du flux solaire (variable dans la journée)

$h$ : hauteur du soleil (angle de la direction du soleil et du plan horizontal)

$\alpha$ : azimut du soleil par rapport au Sud.

$\alpha$ : angle d'orientation du capteur, du plan considéré

$\gamma$ : inclinaison du capteur ou du plan considéré.

Il est important de connaître l'angle d'incidence pour pouvoir calculer l'énergie reçue par une surface de coordonnées  $(\alpha, \gamma)$ . Cet angle est donné par la formule:

$$\cos i = \cos \delta (\cos \alpha \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi + \sin \gamma \cdot \cos \varphi) \cdot \cos AH + \cos \delta (\sin \alpha \cdot \cos \gamma) \cdot \sin AH + \sin \delta [-\cos \alpha \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi + \sin \gamma \cdot \sin \varphi]$$

Pour la démonstration de cette formule voir référence n° 17.

La déclinaison  $\delta$  est donnée par la formule:

$$\delta = \text{arc sin} \left[ 0,4 \sin N \cdot \frac{360}{365} \right]$$

avec  $N$  = nombre de jours écoulés depuis l'équinoxe de printemps (21 mars).

Dans nos calculs nous utiliserons le tableau suivant (source: réf n° 20) :

Déclinaison moyenne mensuelle du soleil [δ].						
Moyenne du mois	Janvier -20,8	Février -12,7	Mars -1,9	Avril +9,9	Mai +18,9	Juin +23,1
Moyenne du mois	Juillet +21,3	Août +13,7	Septembre +3,0	Octobre -8,8	Novembre -18,4	Décembre -23,0

## II. 2. 2. Choix de l'orientation des capteurs :

Nous avons exploité les documents du CRAU (réf n° 18, 19) que nous mettons sous forme de courbes (voir à partir de la page 17).

En étudiant ces courbes nous constatons que la position des capteurs à 45° dirigés vers le Sud est la plus appropriée puisque nous voulons maintenir l'idée d'utiliser le séchoir durant toute l'année. Cette position nous permet d'avoir une charge presque régulière durant l'année.

Pour cette position choisie nous donnons le tableau en page 27. Dans ce cas les formules données en II. 2. 1 se simplifient comme suit :

$$\alpha = 0^\circ$$

$$\delta = 45^\circ$$

$$\varphi = 31,40^\circ$$

$$\cos i \approx 0,69420045 \cos \delta \cos AH - 0,8979233 \sin \delta$$

d'angle horaire du lever du soleil dans ce cas (direction vers le sud) :

$$\cos AH_0 = \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

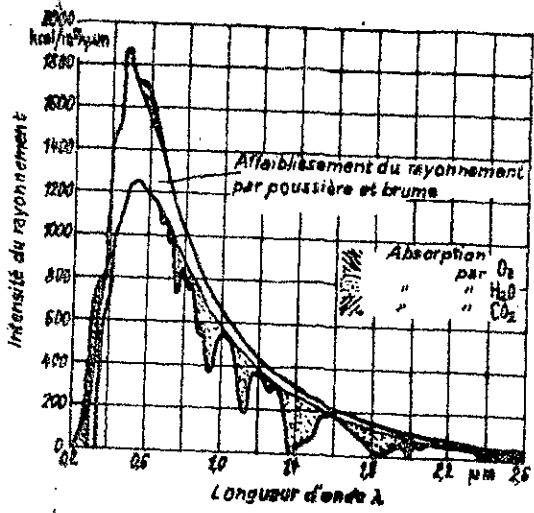


Fig. 16. Répartition spectrale d'intensité de rayonnement solaire.

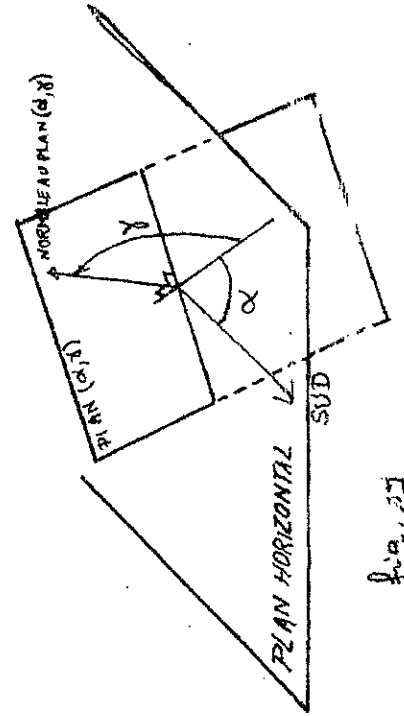
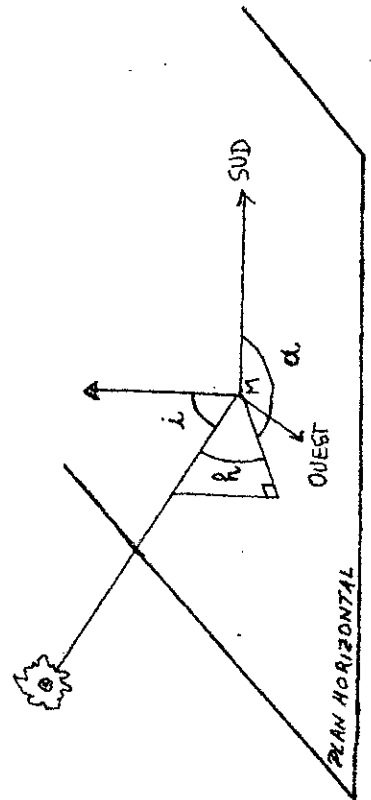
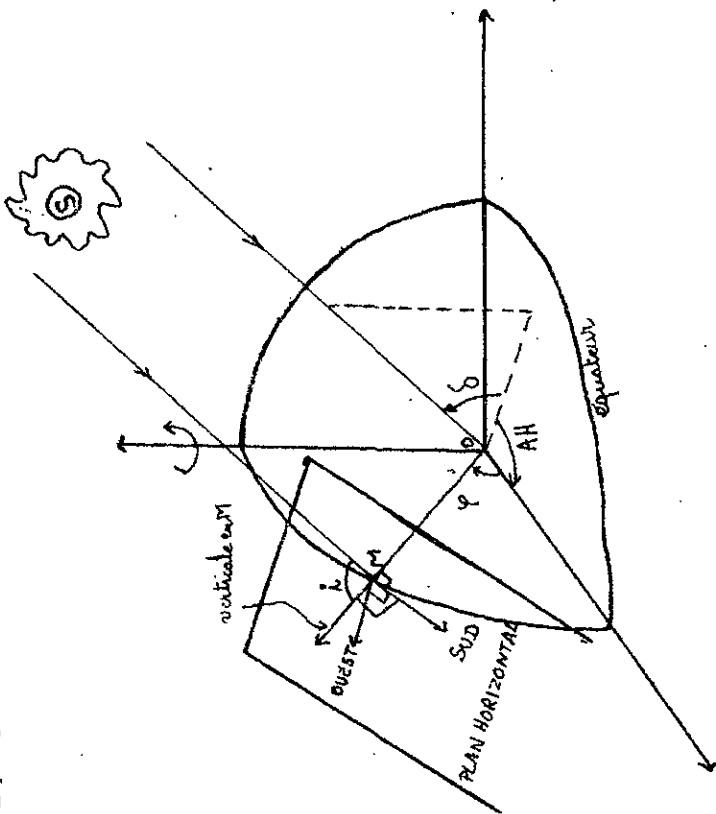


Fig. 17

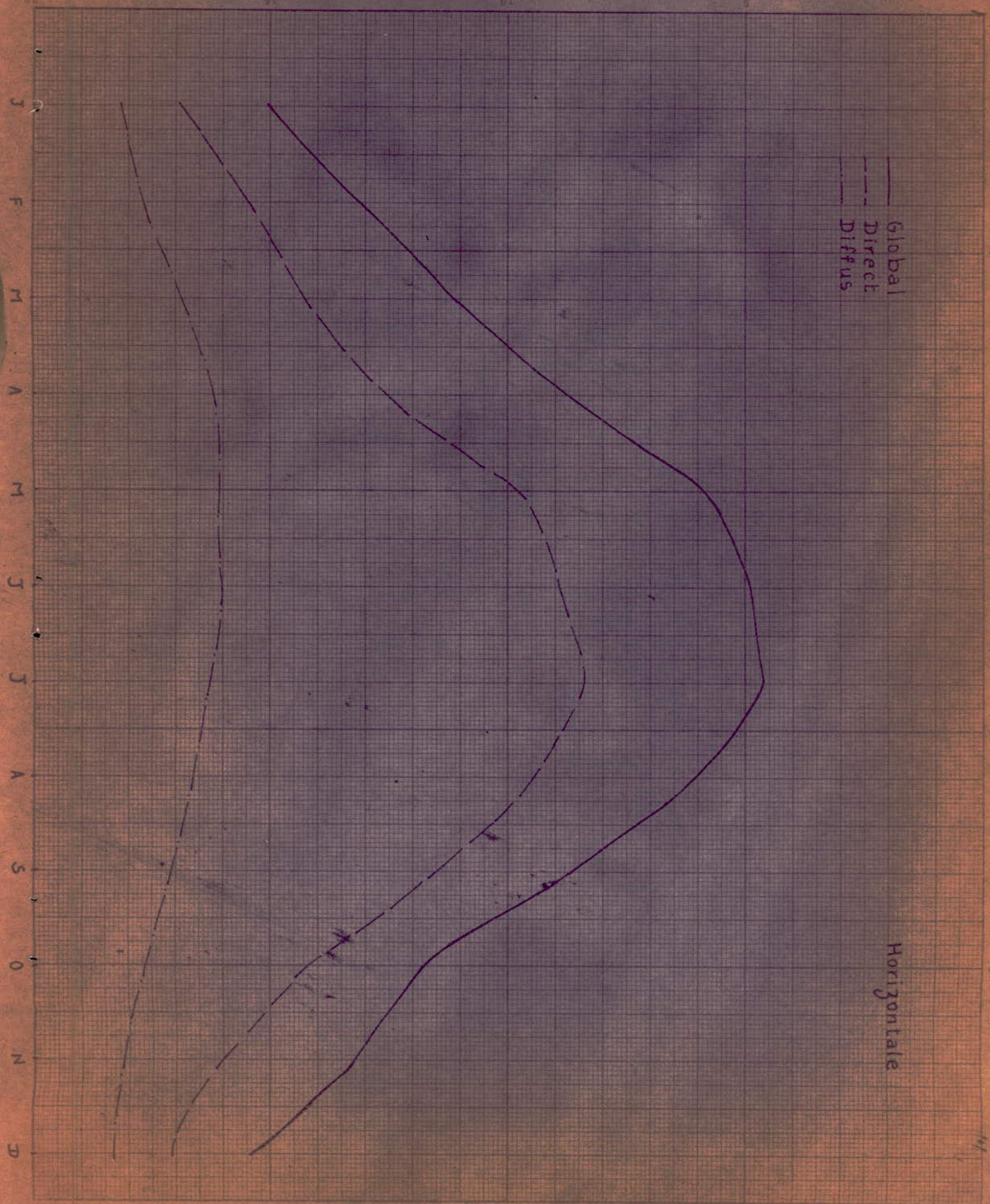


$Wh/m^2/J$

2500  
5000  
7500

Global  
Direct  
Diffus

Horizontale





Wh/m<sup>2</sup>/J

7500

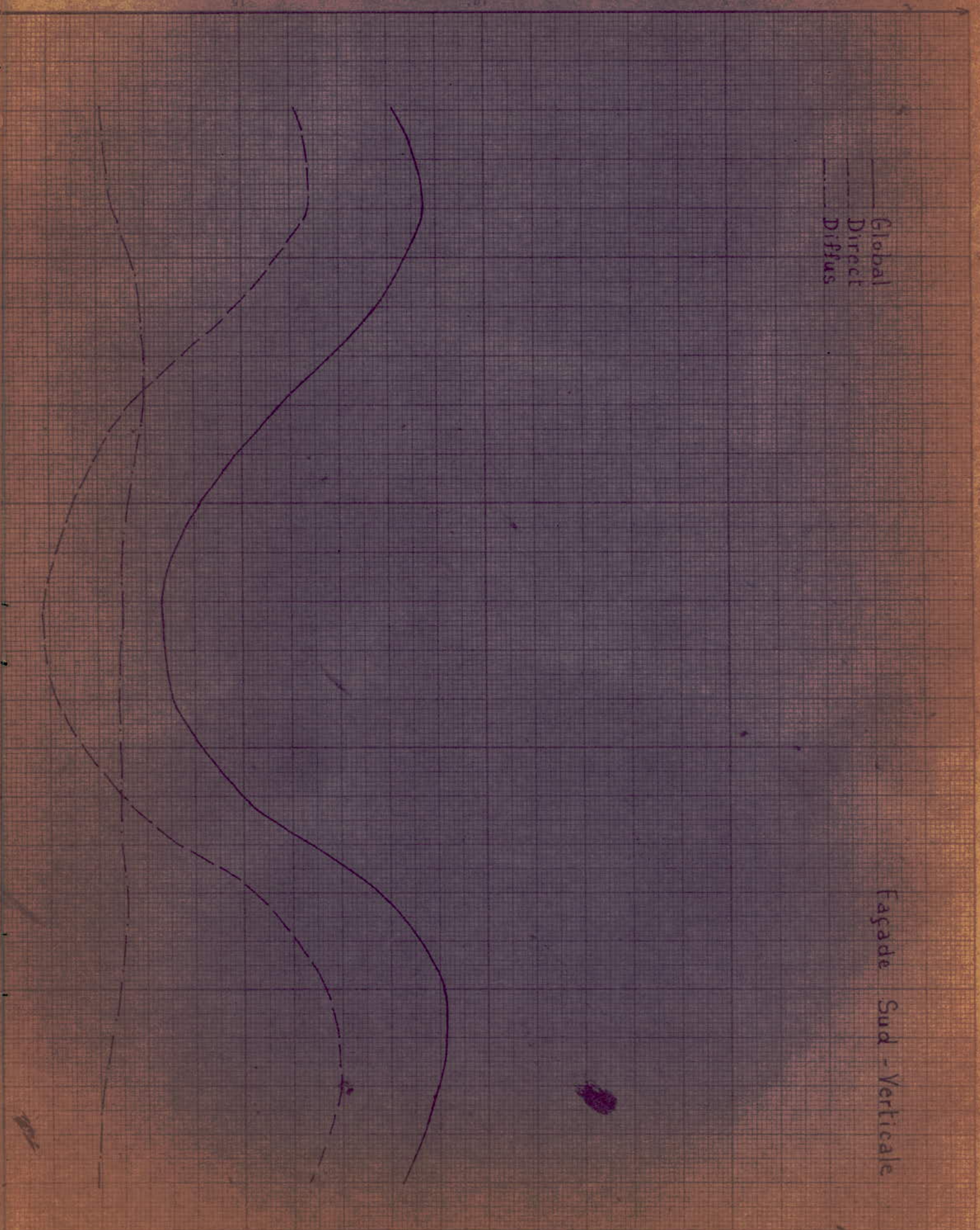
5000

2500

Global  
Direct  
Diffus

Façade Sud - Verticale

J F M A M J J A S O N D



Façade Sud à 45°

Wh/m<sup>2</sup>/J

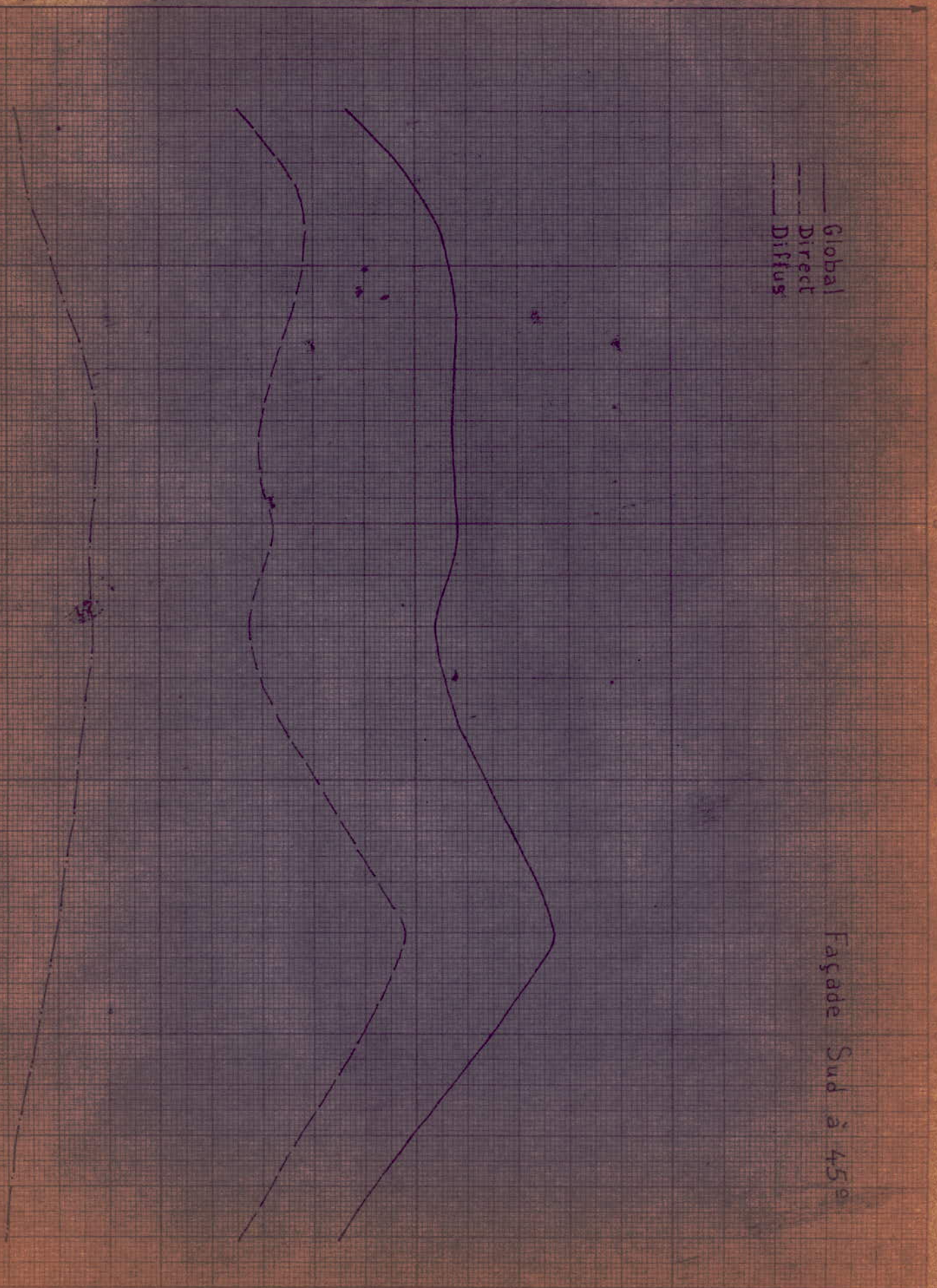
1500

5000

2500

Global  
Direct  
Diffus

J F M A M J J A S O N D



Nord Verticall

WR/m<sup>2</sup>/J

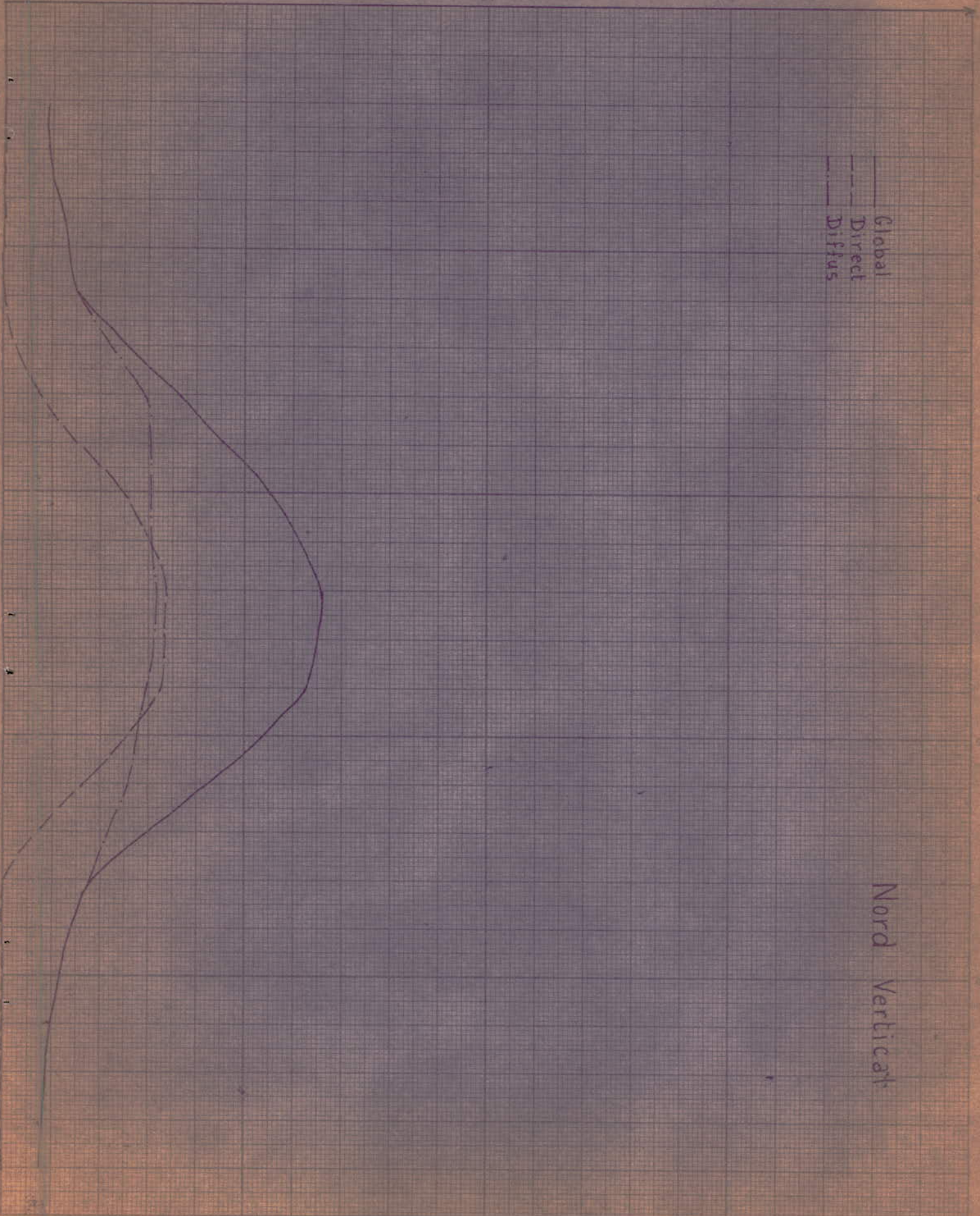
- Global
- Direct
- Difflus

7500

5000

2500

J F M A M J J A S O N D



$W_h/m^2/J$

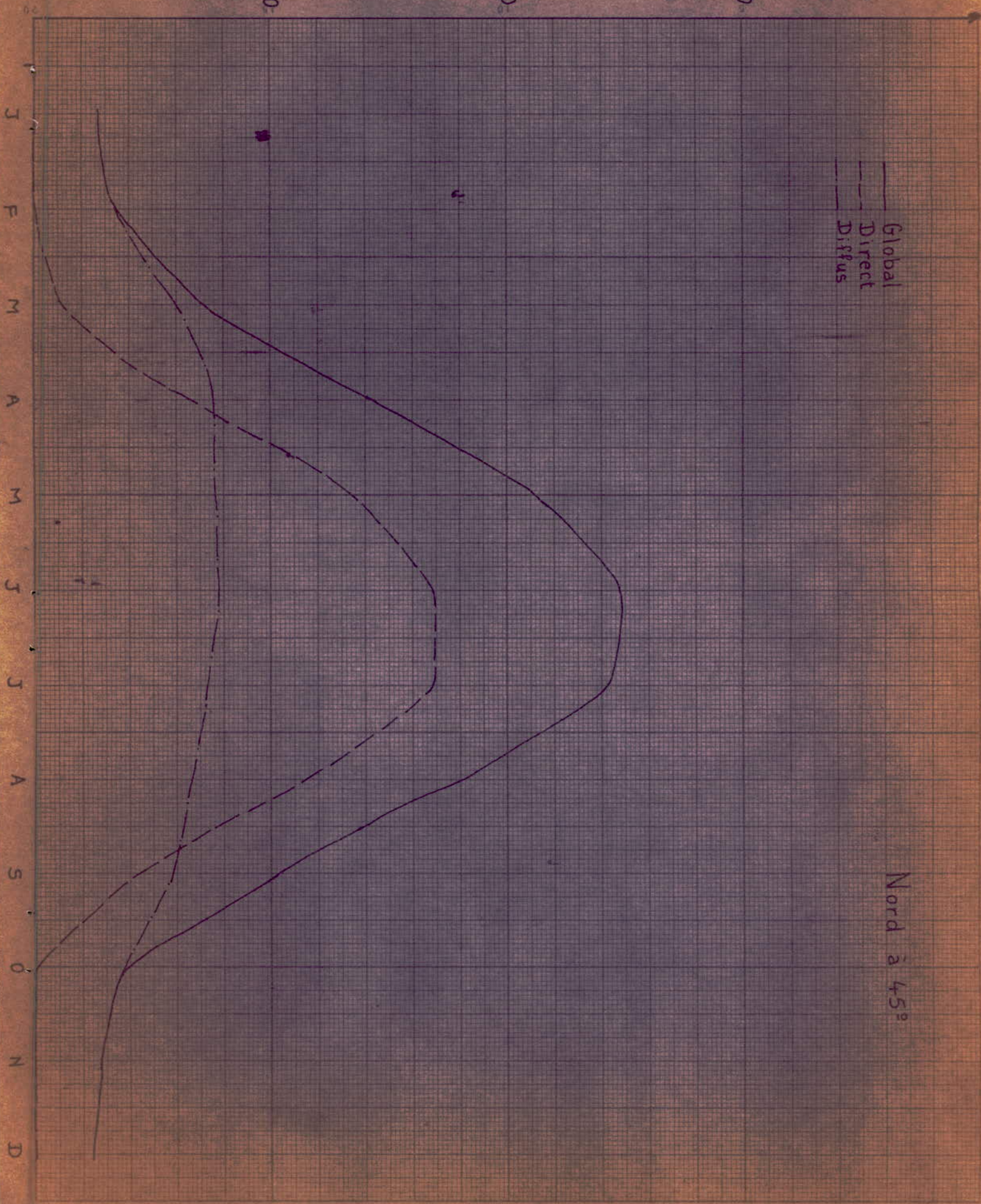
7500

5000

2500

Global  
Direct  
Diffus

Nord à 45°



Wh/m<sup>2</sup>/J

7500

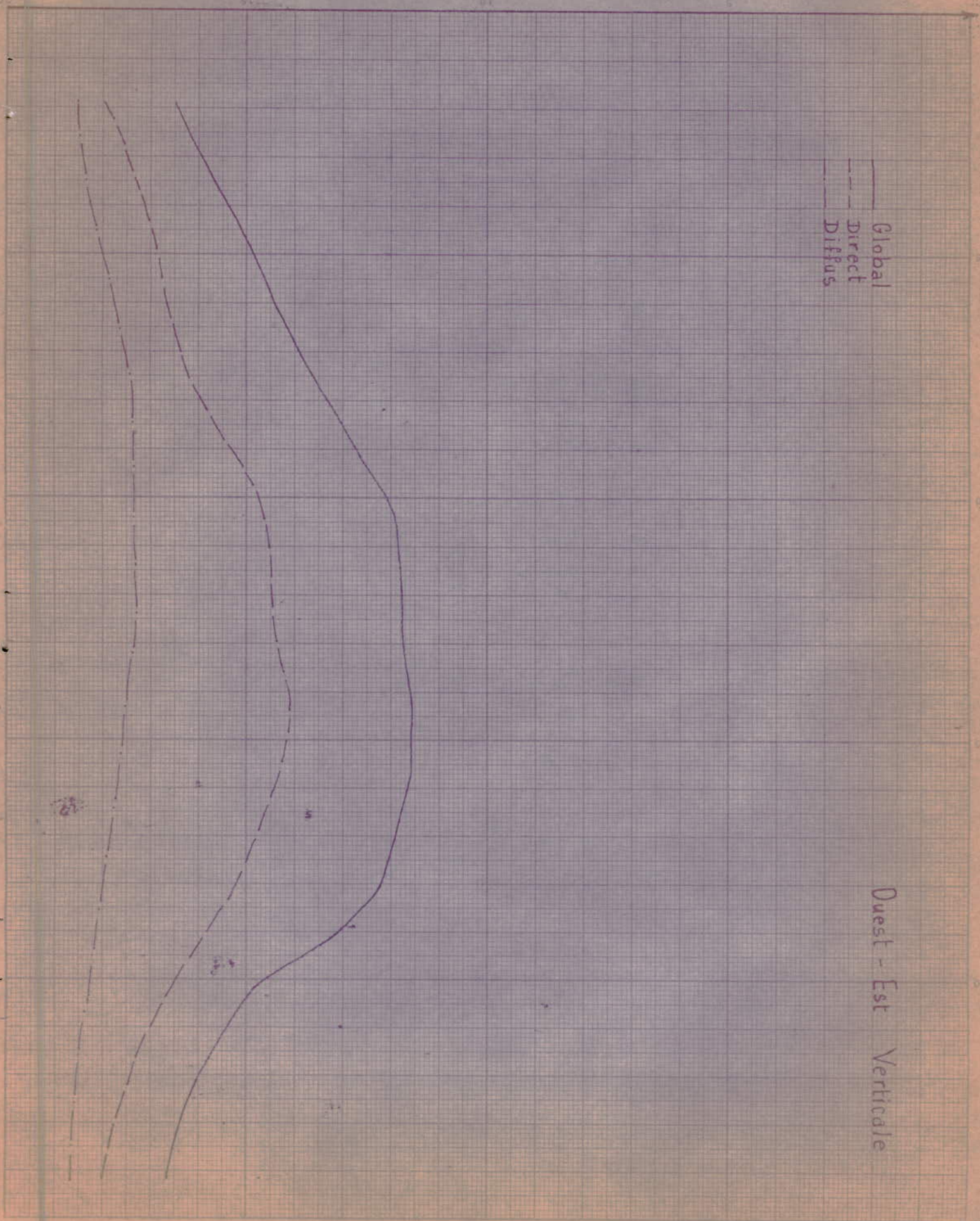
5000

2500

Global  
Direct  
Diffus

Quest - Est  
Verticale

J  
F  
M  
A  
M  
J  
J  
A  
S  
O  
N  
D



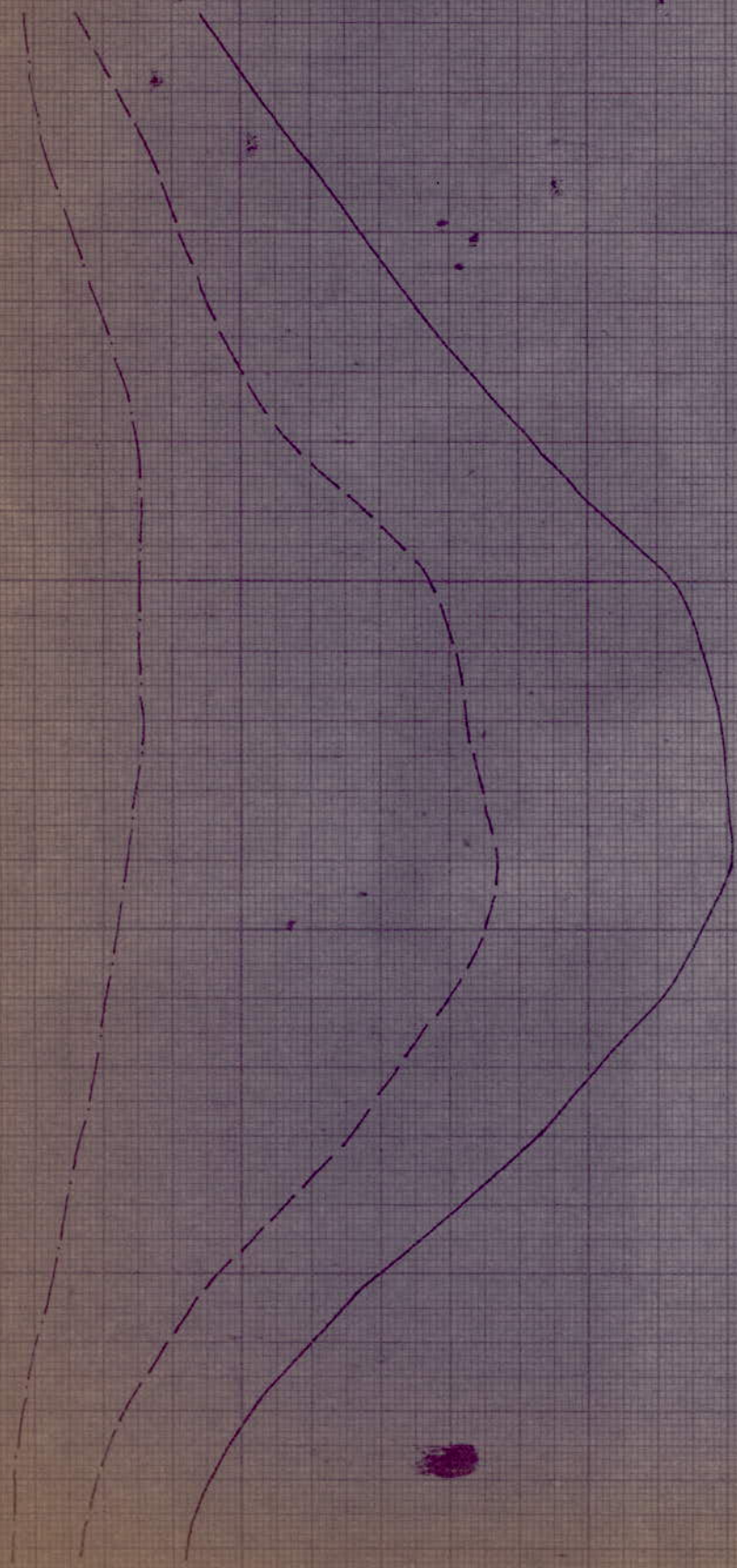
Wh/m<sup>2</sup>/J

7500  
5000  
2500

Global  
Direct  
Diffus

J  
F  
M  
A  
M  
J  
J  
A  
S  
O  
N  
D

Quest - Est à 45°



$W_p/m^2/J$

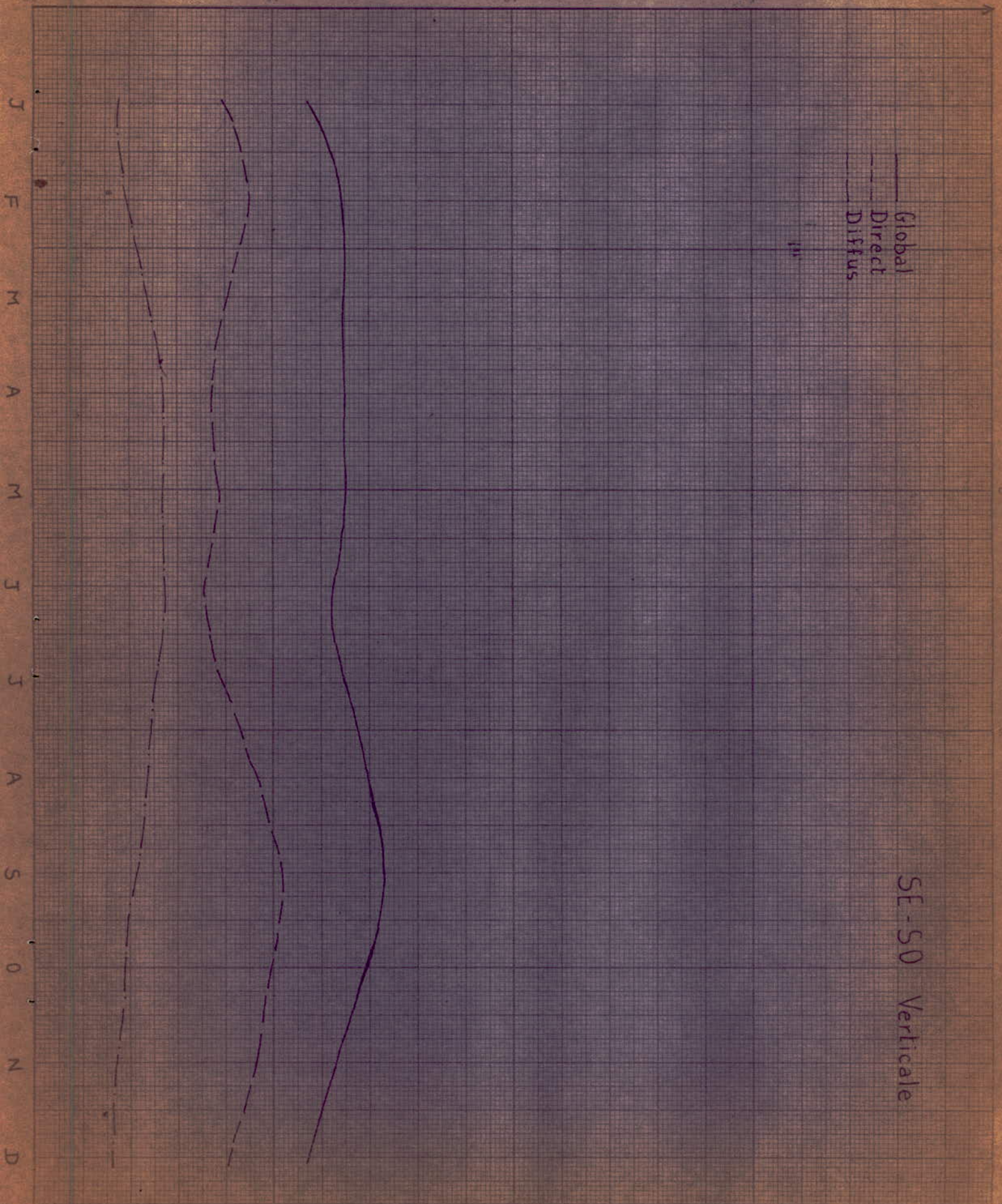
7500

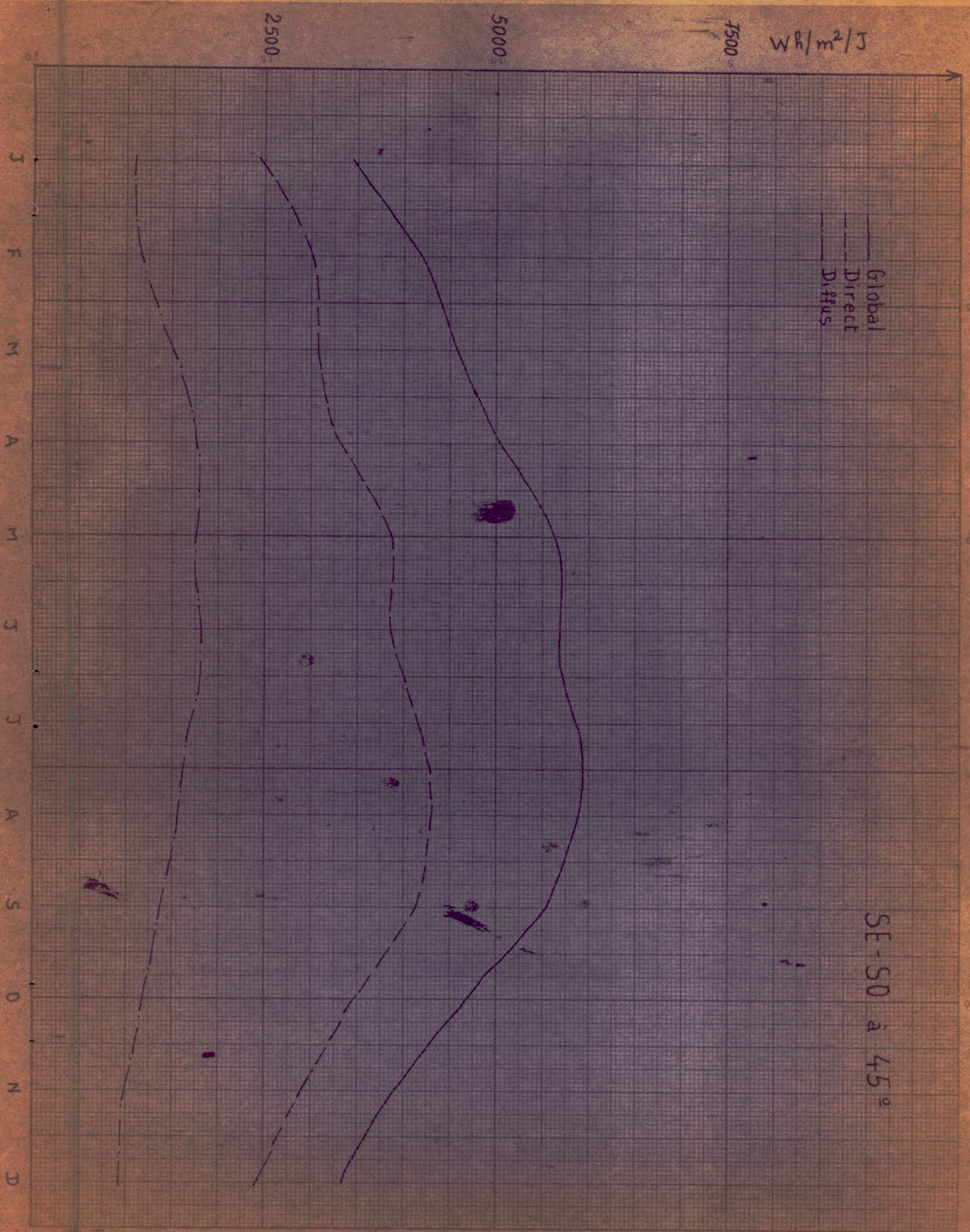
5000

2500

Global  
Direct  
Diffus

SE-SO Verticale







W<sub>A</sub>/m<sup>2</sup>/J

7500

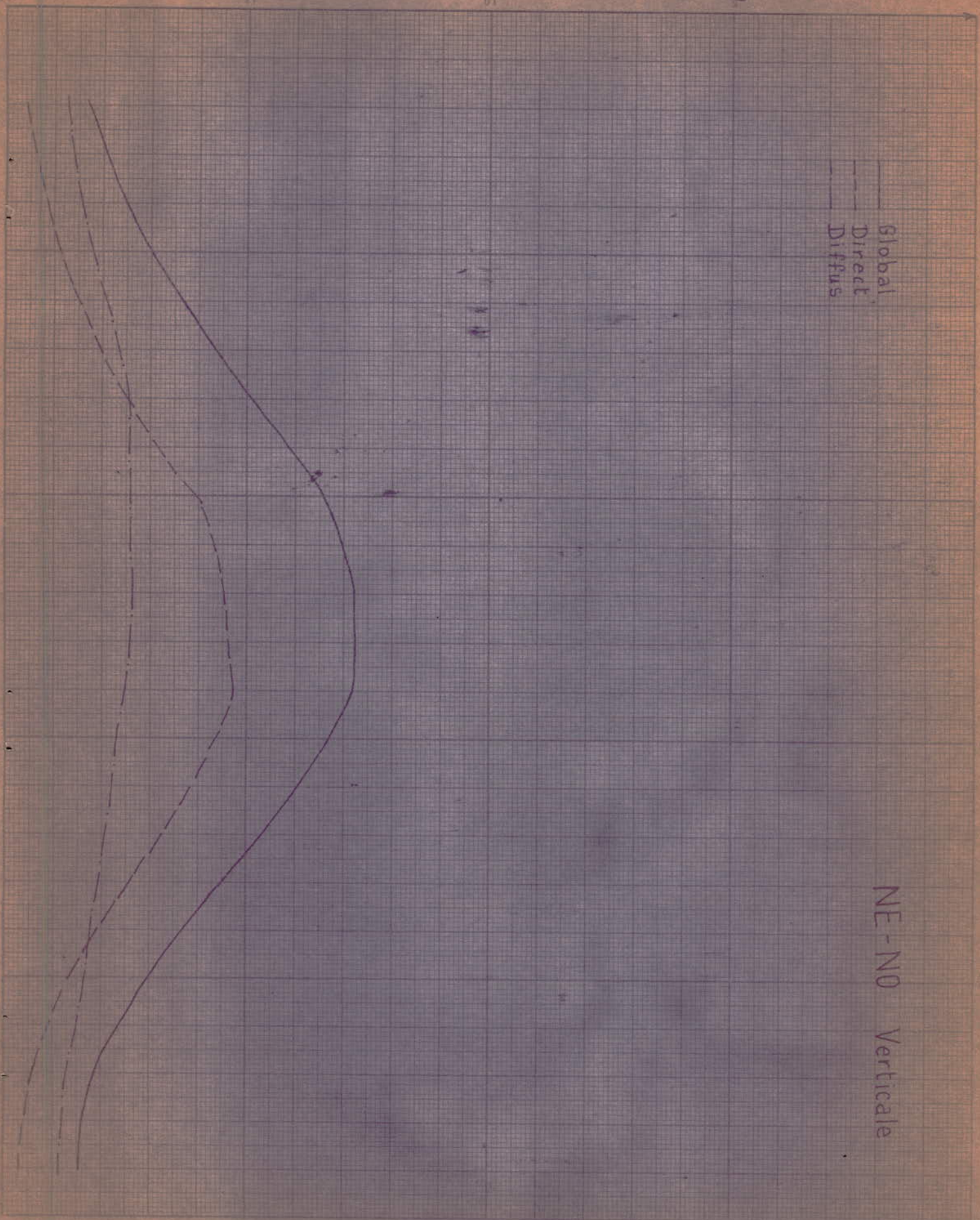
5000

2500

Global  
Direct  
Diffus

NE-NO Verticale

J F M A M J J A S O N D



$Wh/m^2/J$

7500

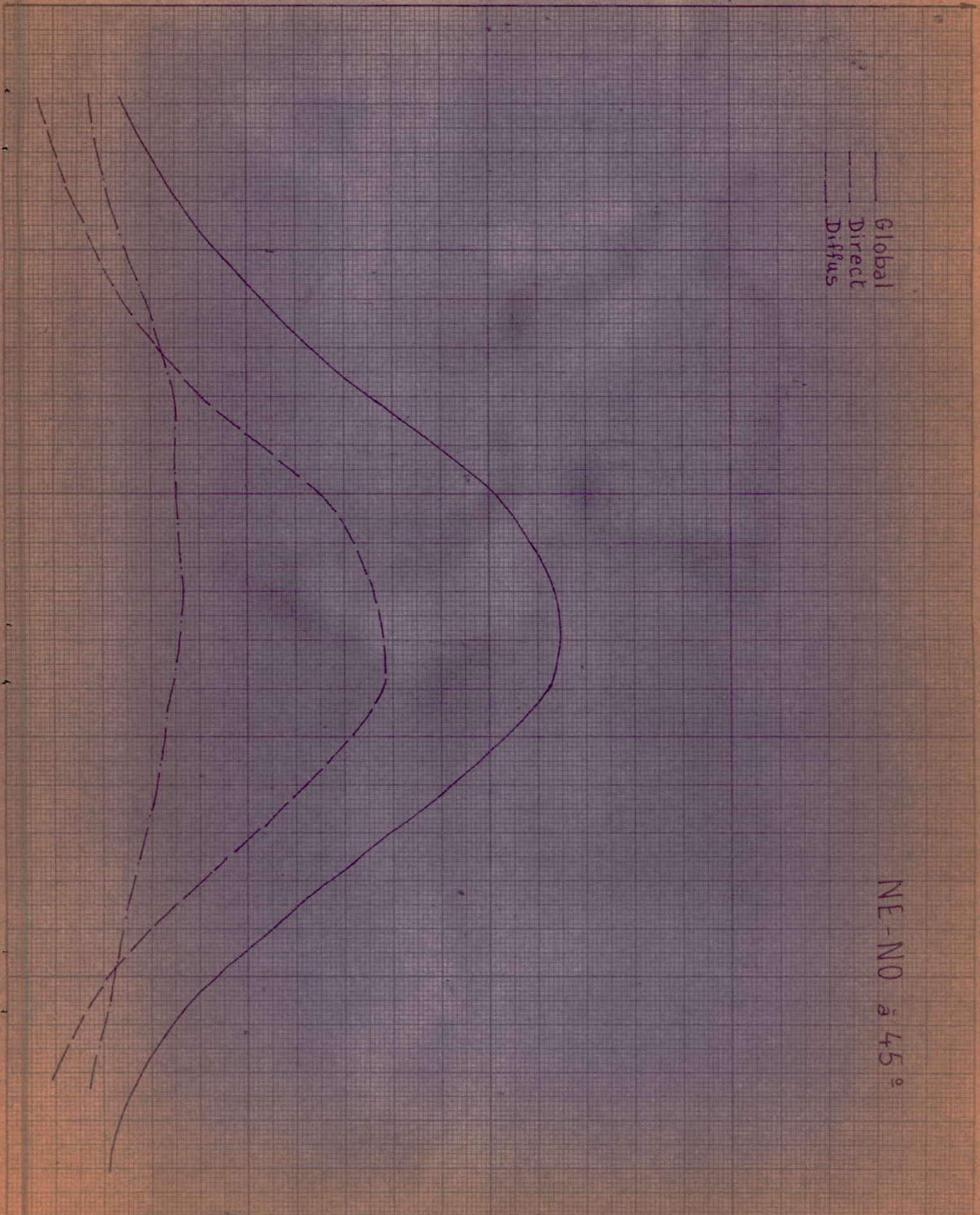
5000

2500

Global  
Direct  
Diffus

NE-NO  $\bar{\alpha}$  45°

J  
F  
M  
A  
M  
J  
J  
A  
S  
O  
N  
D



ED-DISS . Latitude = 35,40 . Altitude = 500 . Plan: 00,45

n	Mois	Angle horaire Lever du soleil degré'	Azimuth Lever du soleil degré'	Irradiation quotidienne globale. Jour clair Wh/m <sup>2</sup> . jour	Angles horaires du lever, du coucher du soleil et durée du jour en heures pour le plan considéré					T.A.U	Angle d'incidence moyen . degré	Irradiation quotidienne diffuse du plan. [D] Wh/m <sup>2</sup> . jour	Irradiation quotidienne directe du plan. [S] Wh/m <sup>2</sup> . jour	Irradiation quotidienne globale du plan. [G] Wh/m <sup>2</sup> . jour	
					degré'	degré'	degré'	degré'	heure						
56	Janvier	9	-70	-63	6814	-72	70	0	0	9,47	1,159	40,4	1069	3286	4355
62	février	9	-76	-73	7299	-78	76	0	0	10,27	1,094	42,8	1262	3925	5187
59	mars	9	-84	-86	7542	-86	84	0	0	11,33	1,041	47,9	1627	3792	5419
61	avril	9	-93	-100	6913	-88	89	0	0	11,80	0,981	52,8	1880	3511	5391
73	Mai	9	-100	-112	6050	-86	87	0	0	11,53	0,935	55,6	1820	3623	5443
75	juin	9	-104	-119	5588	-85	86	0	0	11,40	0,917	57,4	1839	3372	5210
80	juillet	8	-103	-116	5724	-86	87	0	0	11,53	0,924	57,0	1730	3733	5462
80	août	8	-96	-106	6433	-87	88	0	0	11,67	0,956	54,0	1624	4335	5959
77	septembre	8	-88	-92	7337	-89	88	0	0	11,80	1,021	50,9	1489	4901	6390
69	octobre	8	-80	-78	7377	-82	80	0	0	10,80	1,071	65,0	1300	4447	5747
64	novembre	8	-72	-66	6942	-74	72	0	0	9,73	1,136	41,1	1067	3881	4947
57	décembre	8	-69	-60	6655	-71	69	0	0	9,33	1,186	40,4	994	3276	4270

2ème PARTIE

Calculs techniques

# Chapitre III: LES DIFFERENTS TYPES DE SECHOIRS ET CHOIX DU SECHOIR

## III.1: Les différents types de séchoirs:

Les séchoirs peuvent être classés en :

+ séchoirs-étuves (cases ou armoires de séchage):

Ce sont des séchoirs à exploitation discontinue, c'est à dire qu'on y place la matière à sécher et on attend toute la durée nécessaire au séchage pour retirer le produit.

Il en existe :

- à ventilation naturelle : fig 26

- à ventilation forcée :

• avec ventilateur externe : fig 23 et 24

• avec ventilateur interne : fig 20, 21, 22 et 26

Cas particulier: des chercheurs travaillant sur le séchage solaire utilisent pour leurs expériences des séchoirs du type séchoir-étuve comme le montrent les figures 28 et 29. Les tentes solaires dont il était question en introduction sont aussi de ce type.

+ séchoirs-tunnels : (fig 30 et 31)

Ce sont des séchoirs à exploitation continue, c'est à dire qu'on y introduit à chaque intervalle de temps fixe une quantité déterminée de matière à sécher et on retire de l'autre côté une quantité de produit séché.

Il en existe :

- à contre-courant ou/et à équi-courant

- à ventilateur interne ou externe

- à un ou plusieurs ventilateurs

- à charriots, à convoyeurs

- à une ou plusieurs rangées

- etc...

## III.2: Choix du type de séchoir:

Sur la base du critère : exploitation régulière (continue), nous choisissons le séchoir suivant:

- séchoir tunnel (canal de séchage)

à ventilation externe avec un seul ventilateur (le calorifère étant externe), à équi-courant (le produit étant sensible à la température), à charriot (pour ne pas détériorer le produit), à une seule rangée de charriots (100 kg/h → 100 kg/charriot).

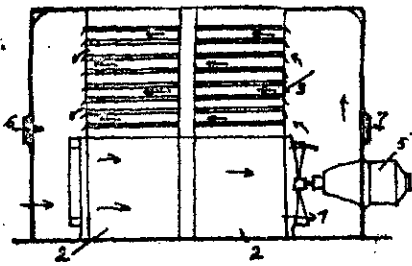


fig. 20

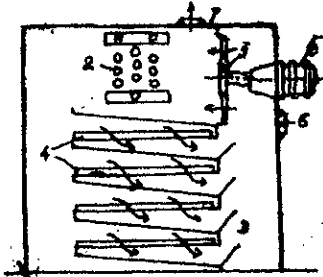


fig. 21

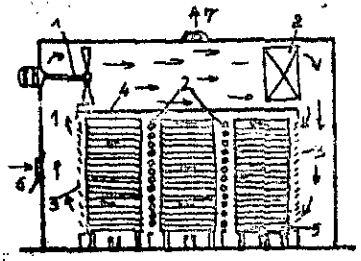
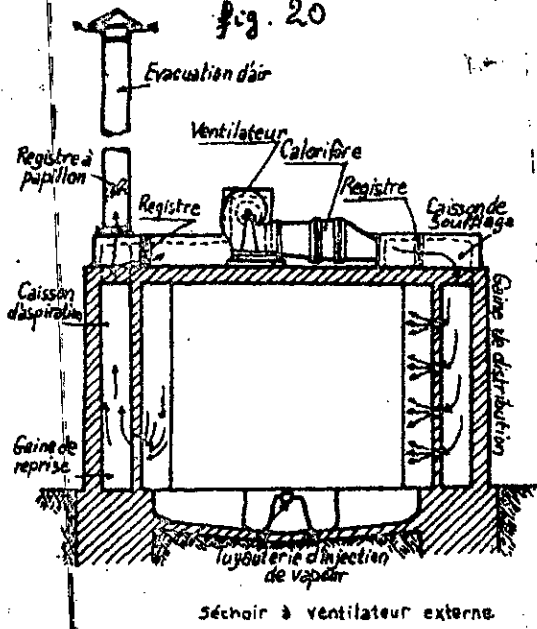


fig. 22



Séchoir à ventilateur externe.

fig. 23

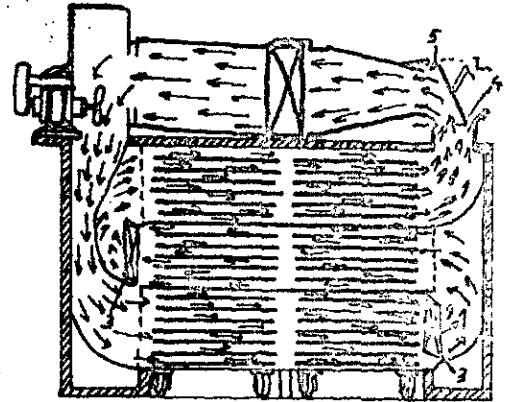
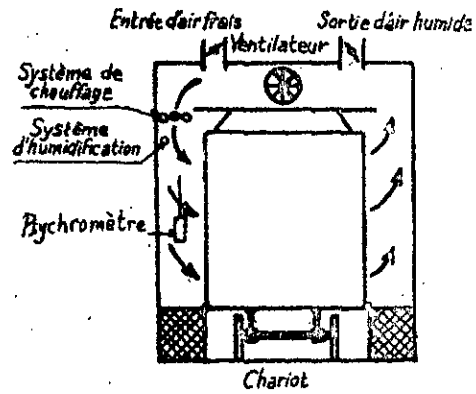


fig. 24



Chariot

fig. 25

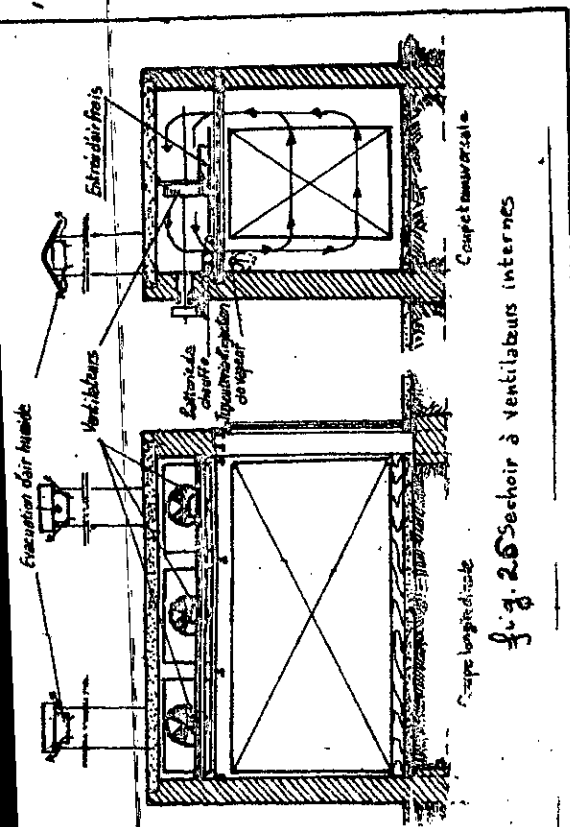
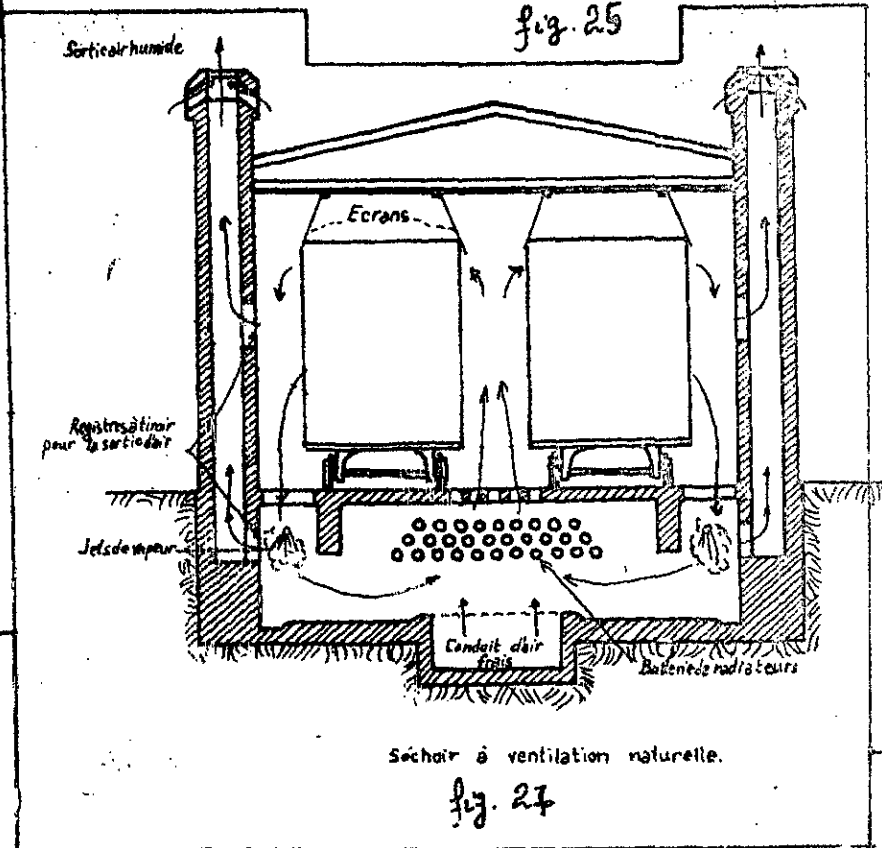


fig. 26 Séchoir à ventilateurs internes

Compartiment vertical



Séchoir à ventilation naturelle.

fig. 27

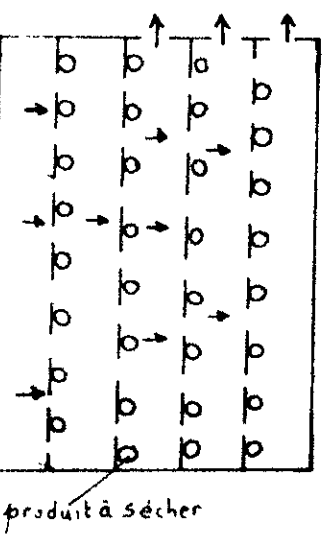


Fig. 28

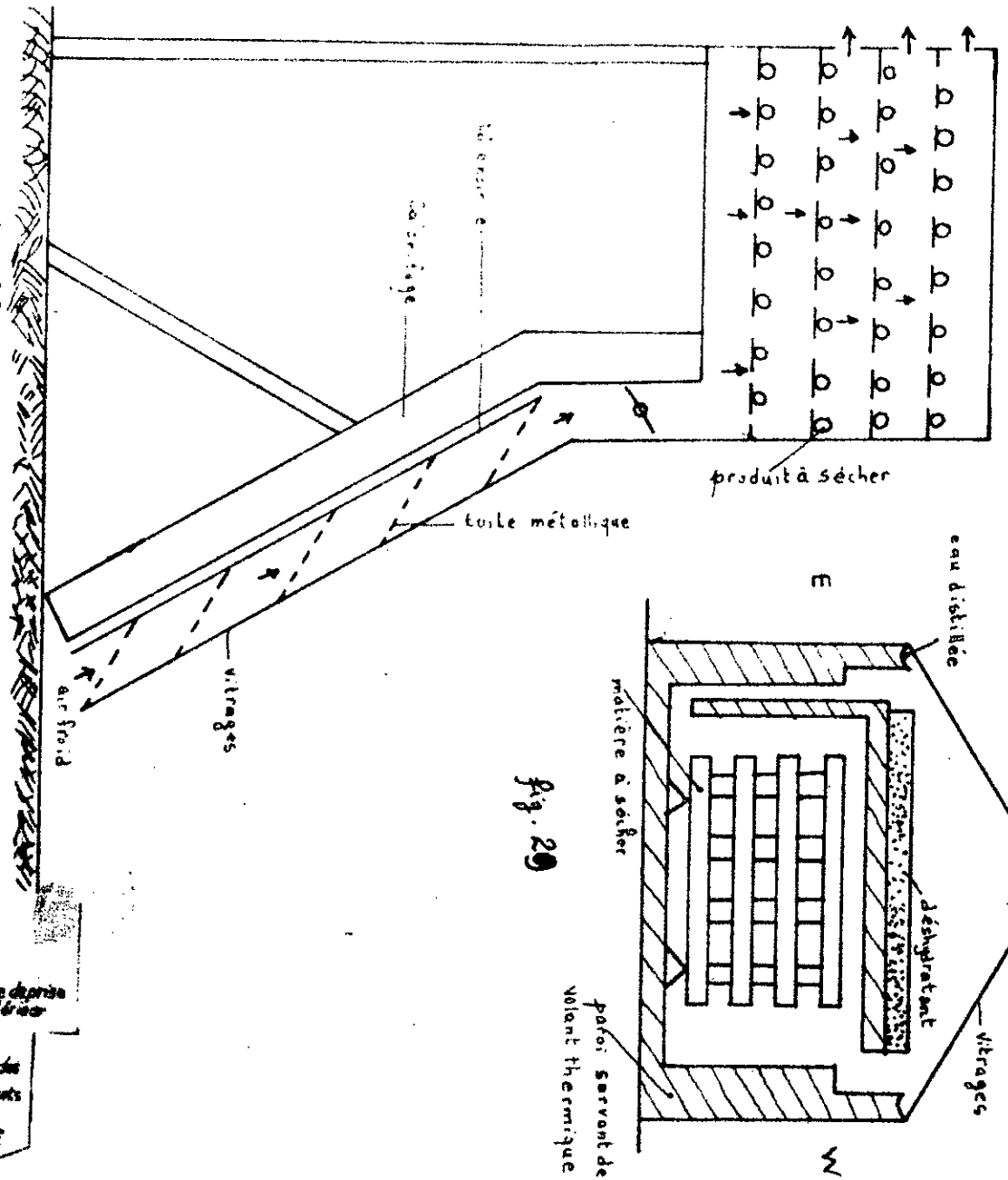
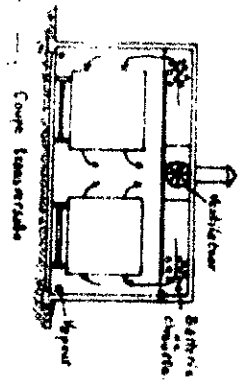
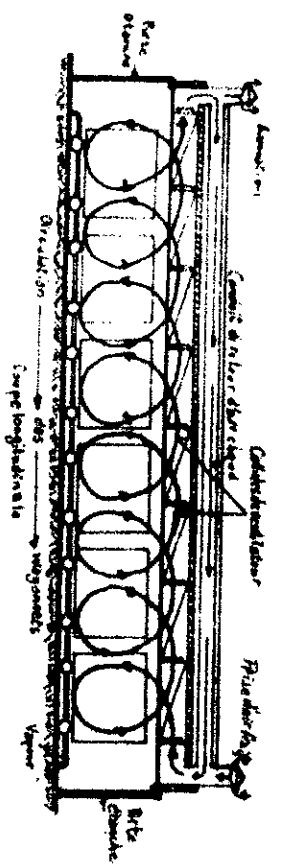


Fig. 29



Séchoir-tunnel à ventilateur multiples.

Fig. 30

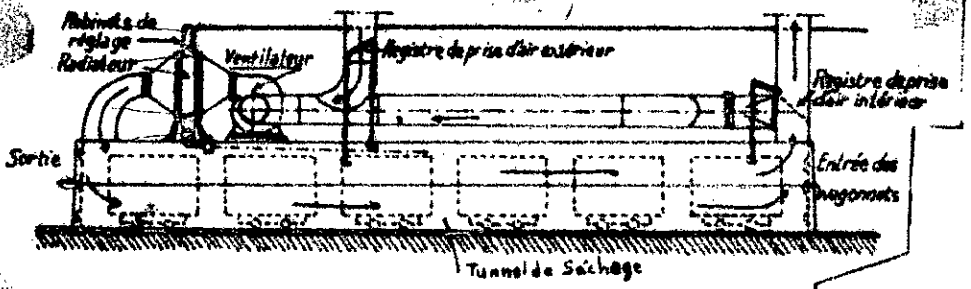


Fig. 31. Séchoir-tunnel à ventilateur simple.

# Chapitre IV: CALCUL RELATIF AU SECHAGE

## IV.0: Données principales:

### IV.0.1: Paramètres de l'abricot:

On prendra:

l'humidité initiale: 87% [en parties de masse]

l'humidité à atteindre: 15% [ " " " " ]

le débit de produit à sécher (introduit): 100 kg/h

donc la puissance évaporatoire est  $\approx 85$  kg d'eau/h

C'est ce dernier paramètre qui nous importe et qui caractérisera le séchoir que nous allons dimensionner.

Il est à remarquer (voir réf. n° 04 et 05) que pratiquement, pour tous les fruits et légumes on peut prendre d'une manière grossière les mêmes caractéristiques que celles de l'abricot (humidité initiale, débit de matière à sécher, humidité finale, température maximale).

On voit à partir des tableaux donnés par réf. n° 04 et 05\* que l'humidité dépend non seulement du type de fruit ou légumes mais aussi de la variété. Elle dépend aussi du moment de la cueillette. C'est d'ailleurs pour cela qu'il est important d'avoir dans l'installation un laboratoire d'analyse.

Dans nos calculs nous ne tiendrons pas compte de améliorations que peut avoir le séchage si on procéderait à des opérations préliminaires sur le produit (voir annexe 3).

### IV.0.2: Conditions de séchage:

Le séchage se fera en équi-courant.

la température de l'air à l'entrée du séchoir est de 70°C

la température de l'air à la sortie du séchoir est de 35°C

la température de l'air ambiant est de 12°C

le degré hygrométrique de l'air ambiant est de 50% } (voir II.0)

## IV.1: Formules générales pour la détermination du bilan matière et du bilan thermique:

$$G_p = G_{p.a.s} + x G_{p.v.e}$$

$$C_{ph} = C_{m.s} + X \cdot C_e$$

$$i_{a.s} = G_{p.a.s} \theta$$

$$i_{v.e} = (G_{p.v.e} \theta + r)$$

$$\begin{aligned} i &= i_{a.s} + x i_{v.e} = G_{p.a.s} \theta + x (G_{p.v.e} \theta + r) \\ &= (G_{p.a.s} + x G_{p.v.e}) \theta + x \cdot r \\ &= C_p \cdot \theta + x \cdot r \end{aligned}$$

$$I_{m.s} = C_{m.s} \cdot \theta_{ph}$$

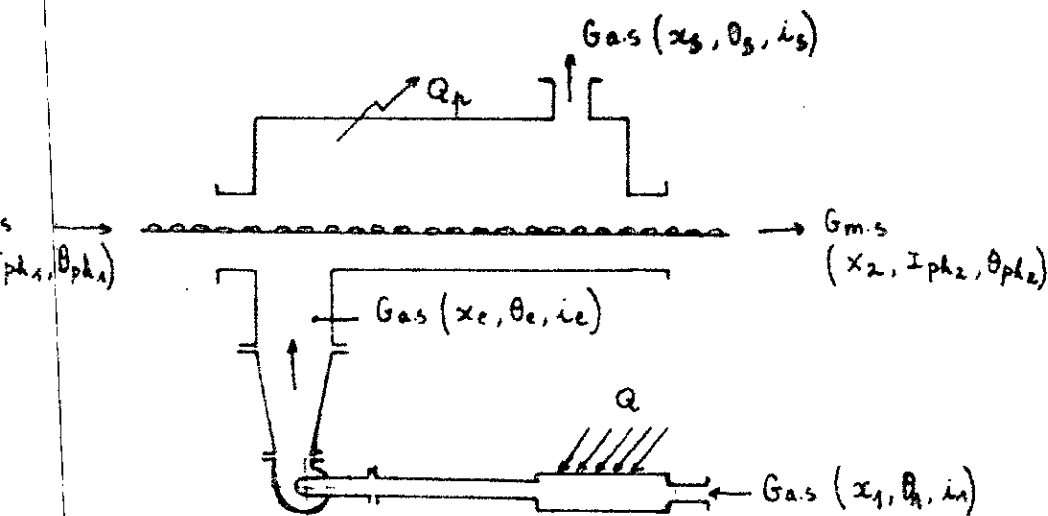
$$i_e = C_e \cdot \theta_{ph}$$

$$\begin{aligned} I_{ph} &= I_{m.s} + X i_e = C_{m.s} \cdot \theta_{ph} + X C_e \theta_{ph} = (C_{m.s} + X C_e) \cdot \theta_{ph} \\ &= C_{ph} \cdot \theta_{ph} \end{aligned}$$

\* Nous ne pouvons pas les donner en annexe au leur volume. Il est préférable si nécessaire de consulter les références.



Schema de calcul:



bilan thermique:

$$Q + G_{a.s} i_1 + G_{m.s} I_{ph1} = G_{a.s} i_g + G_{m.s} I_{ph2} + Q_p$$

$$Q = G_{a.s} (i_g - i_1) + G_{m.s} (I_{ph2} - I_{ph1}) + Q_p \quad (a)$$

étant donné que:

$$I_{ph} = \underbrace{c_{m.s} \cdot \theta_{ph}}_{\text{enthalpie du produit}} + \underbrace{X \cdot c_e \cdot \theta_{ph}}_{\text{celle de l'humidité}} + \underbrace{X \cdot c_e \cdot \theta_{ph}}_{\text{celle de la matière sèche.}}$$

On transforme le second membre par addition et soustraction d'une même valeur comme suit:

$$G_{m.s} (I_{ph2} - I_{ph1}) = G_{m.s} \left[ (c_{m.s} \theta_{ph2} - X_2 c_e \theta_{ph2}) - (c_{m.s} \theta_{ph1} - X_1 c_e \theta_{ph1}) \right]$$

$$= \left\{ G_{m.s} \left[ c_{m.s} \theta_{ph2} - X_2 c_e \theta_{ph2} \right] - \left[ c_{m.s} \theta_{ph1} - X_1 c_e \theta_{ph1} \right] \right. \\ \left. - (c_{m.s} \theta_{ph1} + X_2 c_e \theta_{ph1}) + (c_{m.s} \theta_{ph1} + X_2 c_e \theta_{ph1}) \right\}$$

valeur égale

$$= G_{m.s} \left[ (c_{m.s} + X_2 c_e) \theta_{ph2} - (c_{m.s} + X_2 c_e) \theta_{ph1} - i_{e1} (X_1 - X_2) \right]$$

$$= G_{m.s} \left[ c_{ph2} (\theta_{ph2} - \theta_{ph1}) - i_{e1} (X_1 - X_2) \right]$$

On introduit ce résultat dans (a)

$$Q = G_{a.s} (i_g - i_1) + G_{m.s} \left[ c_{ph2} (\theta_{ph2} - \theta_{ph1}) - i_{e1} (X_1 - X_2) \right] + Q_p$$

D'autre part d'après le bilan matière:

$$G_{a.s} (x_g - x_1) = G_{m.s} (x_1 - x_2)$$

Par conséquent:

$$Q = G_{a.s} [(i_s - i_a) - i_{e1} (x_s - x_1)] + G_{m.s} \cdot C_{ph2} (\theta_{ph2} - \theta_{ph1}) + Q_p$$

L'expression  $G_{m.s} (x_1 - x_2) \cdot i_{e1} = G_{a.s} (x_2 - x_1) i_{e1}$  représente l'enthalpie du liquide à la température  $\theta_{ph1}$  et ce liquide passe du produit à sécher dans l'air sans recevoir aucune quantité de chaleur extérieure (le séchage est dit adiabatique).

Les formules établies ci-dessus sont applicables quelque soit le type de séchoir (voir chap III).

#### IV. 2: Bilan matière:

L'air ambiant est pris à  $\theta_1 = 12^\circ\text{C}$  et  $x_1 = 0,004 \text{ kg/kg d'air sec}$  (donc  $\varphi_1 = 50\%$ ). Il est chauffé jusqu'à  $\theta_e = 70^\circ\text{C}$  ( $x_e = 0,004 \text{ kg/kg a.s.}$ ) et entre à cette température dans le séchoir. Il en ressort à  $\theta_s = 35^\circ\text{C}$ . Le séchage se fait en équi-courant et d'une manière isenthalpique (caractéristique des séchoirs-tunnels à chauffage préalable de l'air).

Le débit de matière à sécher est de  $100 \text{ kg/h}$ . Etant donné que le produit à l'entrée contient  $13\%$  de matière sèche et  $87\%$  d'eau (en parties de masse), le débit massique de matière sèche est:

$$G_{m.s} = 13 \text{ kg/h}$$

L'humidité initiale rapportée à la matière sèche est

$$X_1 = \frac{0,87}{1 - 0,87} \approx 6,69 \text{ kg d'eau/kg de m.s}$$

L'humidité finale rapportée à la matière sèche est

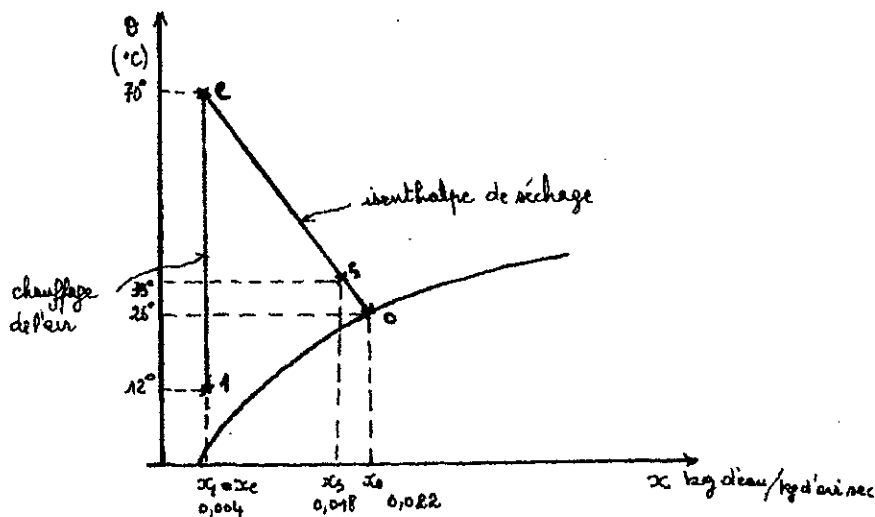
$$X_2 = \frac{0,15}{1 - 0,15} \approx 0,176 \text{ kg d'eau/kg de m.s}$$

A partir du diagramme enthalpique de l'air humide nous avons:

$$x_s = 0,018 \text{ kg d'eau/kg d'air sec}$$

$$x_0 = 0,022 \text{ kg d'eau/kg d'air sec}$$

(humidité absolue à la température limite de refroidissement  $\theta_0 = 26^\circ\text{C}$ )



#### IV. 2.1 : Bilan matière produit :

- débit de produit introduit :  $G_{ph} = 100 \text{ kg/h}$
- débit de matière sèche :  $G_{m.s} = 13 \text{ kg/h}$
- débit d'eau évaporée :  $W = G_{m.s}(X_1 - X_2) = 13(6,69 - 0,176) = 84,68 \text{ kg/h}$
- débit du produit séché :  $G_{ph} - W = 100 - 84,68 = 15,32 \text{ kg/h}$
- rendement massique du séchage :  $15,32 \%$

#### IV. 2.2 : Bilan matière de l'air :

Nous avons la relation  $G_{a.s}(x_3 - x_1) = G_{m.s}(X_1 - X_2)$

d'où :

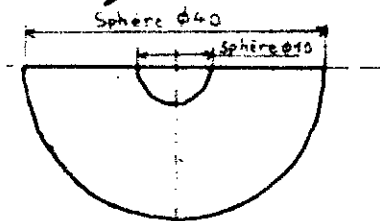
$$G_{a.s} = \frac{G_{m.s}(X_1 - X_2)}{(x_3 - x_1)} \approx 6049 \text{ kg/h}$$

Donc le capteur doit chauffer  $6049 \text{ kg/h}$  d'air sec qui seront débités dans le séchoir par le ventilateur.

#### IV. 3 : Détermination du temps de séchage :

##### IV. 3.0 : Caractéristiques géométriques de l'abricot :

Nous supposons que l'abricot dénoyauté, a la forme d'une sphère creuse de diamètres  $10 \text{ mm}$  et  $40 \text{ mm}$ , qu'on coupe en deux pour procéder au séchage.



- Volume de ce demi-fruit :

$$V = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{6} (R^3 - r^3) = \frac{\pi}{12} [(20 \cdot 10^{-3})^3 - (5 \cdot 10^{-3})^3] \approx 2062 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$$

- diamètre de la sphère équivalente (sphère ayant le même volume)

$$d_k = 2 \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} = 2 \sqrt[3]{\frac{6 \times 2062}{\pi}} \cdot 10^{-3}$$

$$d_k \approx 31,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

- Surface présentée par le demi-fruit :

$$S = \frac{\pi}{2} [D^2 - d^2] + \pi [R^2 - r^2] = \left\{ \frac{\pi}{2} [(40)^2 - (10)^2] + \pi [(20)^2 - (5)^2] \right\} \cdot 10^{-6}$$

$$S \approx 3534 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

- Surface d'échange par kg de matière sèche :  $A_s$

Nous estimons la masse d'un demi-fruit à  $18 \text{ g}$ , et sachant que la matière sèche représente  $13\%$  en parties de masse, donc un demi-fruit contient  $0,13 \times 18 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$  de m.s.

En négligeant la diminution du volume au cours du séchage nous aurons

$$A_s = \frac{\text{Surface du produit}}{\text{masse de matière sèche}} = \frac{3534 \cdot 10^{-6}}{0,13 \times 18 \cdot 10^{-3}} \approx 1,51 \text{ m}^2 / \text{kg de m.s}$$

#### IV. 3.1 : Dimensions des plateaux et des charriots: (voir dessin)

Les plateaux et les charriots sont spécialement construits pour l'installation.

Le charriot est de dimensions extérieures  $0,6 \times 0,6$  [m<sup>2</sup>], ce qui nous permet de placer une couche de demi-fruit (l'emplacement du noyau vers le haut). Cette couche comprend approximativement 225 demi-fruit ce qui correspond à 450 unités. Pour avoir exactement 1000 kg/h il nous faut 25 plateaux par charriot. Les plateaux sont distants de 0,1 m.

Plateau :  $0,6 \times 0,6 \times 0,06$  [m x m x m]  
 Charriot : largeur = 0,6 m  
 longueur  $\approx 0,8$  m (y compris les poignées)  
 hauteur  $\approx 1,7$  m (y compris 0,2 m réservée aux galets)

La section du séchoir sera approximativement

$$F = 0,6 \times 1,7 = 1,02 \text{ m}^2$$

#### IV. 3.2 : Courbe de séchage et durée de séchage:

• Détermination du coefficient local d'échange de chaleur par convection:  
 Nous utilisons la formule établie par CHILTON et COLBURN citée par la référence n°1.

$$\alpha = 1,064 \frac{Re^{-0,41}}{Pr^{2/3}} \cdot u \cdot \rho_{\text{air}} \cdot c_{p,\text{air}}$$

avec  $u$  = vitesse de l'air dans le séchoir supposé vide:

$$\text{donc } u = \frac{6000}{3600 \cdot F} \approx \frac{6000}{3600 \cdot 1,02} \approx 1,63 \text{ m/s}$$

à une température moyenne  $\frac{70+26}{2} = 48 \approx 50^\circ\text{C}$  nous avons:

$$\rho_{\text{air}} \approx 1,11 \text{ kg/m}^3 ; c_{p,\text{air}} \approx 0,24 \text{ kcal/kg. degré} ; Pr \approx 0,698 ; \nu = 17,95 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\text{d'où } \alpha = 1,064 \times \frac{(u \cdot dk)^{-0,41}}{Pr^{2/3}} \cdot u \cdot \rho_{\text{air}} \cdot c_{p,\text{air}}$$

$$\alpha \approx 1,064 \times \frac{1}{(0,698)^{2/3}} \times \left( \frac{1,63 \times 21,58 \cdot 10^{-3}}{17,95 \cdot 10^{-6}} \right)^{-0,41} \times 1,63 \times 1,11 \times 0,24$$

$$\alpha \approx 81 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h. degré}$$

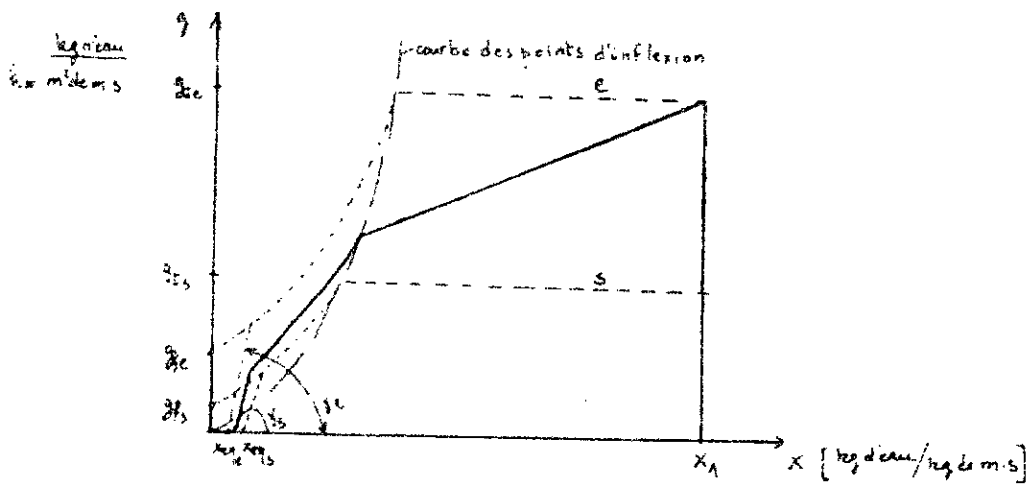
• Détermination de la courbe de séchage

$\theta_e = 70^\circ\text{C}$ , température de l'air à l'entrée du séchoir

$\theta_s = 35^\circ\text{C}$ , température de l'air à la sortie du séchoir

$\theta_0 = 26^\circ\text{C}$ , température limite de refroidissement

La courbe de séchage en équi-courant a l'allure suivante:



.. Calcul des différentes étapes de la courbe de séchage e :

1<sup>ère</sup> étape :

$$g_{1e} = \frac{\alpha}{r} (\theta_e - \theta_0) = \frac{81}{582,5} (70 - 26) \approx 6,12 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$$

2<sup>ème</sup> étape :

calcul de la vitesse de séchage  $g_{2e}$  (en considérant la substance non hygroscopique jusqu'à la fin du séchage).

$$g_{2e} = \frac{\lambda}{r \cdot \delta} (\theta_{pe} - \theta_0)$$

avec  $\lambda = 0,43 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$ , conductivité thermique de la matière sèche de l'abricot.

$\delta$  : demi-épaisseur du demi-fruit.  $\delta = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$\theta_{pe} \approx \frac{\theta_e + \frac{\lambda}{\alpha \delta} \theta_0}{1 + \frac{\lambda}{\alpha \delta}}, \text{ température du produit à la fin du séchage}$$

$$\theta_{pe} \approx \frac{70 + \frac{0,43}{81 \times 7,5 \cdot 10^{-3}} \times 26}{1 + \frac{0,43}{81 \times 7,5 \cdot 10^{-3}}} = 52^\circ \text{C}$$

$$\Rightarrow g_{2e} = \frac{0,43}{582,5 \times 7,5 \cdot 10^{-3}} (52 - 26) = 2,56 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$$

3<sup>ème</sup> étape :

Dans la dernière partie de la 2<sup>ème</sup> étape de séchage la courbe de séchage a une allure linéaire à cause de l'hygroscopicité de la substance.

$$g = D_e \cdot \left(\frac{\pi}{\delta}\right)^2 (x - x_{eqe})$$

avec  $D_e = 6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{h}}$ , coefficient de diffusion de l'humidité dans le produit à  $\theta_e = 70^\circ \text{C}$

$x_{eqe}$  est donné par les courbes de sorption,  $x_{eqe} \approx 0,03$

la pente de cette courbe linéaire est  $6 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\pi}{7,5 \cdot 10^{-3}}\right)^2$  donc  $\theta_e \approx 47^\circ$

.. calcul des différentes étapes de la courbe de séchage :

En procédant de la même manière que précédemment, remplaçant  $D_c$  par  $D_s$  et avec  $D_s \approx 4,78 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{h}$  on obtient les valeurs suivantes.

$$g_{1s} \approx 1,25 \text{ kg/m}^2 \cdot h$$

$$g_{2s} \approx 0,49 \text{ kg/m}^2 \cdot h \quad ; \quad \theta_{2s} \approx 31^\circ C$$

$$\gamma_s \approx 40^\circ$$

$$x_{eq_s} \approx 0,11 \text{ kg/kg}$$

Toutes ces valeurs sont utilisées pour tracer la courbe de séchage (voir pages suivantes). Cette courbe a été tracée en 2 parties pour plus de précision (les échelles sont différents).

.. La durée de séchage :

Par planimétrie nous obtenons le temps de séchage (ou temps de séjour dans le tunnel de séchage).

$$\tau_1 = (\text{Aire 1}) \times 0,01 \times 0,5 \times 5m \cdot s \cdot \delta^2$$

$$\tau_1 = 35,1 \times 0,01 \times 0,5 \times 1050 \cdot 10^3 \times (7,5 \cdot 10^{-3})^2$$

$$\tau_1 = 10,37 \text{ h}$$

$$\tau_2 = (\text{Aire 2}) \times 0,01 \times 0,05 \times 5m \cdot s \cdot \delta^2$$

$$\tau_2 \approx 100 \times 0,01 \times 0,05 \times 1050 \cdot 10^3 \times (7,5 \cdot 10^{-3})^2$$

$$\tau_2 \approx 2,95 \text{ h}$$

$$\text{Le temps de séjour est: } \tau = \tau_1 + \tau_2 = 13,32 \text{ h}$$

Nous prendrons  $\tau = 14 \text{ h}$ , tenant compte de la période de mise en température (inertie du séchoir)

.. Nombre de charriots et longueur du séchoir

À raison de 0,8m de longueur de charriot nous aurons longueur du tunnel:  $0,8 \times 14 = 11,2 \text{ m}$

Nous prendrons une valeur de 12m.

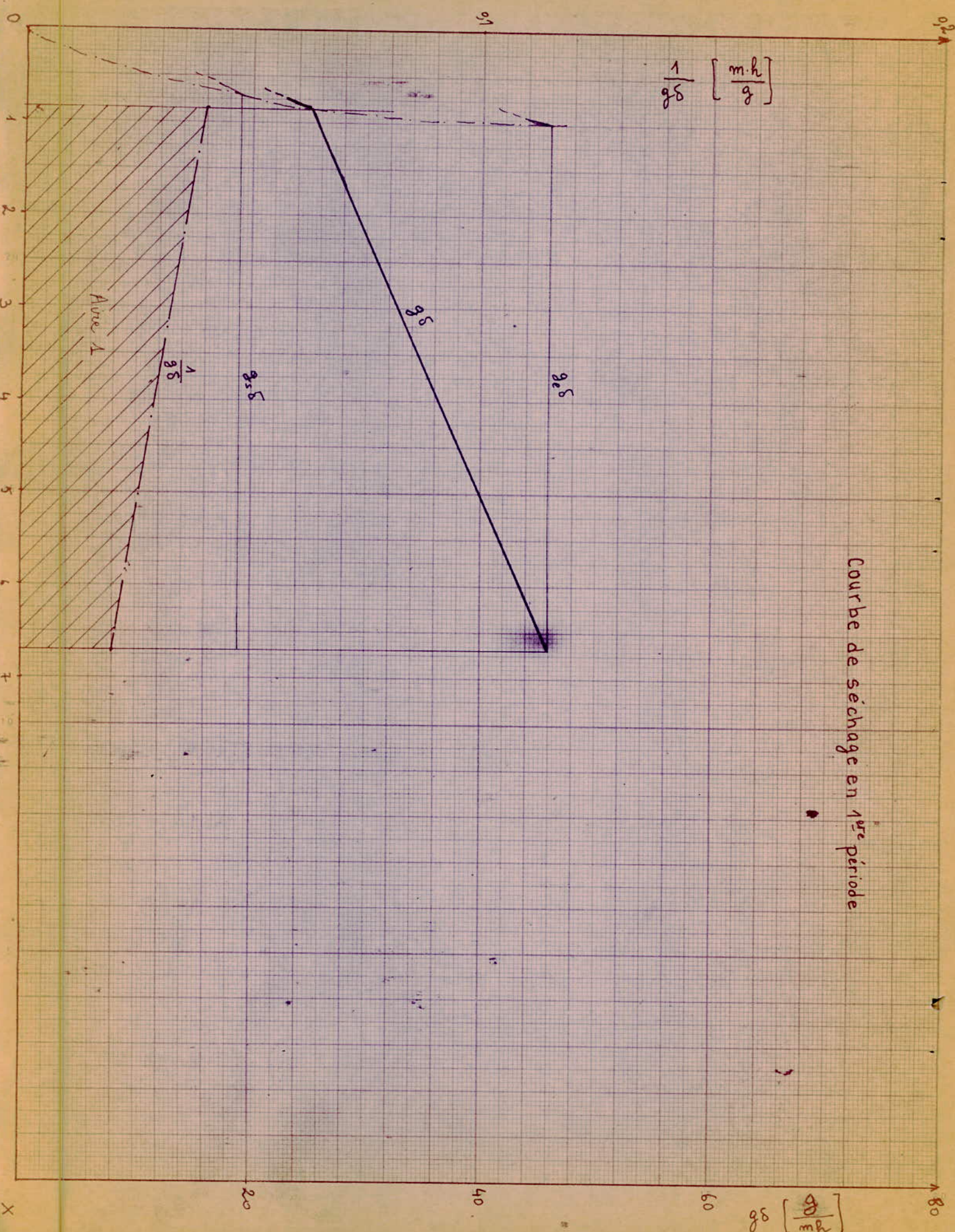
Le nombre de charriots à l'intérieur du séchoir est de 14, contenant chacun 100 kg de produit.

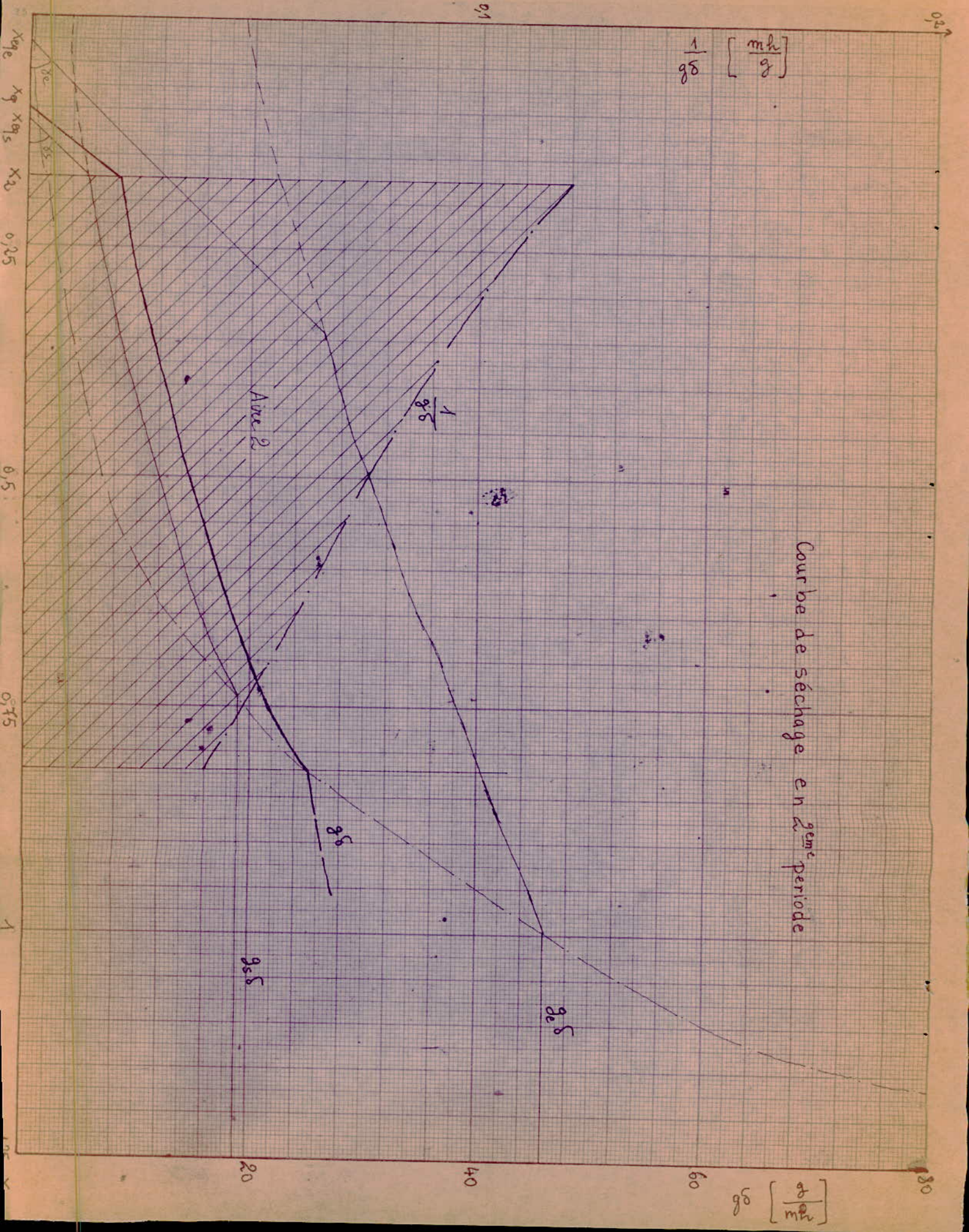
#### IV. 4: Bilan thermique:

La formule donnant le bilan thermique est:

$$Q = \underbrace{G_{as} [(i_s - i_1) - i_{e1} (x_s - x_1)] + G_{m.s} \cdot C_{ph2} (\theta_{ph2} - \theta_{ph1}) + Q_p}_{QI}$$

Courbe de séchage en 1<sup>re</sup> période





Courbe de séchage en 2<sup>ème</sup> période

$$\frac{1}{g\delta} \left[ \frac{mh}{g} \right]$$

$$g\delta \left[ \frac{g}{mh} \right]$$

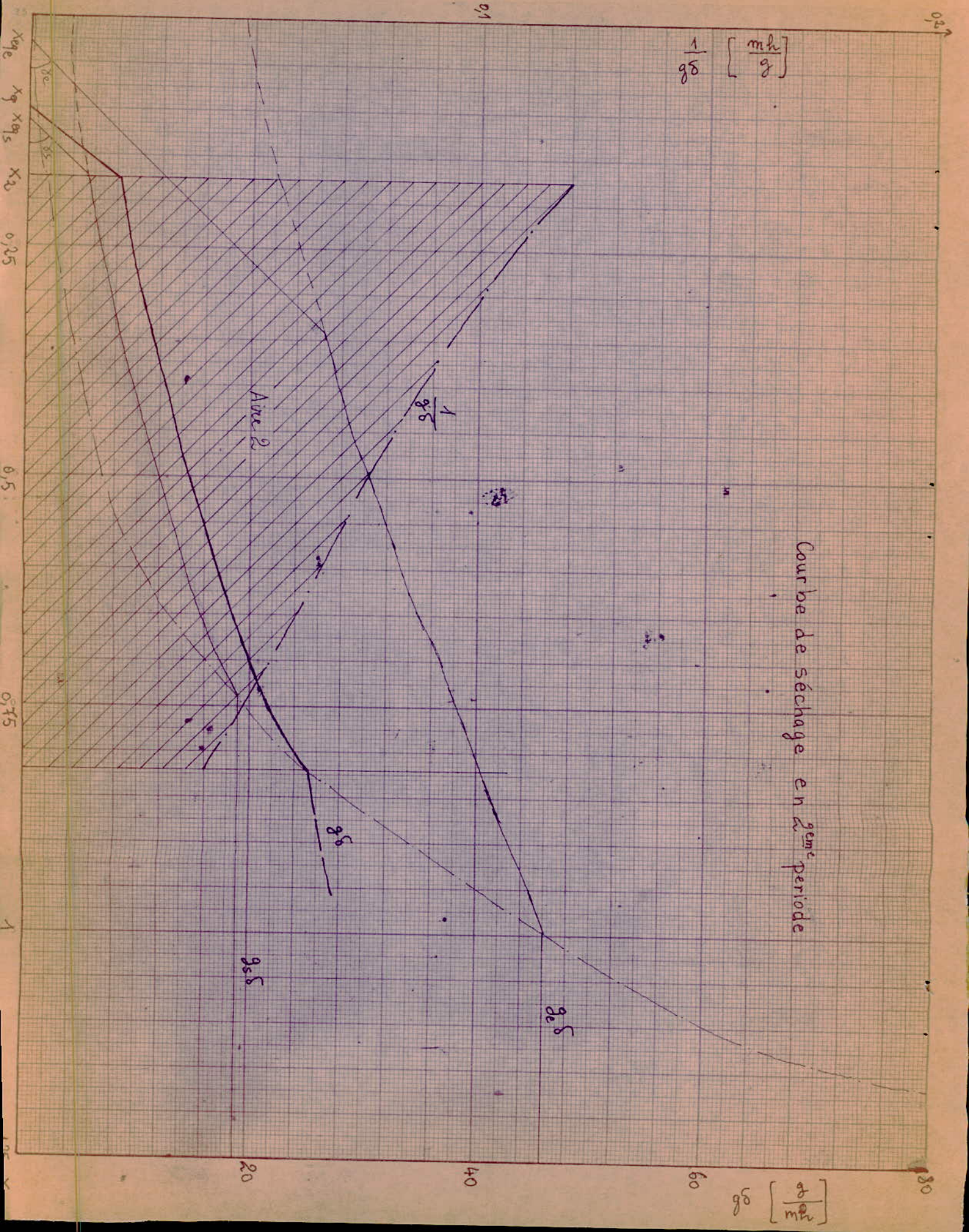
Aire 2

$\frac{1}{g\delta}$

$g\delta$

$g\delta$

$g\delta$





$$C_{ph2} = (c_{ms} + X_2 c_e) \quad ; \quad c_{ms} = 0,85 \text{ kcal/kg. degré} ; c_e = 1 \text{ kcal/kg. degré}$$

$$C_{ph2} = 0,85 + 0,176 = 1,026 \text{ kcal/kg degré}$$

$$\theta_{ph2} \approx 32^\circ\text{C} = \theta_{3e}$$

$$\theta_{ph1} \approx 20^\circ\text{C}$$

$$i_{e1} = c_e \cdot \theta_{ph1} \approx 20 \text{ kcal/kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} i_s = 19,5 \text{ kcal/kg d'air sec} \\ i_1 = 5,5 \text{ kcal/kg d'air sec} \end{array} \right\} \text{ déterminés à l'aide du diagramme enthalpique de l'air humide.}$$

$$\text{d'où } Q_I \approx 6049 \left[ (19,5 - 5,5) - 20(0,018 - 0,004) \right] + 13 \times 1,026 (32 - 20)$$

$$Q_I \approx 83152 \text{ kcal/h}$$

$Q_2$  = quantité de chaleur nécessaire au séchage + pertes par le réchauffage du fruit + quantité de chaleur partant avec l'air usé.

$Q_p$  = pertes thermiques par convection-conduction à travers les parois et par le réchauffage des matériaux mobiles (charriots).

.. Calcul des pertes par convection-conduction à travers les parois:

La construction est en maçonnerie.

... paroi "en communication avec l'extérieur":

$$S \approx 12 \times 1,8 \text{ m}^2$$

L'air à l'intérieur du séchoir est à la température moyenne  $\frac{70+35}{2} \approx 50^\circ\text{C}$ . Il longe la paroi à 4 m/s d'où  $Re$

$$Re = \frac{u \cdot l}{\nu} = \frac{4 \cdot 12}{17,95 \cdot 10^{-6}} \approx 4 \cdot 10^4 \text{ (turbulent)}$$

donc en vertu de la formule de Polhausen simplifiée dans le cas de l'air:

$$\alpha_{int} = 0,032 \cdot Re^{0,8} \cdot \frac{\lambda_f}{l} \quad (b)$$

$$\lambda_f = 0,0244 \text{ kcal/m.h.degré}$$

$$\text{à } 50^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{int} = 0,032 \cdot \left( \frac{4 \cdot 12}{17,95 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot \frac{0,0244}{12}$$

$$\Rightarrow \alpha_{int} \approx 9 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h. degré} \quad (\text{à l'intérieur du séchoir})$$

L'air extérieur est supposé à  $12^\circ\text{C}$  et ayant une vitesse de 5 m/s dans le sens de la longueur du canal de séchage.

Ce qui nous donne avec la même formule (b) car  $Re > 4 \cdot 10^4$

$$\alpha_{ext} \approx 13 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h. degré}$$

$$\lambda_{12^\circ\text{C}} = 0,0244 \text{ kcal/m.h.degré} ; \nu_{12^\circ\text{C}} = 14,16 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

La construction étant en maçonnerie, les normes allemandes (DIN 4701)

donnent pour les murs extérieurs de 250 mm, en briques creuses de construction, enduits des deux côtés une valeur de la résistance calorifique  $k_p = 1,19 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$

Si on obtient la résistance calorifique globale  $K_1$ :

$$\frac{1}{K_{p_1}} = \frac{1}{\alpha_{\text{int}}} + \frac{1}{k_p} + \frac{1}{\alpha_{\text{ext}}}$$

$$\frac{1}{K_{p_1}} = \frac{1}{9} + \frac{1}{1,19} + \frac{1}{13} \Rightarrow K_{p_1} = 0,97 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$$

$$\text{d'où } Q_{p_1} = S \times K_{p_1} \times \Delta\theta = 12 \times 1,8 \times 0,97 \times (50 - 12)$$

$$Q_{p_1} = 796 \text{ kcal/h}$$

... paroi en communication avec l'intérieur de l'installation:

L'air dans l'installation est supposé à  $20^\circ\text{C}$ . Le mur est de même type que la paroi en communication avec l'extérieur.

$$\frac{1}{K_{p_2}} = \frac{1}{\alpha_{\text{int}}} + \frac{1}{k_p}$$

$$= \frac{1}{9} + \frac{1}{1,19} \Rightarrow K_{p_2} = 1,05 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$$

$$\text{d'où } Q_{p_2} = S \times K_{p_2} \times \Delta\theta = 12 \times 1,8 \times 1,05 \times (50 - 20)$$

$$Q_{p_2} = 680 \text{ kcal/h}$$

... toit du canal de séchage:

La même norme (DIN 4701) donne pour un toit à une dalle en béton armé à chape de ciment (couche de finition), chape flottante B225, sans isolation, un coefficient de résistance calorifique  $1/k_t = 0,48 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{degré/kcal}$

$$\text{d'où } \frac{1}{K_t} = \frac{1}{\alpha_{\text{int}}} + \frac{1}{k_t}$$

$$= \frac{1}{9} + 0,48 \Rightarrow K_t = 1,69 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$$

$$\text{d'où } Q_{p_t} = S_t \cdot K_t \cdot \Delta\theta = 12 \times 0,7 \times 1,69 \times (50 - 20)$$

$$Q_{p_t} = 426 \text{ kcal/h}$$

... Sol du canal de séchage:

Pour le sol on adopte la même valeur de la résistance calorifique que celle du toit du canal de séchage (DIN 4701). On adopte une température du sol de  $3^\circ\text{C}$ .

$$\text{d'où } K_s = K_t$$

$$\text{et } Q_{p_s} = S_s \cdot K_s \cdot \Delta\theta = 12 \times 0,7 \times 1,69 \times (50 - 3)$$

$$Q_{p_s} = 667 \text{ kcal/h}$$

... porte d'entrée des charriots:

La porte est en acier; d'après la norme DIN 4701, la résistance calorifique est  $k_p = 5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$ . La température de l'air

ce niveau (entrée) est de  $70^{\circ}\text{C}$ . La surface de la porte est de  $0,7 \times 1,8$  (m x m) environ.

$$\frac{1}{K_p} = \frac{1}{a_{\text{int}}} + \frac{1}{k_p}$$

$$= \frac{1}{9} + \frac{1}{5} \Rightarrow K_p \approx 3,21 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$$

d'où  $Q_{p_{P_2}} = K_p \cdot S_p \cdot \Delta\theta = 3,21 \times 0,7 \times 1,8 (70-20)$

$$Q_{p_{P_2}} \approx 202 \text{ kcal/h}$$

... porte de sortie des charriots:

Nous avons les mêmes données que pour la porte d'entrée des charriots sauf la température qui est à ce niveau de  $35^{\circ}\text{C}$

$$Q_{p_{P_3}} = K_p \cdot S_p \cdot \Delta\theta = 3,21 \times 0,7 \times 1,8 (35-20)$$

$$Q_{p_{P_3}} \approx 61 \text{ kcal/h}$$

Ce qui donne pour l'ensemble des pertes par conduction-convection à travers les parois:

$$Q_{p_{\text{paroi}}} = Q_{p_1} + Q_{p_2} + Q_{p_3} + Q_{p_4} + Q_{p_{P_2}} + Q_{p_{P_3}}$$

$$Q_{p_{\text{paroi}}} = 2832 \text{ kcal/h}$$

.. Calcul des pertes par le réchauffage des charriots:

Ce calcul n'est qu'approximatif. Supposons que la masse du charriot est de  $75 \text{ kg}$  et que sa chaleur spécifique moyenne est de  $0,2 \text{ kcal/kg} \cdot \text{degré}$ . Supposons aussi qu'il entre dans le canal de séchage à  $20^{\circ}\text{C}$  et en ressort à  $35^{\circ}\text{C}$ . Ce qui donnerait:

$$Q_{p_{\text{charriot}}} = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 75 \times 0,2 \times (35-20)$$

$$Q_{p_{\text{charriot}}} = 225 \text{ kcal/h} \quad (\text{car il entre un charriot/h})$$

L'ensemble des pertes:  $Q_p = Q_{p_{\text{paroi}}} + Q_{p_{\text{charriot}}}$

$$Q_p = 2832 + 225$$

$$Q_p = 3057 \text{ kcal/h}$$

Bilan thermique global de séchage sera:

$$Q = Q_I + Q_p = 83152 + 3057$$

$Q = 86209 \text{ kcal/h}$ . Or beaucoup de suppositions ont été faites; pour pallier à tout problème (défaut de puissance calorifique) et étant que nous envisageons un capteur à surface variable, nous prenons

donné  $Q = 90000 \text{ kcal/h}$

Rendement du séchoir :

Pour porter 1 kg d'eau à 20°C jusqu'à l'état de vapeur à 35°C, il faut lui fournir une quantité de chaleur telle que :

$$E = r_{20^\circ} + C_{p,v} (35 - 20) + E_{\text{liaison}}$$

$$= 585 + 0,46 (35 - 20) + 20$$

$$E \approx 612 \text{ kcal/kg d'eau}$$

Pour 85 kg d'eau à évaporer par heure, il faut  $85 \times 612 = 52020 \text{ kcal/h}$   
 $E_{\text{liaison}}$  = énergie ou enthalpie de liaison (voir paragraphe I.2.2)

d'où le rendement du séchoir

$$\eta_{\text{séchoir}} = \frac{52020}{90000} \approx 0,578$$

$$\eta_{\text{séchoir}} \approx 58\%$$

Or les séchoirs ont un rendement de 50÷60 %, en général, d'après la documentation à notre disposition. Donc on peut dire que le rendement trouvé est acceptable.

L'isolation du séchoir ne ferait qu'augmenter son coût; les pertes par les parois représentent environ 3% de l'énergie nécessaire au séchage et l'isolation n'est nécessaire que si ces pertes dépassent 10%.

Il est possible d'augmenter le rendement de quelques centièmes par les moyens suivants :

- 1° L'isolation du séchoir si cela n'affecte pas l'économie.
- 2° Le recyclage d'une partie de l'air usé, car ce dernier sort du séchoir à une température relativement élevée par rapport à celle de l'air ambiant.
- 3° En exposant les fruits au soleil, avant de les introduire dans le séchoir.

# Chapitre V CALCULS RELATIFS AU CAPTEUR SOLAIRE

## V.0. Généralités et choix :

Les systèmes de captage de l'énergie solaire diffèrent selon le mode d'utilisation de celle-ci.

Pour le séchage, où l'énergie solaire est utilisée à une température relativement basse ( $60 \div 90^\circ\text{C}$ ) le dispositif le plus convenable est le capteur plan.

Ce dernier est constitué :

- d'un ou de plusieurs vitres (ordinaires ou sélectives)
- d'un absorbeur (tôle) ordinaire ou sélectif.
- d'un calorifuge.

Les capteurs plans sont donc basés sur deux principes :

- utilisation de la qualité d'absorption des métaux,
- utilisation de l'effet de serre provoqué par un vitrage.

En étudiant la figure 16 page 15, nous remarquons que le maximum d'énergie reçue par une plaque se situe dans la gamme des longueurs d'ondes inférieures à  $3\mu\text{m}$ . Donc il s'agit de trouver une plaque absorbante qui puisse recevoir cette énergie. Les métaux, comme l'indique la figure 32, y sont convenables. Mais ces derniers ont l'inconvénient de réémettre de l'énergie par réflexion, et par rayonnement propre une fois chauffés. Ce rayonnement se situe dans la gamme des longueurs d'ondes supérieures à  $8\mu\text{m}$ . Pour pallier à ce défaut un vitrage est nécessaire ; le rôle du vitrage est de créer un effet de serre, donc il doit permettre aux longueurs d'ondes inférieures à  $3\mu\text{m}$  de pénétrer et, doit être imperméable au rayonnement infra-rouge ( $8\mu\text{m}$ ). La figure 33 montre que le verre y est convenable.

Mais ceci reste insuffisant. Pour augmenter l'efficacité du capteur solaire on utilise des surfaces sélectives.

+ plaque absorbante sélective :

- tôle de métal noircie à la peinture, ou au noir de fumée, ou au chrome noir. Cette couche de recouvrement augmente l'absorption des "ondes solaires" mais n'a aucune influence sur le rayonnement propre de la plaque chauffée.
- tôle de métal recouverte d'une ou de plusieurs couches de diélectriques ou de semi-conducteurs.
- tôle de métal pliée de manière à piéger les ondes électromagnétiques par réflexions multiples (voir fig 34).
- tôle de métal sur lequel repose une structure cellulaire en nid d'abeilles.
- etc...

En général on réserve le mot sélectif pour les absorbeurs autre que la tôle plane noircie. Les tôles planes noircies sont considérées comme ordinaire (standard).

+ Vitrage sélectif :

Pour augmenter l'effet de serre on utilise parfois plusieurs vitrages. Mais ceci a l'inconvénient de diminuer

aussi la perméabilité aux rayonnements de longueurs d'ondes inférieures à  $3\mu\text{m}$ . C'est pour cela qu'on utilise plusieurs vitres que dans le cas où la nécessité s'impose, c'est à dire lorsque l'absorbeur est porté à une température très élevée.

On utilise aussi dans certains cas une vitre dont la face intérieure est recouverte d'une couche réfléchissante.

Les surfaces sélectives (absorbeur ou vitre) augmente le prix du capteur.

Choix du type de capteur:

Dans notre cas, pour simplifier dans une première approche, nous utiliserons un capteur simple c'est à dire avec:

- un vitrage simple (standard: verre à vitre),
- un absorbeur simple (tôle de zinc noirée à la peinture).

Nous utiliserons le capteur de la figure 35, (mais sans pliage de la tôle), car dans ce type de capteur on évite le dépôt de poussière sur la vitre, qui constitue l'inconvénient du type de capteur de la figure 36.

Le capteur que nous utilisons est construit en un seul bloc, divisé en compartiments pour le réglage (surface variable) et tenant compte des problèmes de dilatation.

Nous ne nous intéressons pas aux problèmes de génie civil dans le dimensionnement, pour une première approche.

Il sera possible dans une étude plus approfondie, d'améliorer ce capteur:

- en augmentant la surface d'échange thermique entre l'absorbeur et le fluide à chauffer (air) en ajoutant des ailettes à l'absorbeur.
- en utilisant des surfaces sélectives.
- en utilisant un vitrage double du côté de la sortie du fluide, car à ce niveau la tôle recmet un rayonnement propre.

## V.1. Calcul de l'énergie captée:

L'énergie captée est calculée par tranche horaire et ceci pour chaque mois (valeurs moyennes).

Les résultats sont repris dans les tableaux et les courbes qui sont regroupés à partir de la page 53. Pour les calculs nous avons exploité les données du tableau de la page 27 et celles du tableau donnant les valeurs moyennes mensuelles de la déclinaison  $\delta$  (voir II.2.1).

Nous donnons ici l'explication de la méthode d'établissement des tableaux de résultats:

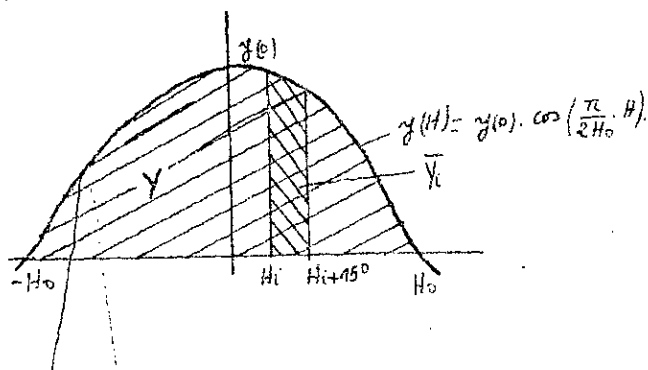
+ Données de base pour le calcul de l'énergie transmise après l'absorbeur (sans tenir compte des pertes par les parois):

- $S$  = irradiation quotidienne direct par  $m^2$  (avant vitrage) } tirés du tableau
  - $D$  = " " " diffuse " " " " " " } page 27
  - $G = S + D$
  - $\sigma$  = fraction d'insolation
- $\pm H_0$  = angle horaire du lever du soleil pour le capteur considéré } tirés du tableau page 27  
 $\approx$  " " du coucher " " " " " " } ou calculés à l'aide de la formule du paragraphe II.2.2
- $\tau(i_0)$  = coefficient de transmission du rayonnement diffus considéré isotrope (répartition égale du rayonnement pour tout angle d'incidence) par le vitrage. Ce coefficient dépend du type de vitrage. Il ne dépend pas de l'angle d'incidence du rayonnement solaire direct.  
Pour un vitrage simple (standard) :  $\tau(i_0) \approx 0,805$
  - $\tau(i_1)$  = coefficient de transmission du rayonnement diffus par l'absorbeur. Même considération que pour  $\tau(i_0)$ .  
Pour un absorbeur simple (standard) :  $\tau(i_1) = 0,88$
  - $\tau(i_0) \cdot \tau(i_1) = \tau\tau(i_0) = 0,710$  pour un vitrage simple et un absorbeur simple.  
(Pour plus de précision voir réf 17, 18 et 19)
  - Courbe donnant  $\tau(i)$  c'est à dire le coefficient de transmission du vitrage en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement direct. (fig 37)
  - Courbe donnant  $\tau(i_1)$  c'est à dire le coefficient de transmission de l'absorbeur en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement direct. (fig 38)  
Nous donnons une portion (celles qui nous intéressent) de ces 2 courbes (voir fig 37 et 38)
  - $i$  est calculé à partir de la formule donnée au paragraphe II.2.2
  - $\bar{i}$  est la moyenne de l'angle d'incidence pour le temps horaire considéré.

Hypothèses et formules de calcul :

Soient  $s(t) = s(H)$  = irradiation directe instantanée (puissance)  
 $d(t) = d(H)$  = " " " diffuse " " " "  
 $g(t) = g(H)$  = " " " globale " " " "

Ces 3 fonctions sont considérées (hypothèse) variant d'une manière "cosinusoidal".



$$Y = 2 y(0) \int_0^{H_0} \cos\left(\frac{\pi}{2H_0} \cdot H\right) dH = 2 y(0) \cdot \frac{2H_0}{\pi} \left[ \sin \frac{\pi}{2H_0} \cdot H \right]_0^{H_0}$$

$$Y = 4 y(0) \cdot \frac{H_0}{\pi} \Rightarrow y(0) = \frac{\pi}{4H_0} \cdot Y$$

$$\text{donc } y(H) = \frac{\pi}{4H_0} \cdot Y \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2H_0} \cdot H\right)$$

Par conséquent il nous suffit de connaître  $Y$  et  $H_0$  pour pouvoir calculer pour chaque tranche horaire l'énergie reçue  $\bar{Y}_i$  avant vitrage, en intégrant la fonction établie ci-dessus entre les bornes de cette tranche horaire ( $H_i$  et  $H_i + 15^\circ$ ).

$y$  et  $Y$  représentent indépendamment  $\begin{cases} \Delta(H) \text{ et } S \\ d(H) \text{ et } D \\ g(H) \text{ et } G \end{cases}$

Une fois calculé les énergies ( $\bar{S}$ ,  $\bar{D}$ ,  $\bar{G}$ ) pour la tranche horaire considérée, à partir des courbes  $\tau'(i)$  et  $\tau''(i)$  on tire  $\tau'(i)$  et  $\tau''(i)$  que l'on porte sur le tableau.

Après vitrage :

$$\begin{aligned} \bar{S}' & \text{ est donnée par } \bar{S}' = \tau'(i) \cdot \bar{S} \\ \bar{D}' & \text{ " " " } \bar{D}' = \tau'(i) \cdot \bar{D} = 0,805 \bar{D} \\ \bar{G}' & = \bar{S}' + \bar{D}' \end{aligned}$$

Après absorbeur :

$$\begin{aligned} \bar{S}'' & = \tau''(i) \cdot \bar{S}' = \tau''(i) \cdot \tau'(i) \cdot \bar{S} \\ \bar{D}'' & = \tau''(i) \cdot \bar{D}' = \tau''(i) \cdot \tau'(i) \cdot \bar{D} = \tau \tau''(i) \cdot \bar{D} = 0,710 \bar{D} \\ \bar{G}'' & = \bar{S}'' + \bar{D}'' \end{aligned}$$

## V.2: Calcul des dimensions et du rendement du capteur:

Pour assurer le fonctionnement de l'installation durant toute l'année de 9h à 15h au minimum, nous prenons la valeur la plus basse de l'énergie reçue après absorbeur, à partir des tableaux et courbes dont il était question dans le paragraphe précédent.

Cette valeur est de  $347 \text{ Wh/m}^2$  i.e  $298,4 \text{ kcal/m}^2$ . Or nous voulons capter  $90.000 \text{ kcal/h}$  (puissance évaporatoire  $35 \text{ kg/h}$  maintenue constante).

Tenant compte des pertes inévitables par les parois du capteur et du tronçon capteur-séchoir nous fixons la surface de captage à  $324 \text{ m}^2$ .

Soit les dimensions du capteur :

longueur  $54 \text{ m}$  ( que l'on fera varier selon les besoins)  
 largeur  $6 \text{ m}$   
 profondeur  $0,4 \text{ m}$   
 inclinaison  $45^\circ$  par rapport au sol.  
 direction vers le sud.

(voir schéma : coupe du capteur).

• Détermination des pertes:



Le débit d'air traversant le capteur est  $G_{a.s} \approx 6000 \text{ kg/h} = 1,67 \text{ kg/s}$  ;  
 donc la vitesse de déplacement est  $u = \frac{G_{a.s}}{F} = \frac{1,67}{0,2 \times 6} = 1,39 \text{ m/s}$

$F$  étant la section de passage de l'air dans le capteur.

La température d'entrée de l'air dans le capteur est de  $12^\circ\text{C}$

La température de sortie de l'air est de  $80^\circ\text{C}$  environ (tenant compte des pertes entre le capteur et le sechoir).

D'où la température moyenne :  $\theta_m = \frac{80 + 12}{2} = 46^\circ\text{C}$

$$Re = \frac{u \cdot l}{\nu} \approx \frac{1,39 \times 54}{17,95 \cdot 10^{-6}} \quad (> 4 \cdot 10^4)$$

A l'aide la formule de Polhausen simplifiée dans le cas de l'air

$$\alpha_{int} = 0,032 \cdot Re^{0,8} \cdot \frac{\lambda}{l}$$

$$= 0,032 \left( \frac{1,39 \times 54}{17,95 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot \frac{0,024}{54}$$

$$\alpha_{int} \approx 2,82 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$$

En supposant qu'il y a un vent de  $5 \text{ m/s}$  à  $12^\circ\text{C}$  qui souffle sous le capteur

alors :

$$\alpha_{ext} = 0,032 \cdot Re^{0,8} \cdot \frac{\lambda}{l} = 0,032 \cdot \left( \frac{5 \times 54}{14,16 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot \frac{0,024}{54}$$

$$\alpha_{ext} \approx 9,49 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$$

Nous isolons la partie arrière du capteur, ainsi que les côtés de la manière suivante :

2 couches d'acier (tôles intérieure et extérieure)

$$2 \times 0,005 = 0,01 \text{ m} = e_1$$

1 couche de liège expansé entre les 2 tôles :

$$e_2 = 0,09 \text{ m}$$

(Il est vrai que dans ce cas, il faut déterminer l'épaisseur optimale de la couche isolante, mais puisqu'il s'agit d'une première approche nous n'abordons pas ce problème.)

$$\lambda_1 = \lambda_{acier} \approx 50 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$$

$$\lambda_2 = \lambda_{liège \text{ expansé}} \approx 0,045 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$$

Le coefficient de transmission global est déterminé comme suit :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_{int}} + \frac{1}{\alpha_{ext}} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} = \frac{1}{2,82} + \frac{1}{9,49} + \frac{0,01}{50} + \frac{0,09}{0,045}$$

$$\text{d'où } k \approx 0,41 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{degré}$$

• pertes par la partie arrière du capteur et des côtés :

$$Q_{p.c} = k \cdot S \cdot \Delta\theta = 0,41 \cdot [2 \times 0,3 \times 54 + 6,20 \times 54] \times (50 - 12)$$

$$Q_{p.c} \approx 5721 \text{ kcal/h}$$

Or nous avons  $54 \times 6 \times 298,4 = 96682$  kcal/h d'énergie reçue après l'absor-  
-beur, d'où l'énergie reçue par le fluide :

$$96682 - 5721 = 90961 \text{ kcal/h}$$

L'énergie fournie par le soleil :

$$420 \times 324 = 136100 \text{ kcal/h}$$

d'où le rendement du capteur :

$$\eta_{\text{capteur}} = \frac{\text{énergie effectivement reçue par le fluide}}{\text{énergie fournie par le soleil}} = \frac{90961}{136100}$$

$$\eta_{\text{capteur}} = 0,67$$

Remarques :

• La surface est variable, nous donnerons le système de réglage dans le chapitre correspondant.

• En bas de chaque tableau (regroupés à partir de la page 53) nous obtenons la surface nécessaire pour évaporer 85 kg d'eau/h (puissance évaporatoire constante : caractéristique de l'installation).

$\theta_{\text{moy}}$  = température probable vers 9<sup>h</sup> du matin ( $\theta_{\text{min}}$  représenterait la température de l'air ambiant, la nuit), correspondant à " $\bar{G}_{\text{min}}$ " (9<sup>h</sup>).

$\theta_{\text{max}}$  = température probable à 12<sup>h</sup> correspondant à " $\bar{G}_{\text{max}}$ " (12<sup>h</sup>).

$\theta_{\text{moy}}$  et  $\theta_{\text{max}}$  sont tirés de la référence n°16 et reprise en annexe n°2

Sous les hypothèses :

+ rendement du sécheur :  $\eta_{\text{secheur}} = 0,58$  constant (voir III.4)  
+ " " capteur :  $\eta_{\text{capteur}} = 0,67$  "

nous calculons la surface du capteur utilisée maximale et minimale à l'aide de la formule :

$$S = \frac{G_{a.s.} \cdot \rho_{\text{pas}} (\bar{T}_0 - \theta)}{0,860 \bar{G}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{capteur}}}$$

$$G_{a.s.} = 6000 \text{ kg/h}$$

$$\rho_{\text{pas}} = 0,24 \text{ kcal/kg degré}$$

$$\bar{G} = [\text{Wh/m}^2]$$

$S_{\text{max}}$  correspond à  $\bar{G}_{\text{min}}$  et  $\theta_{\text{moy}}$   
 $S_{\text{min}}$  " "  $\bar{G}_{\text{max}}$  et  $\theta_{\text{max}}$

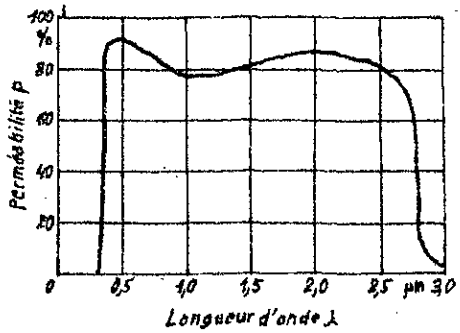
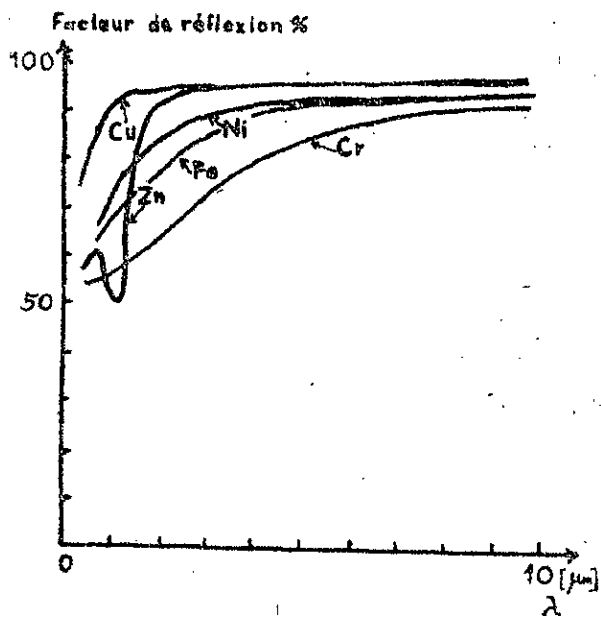
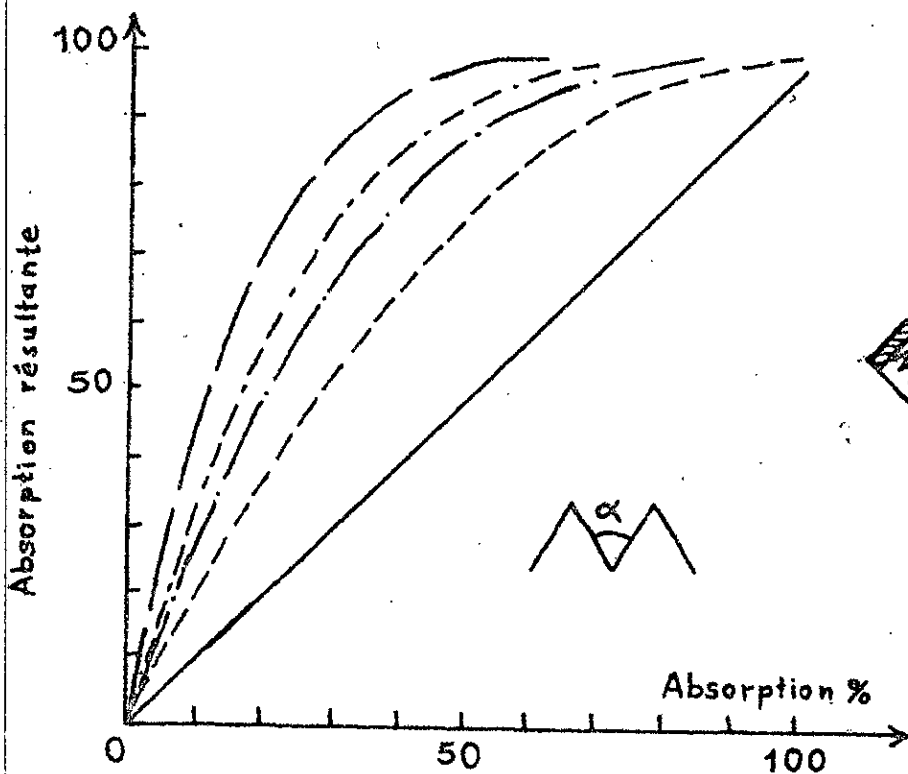


fig. 33 : Permésibilité spectrale au rayonnement du verre à vitres (épaisseur  $e = 2,8$  mm).

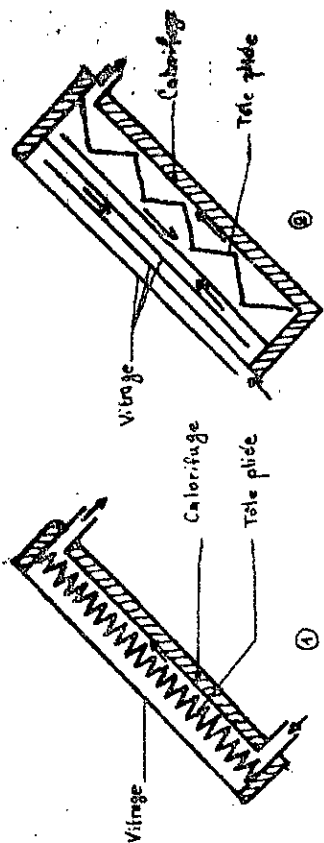
Facteurs de réflexion pour différents métaux en fonction de la longueur d'onde λ

fig. 32.



- 1 réflexion  $\alpha = 180^\circ$
- - - 2 réflexions  $\alpha = 90^\circ$
- · - · 3 réflexions  $\alpha = 60^\circ$
- · - · - 4 réflexions  $\alpha = 45^\circ$
- · - · - · 6 réflexions  $\alpha = 30^\circ$

fig. 34



Deux types de collecteurs à tôle pliée pour le chauffage de l'air

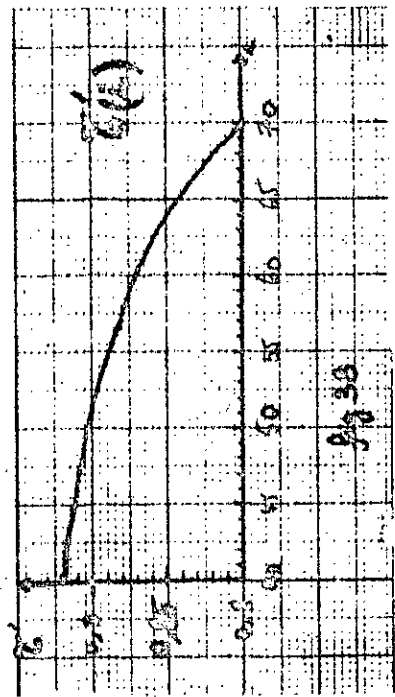
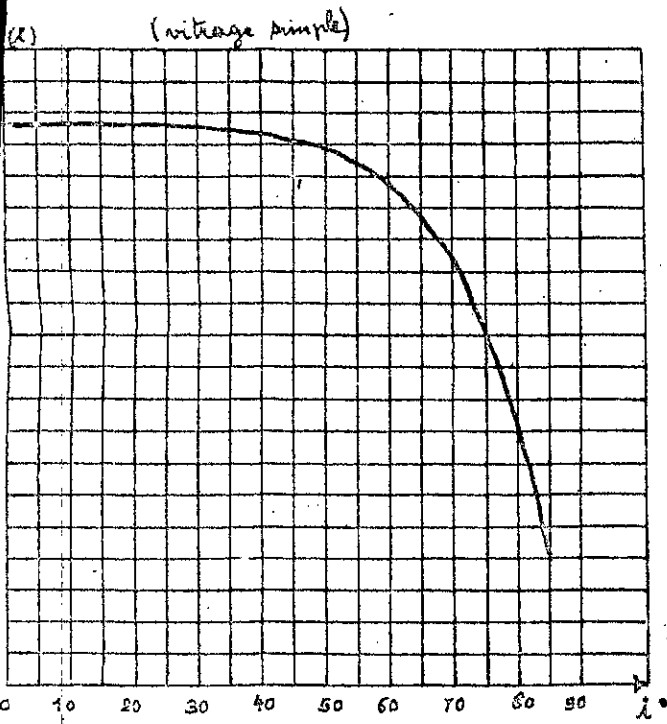
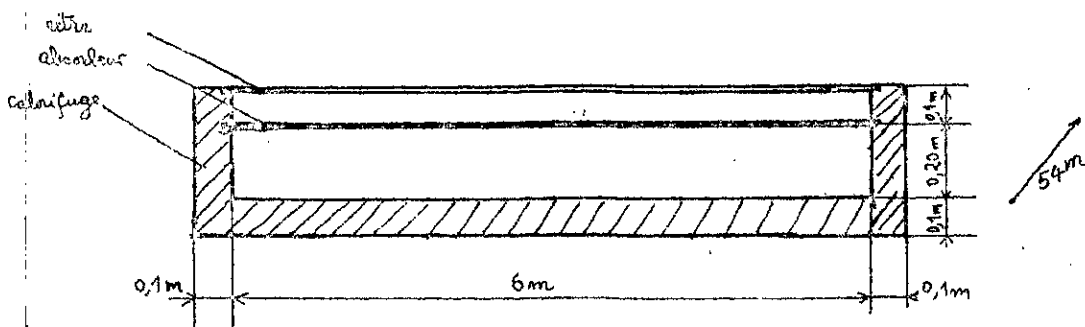
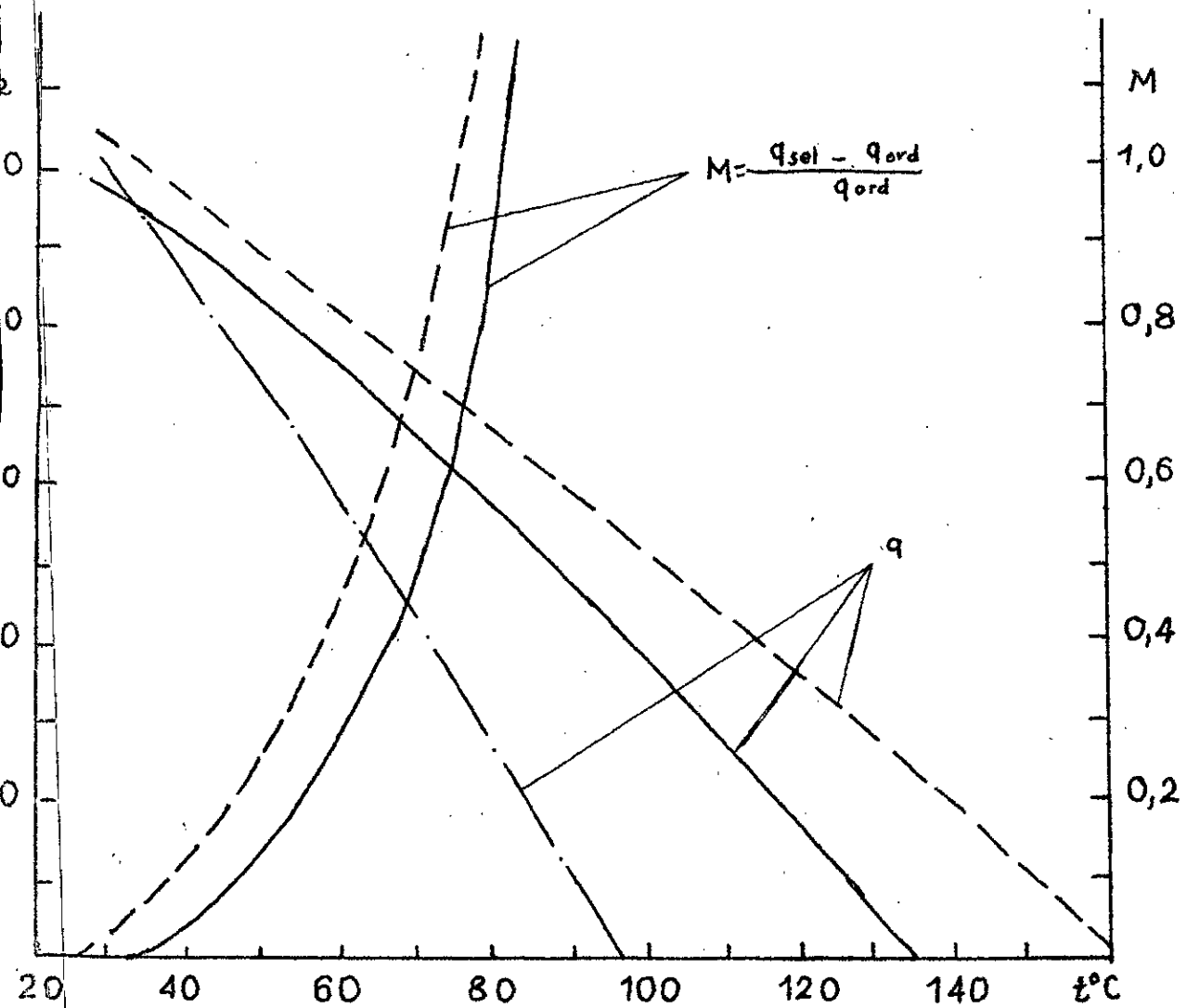


fig. 37



Coupe transversale (schéma de calcul) du capteur retenu.



Variation de la puissance thermique  $q$   
 et du gain relatif  $M$ , en fonction de  
 la température.

- — — — — Verre ordinaire et récepteur ordinaire
- · - · - · - Verre ordinaire et récepteur sélectif
- Verre sélectif et récepteur ordinaire

fig.39

# JANVIER

$S = 3286$ Wh/m <sup>2</sup> Jour ; $\delta \approx -20,8^\circ$ ; $\theta_{moy} = 8,45^\circ\text{C}$ ; $\tau(\bar{a}_z) = 0,805$
$D = 1069$ Wh/m <sup>2</sup> Jour ; $\sigma = 0,56$ ; $\theta_{max} = 23,5^\circ\text{C}$ ; $\tau\tau'(\bar{a}_z) = 9710$
$G = 4355$ Wh/m <sup>2</sup> Jour ; $H_0 \approx \pm 70^\circ$ ;

	H [°]	0÷15	15÷30	30÷45	45÷60	60÷70°		
	H [R]	12÷13	13÷14	14÷15	15÷16	16÷16 <sup>h</sup> 40 <sub>mn</sub>		
	$\bar{z}$ [°]	47,08	50,36	56,34	64,18			
avant vitrage	$\bar{S}$	543	482	367	211	41		
	$\bar{D}$	177	157	120	69	14		
	$\bar{G}$	720	639	487	280	55		
	$\tau(\bar{a}_z)$	0,85	0,85	0,82	0,75			
après un vitrage simple standard	$\bar{S}'$	462	410	301	158			
	$\bar{D}'$	142	126	97	56	11		
	$\bar{G}'$	604	536	398	214			
	$\tau'(\bar{a}_z)$	0,91	0,90	0,87	0,85			
après un vitrage simple et un absorbant simple standard	$\bar{S}''$	420	369	262	134			
	$\bar{D}''$	126	111	85	49	10		
	$\bar{G}''$	546	480	347	183			

$S_{max} \approx 316 \text{ m}^2 \Rightarrow 3,72 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$

$S_{min} \approx 161 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,89 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$

FEVRIER

$S = 3925 \text{ Wh/m}^2\text{Jour}$  ;  $\delta \approx -12,7^\circ$  ;  $\theta_{\text{moy}} = 10,85^\circ\text{C}$  ;  $\tau(\text{ir}) = 0,805$   
 $D = 1262 \text{ Wh/m}^2\text{Jour}$  ;  $\beta = 0,62$  ;  $\theta_{\text{max}} = 23,4^\circ\text{C}$  ;  $\tau'(\text{ir}) = 0,710$   
 $G = 5187 \text{ Wh/m}^2\text{Jour}$  ;  $H_0 \approx \pm 76^\circ$  ;

H	[°]	0÷15	15÷30	30÷45	45÷60	60÷75		
	[h]	12÷13	13÷14	14÷15	15÷16	16÷17		
$\bar{x}$	[°]	46,02	49,5	55,81	62,93			
avant intrage	$\bar{S}$	599	542	433	283	106		
	$\bar{D}$	192	174	139	91	34		
	$\bar{G}$	791	716	572	374	140		
$\tau(x)$		0,85	0,85	0,82	0,76			
après un intrage simple standard	$\bar{S}'$	509	461	355	215			
	$\bar{D}'$	155	140	112	73	27		
	$\bar{G}'$	664	601	467	288			
$\tau'(x)$		0,91	0,905	0,855	0,855			
après un intrage simple standard	$\bar{S}''$	463	417	304	184			
	$\bar{D}''$	136	124	99	65	24		
	$\bar{G}''$	599	541	403	249			

$S_{\text{max}} \approx 258 \text{ m}^2 \Rightarrow 3,04 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$

$S_{\text{min}} \approx 147 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,73 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$

# MARS

$S = 3792 \text{ Wh/m}^2\text{Jour}$  ;  $\delta \approx -1,9^\circ$  ;  $\theta_{\text{moy}} = 12,7^\circ\text{C}$  ;  $\tau(\bar{z}) = 0,805$   
 $D = 1627 \text{ Wh/m}^2\text{Jour}$  ;  $\sigma = 0,59$  ;  $\theta_{\text{max}} = 31,5^\circ\text{C}$  ;  $\tau\tau'(\bar{z}) = 0,710$   
 $G = 5419 \text{ Wh/m}^2\text{Jour}$  ;  $H_0 \approx \pm 84^\circ$  ;

	H [°]	0÷15	15÷30	30÷45	45÷60	60÷75	75÷84	
	[h]	12÷13	13÷14	14÷15	15÷16	16÷17	17÷17 <sup>h</sup> 36 <sub>mn</sub>	
	$\bar{z}$ [°]	46,20	49,77	56,23	64,67			
avant vitrage	$\bar{S}$	525	484	405	294	161	27	
	$\bar{D}$	225	208	174	126	69	11	
	$\bar{G}$	750	692	579	420	230	38	
	$\tau(\bar{z})$	0,85	0,85	0,82	0,74			
après un vitrage simple standard	$\bar{S}'$	446	411	332	223			
	$\bar{D}'$	181	167	140	101	56	9	
	$\bar{G}'$	621	578	472	324			
	$\tau'(\bar{z})$	0,91	0,90	0,885	0,845			
après un vitrage simple et un abri sous vitrage standard	$\bar{S}''$	406	370	294	188			
	$\bar{D}''$	160	148	124	89	49		
	$\bar{G}''$	566	518	418	277			

$$S_{\text{max}} \approx 247 \text{ m}^2 \Rightarrow 2,91 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$$

$$S_{\text{min}} \approx 128 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,51 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$$



AVRIL

$S = 3511$  Wh/m<sup>2</sup>.Jour ;  $\delta \approx +9,9^\circ$  ;  $\theta_{moy} = 16,25^\circ\text{C}$  ;  $\tau(\text{av}) = 0,805$   
 $D = 1860$  Wh/m<sup>2</sup>.Jour ;  $\epsilon = 6,61$  ;  $\theta_{max} = 30,6^\circ\text{C}$  ;  $\tau'(\text{av}) = 0,710$   
 $G = 5391$  Wh/m<sup>2</sup>.Jour ;  $H_0 \approx \pm 88^\circ$  ;

H [°]	0÷15	15÷30	30÷45	45÷60	60÷75	75÷88	
	[h]	12÷13	13÷14	14÷15	15÷16	16÷17	17÷17 <sup>h</sup> 52 <sub>min</sub>
$\bar{e}$ [°]	48,83	52,22	58,41	66,57			
avant ventée	$\bar{S}$	464	431	367	277	168	47
	$\bar{D}$	249	231	196	148	90	25
	$\bar{G}$	713	662	563	425	258	72
$\tau(\bar{e})$	0,85	0,84	0,80	0,73			
après un ventée simple et standard	$\bar{S}'$	394	362	294	202		
	$\bar{D}'$	200	186	158	119	72	20
	$\bar{G}'$	594	548	452	321		
$\tau'(\bar{e})$	0,905	0,905	0,875	0,84			
après un ventée simple et standard	$\bar{S}''$	357	327	257	170		
	$\bar{D}''$	177	164	139	105	64	18
	$\bar{G}''$	534	491	396	275		

$S_{max} \approx 239 \text{ m}^2 \Rightarrow 2,81 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée. h}$

$S_{min} \approx 138 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,62 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée. h}$

# MAI

$S = 3623 \text{ Wh/m}^2\text{Jour}$  ;  $\delta \approx +12,9^\circ$  ;  $\theta_{\text{moy}} = 20,35^\circ\text{C}$  ;  $\tau(\bar{x}) = 0,805$   
 $D = 1820 \text{ Wh/m}^2\text{Jour}$  ;  $\bar{\delta} = 0,73$  ;  $\theta_{\text{max}} = 35,6^\circ\text{C}$  ;  $\tau\tau'(\bar{x}) = 0,710$   
 $G = 5443 \text{ Wh/m}^2\text{Jour}$  ;  $H_0 \approx \pm 87^\circ$  ;

H [°]	0÷15	15÷30	30÷45	45÷60	60÷75	75÷87	
	[h]	12÷13	13÷14	14÷15	15÷16	16÷17	17÷17 <sup>h</sup> 48 <sup>mn</sup>
$\bar{x}$ [°]	52,36	55,46	61,19	68,82			
avant triage	$\bar{S}$	485	449	381	285	167	42
	$\bar{D}$	244	226	191	143	84	21
	$\bar{G}$	729	675	572	428	251	63
$\tau(\bar{x})$	0,84	0,82	0,78	0,67			
après un triage simple standard	$\bar{S}'$	407	368	297	191		
	$\bar{D}'$	196	182	154	115	68	17
	$\bar{G}'$	603	550	451	306		
$\tau'(\bar{x})$	0,895	0,90	0,865	0,83			
après un triage simple standard	$\bar{S}''$	364	331	257	159		
	$\bar{D}''$	173	160	136	102	60	
	$\bar{G}''$	537	491	393	261		

$$S_{\text{max}} \approx 217 \text{ m}^2 \Rightarrow 2,55 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot h$$

$$S_{\text{min}} \approx 118 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,34 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot h$$

JUIN

$S = 3372 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $\delta \approx +23,1^\circ$  ;  $\theta_{\text{moy}} = 24,95^\circ \text{C}$  ;  $\tau(\bar{i}_z) = 0,805$   
 $D = 1839 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $\bar{\sigma} = 0,75$  ;  $\theta_{\text{maxoc}} = 41,0^\circ \text{C}$  ;  $\tau\tau'(\bar{i}_z) = 0,710$   
 $G = 5210 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $H_0 \approx \pm 86^\circ$  ;

H	[°]	0÷15	15÷30	30÷45	45÷60	60÷75	75÷86	
	[h]		12÷13	13÷14	14÷15	15÷16	16÷17	17÷17 <sup>h</sup> 44 <sub>mn</sub>
$\bar{x}$	[°]	54,33	57,28	62,73	70,01			
avant orlage	$\bar{S}$	456	422	357	264	153	34	
	$\bar{D}$	247	230	195	144	83	19	
	$\bar{G}$	703	652	552	408	236	53	
	$\tau(\bar{x})$	0,83	0,81	0,76	0,65			
après un orlage simple standard	$\bar{S}'$	378	342	271	172			
	$\bar{D}'$	199	185	157	116	67	15	
	$\bar{G}'$	557	527	428	288			
	$\tau'(\bar{x})$	0,89	0,885	0,855	0,8			
après un orlage simple et un abriter simple standard	$\bar{S}''$	336	303	232	138			
	$\bar{D}''$	175	163	138	102			
	$\bar{G}''$	511	466	370	240			

$S_{\text{max}} \approx 204 \text{ m}^2 \Rightarrow 2,4 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot h$

$S_{\text{min}} \approx 103 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,21 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot h$

# JUILLET

$S = 3733 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $\delta = +21,3^\circ$  ;  $\theta_{\text{moy}} = 29,10^\circ \text{C}$  ;  $\tau(z) = 0,805$   
 $D = 1730 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $\xi = 0,80$  ;  $\theta_{\text{max}} = 43,5^\circ \text{C}$  ;  $\tau'(z) = 0,710$   
 $G = 5462 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $H_0 = \pm 87$  ;

	H [°]	0-15	15-30	30-45	45-60	60-75	75-87	
	[h]	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-17 <sup>h</sup> 48 <sub>mn</sub>	
	$\bar{\tau}$ [°]	53,42	56,44	62,03	69,5			
avant mbrage	S	499	463	393	294	174	44	
	H	231	215	182	136	81	20	
	G	730	678	575	430	255	64	
	$\tau(z)$	0,83	0,81	0,77	0,67			
après mbrage temp's à l'air	S'	414	375	303	197			
	H'	186	173	146	109	65	16	
	G'	600	548	449	306			
	$\tau(z)$	0,895	0,88	0,86	0,8			
après, au milieu de l'air, au milieu de l'air	S''	371	330	261	158			
	H''	164	153	129	97			
	G''	535	483	390	255			

$$S_{\text{max}} \approx 178 \text{ m}^2 \Rightarrow 2,09 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$$

$$S_{\text{min}} \approx 91 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,07 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$$

# ADUT

$$\begin{aligned}
 S &= 4335 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{Jour} ; \delta \approx +13,7^\circ ; \theta_{\text{moy}} = 27,75^\circ\text{C} ; \tau(\bar{x}) = 0,805 \\
 D &= 1624 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{Jour} ; \bar{\epsilon} = 0,80 ; \theta_{\text{massc}} = 40,9^\circ\text{C} ; \tau'(\bar{x}) = 0,710 \\
 G &= 5959 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{Jour} ; H_0 \approx \pm 88
 \end{aligned}$$

H [°]	0÷15	15÷30	30÷45	45÷60	60÷75	75÷88	
	[h]	12÷13	13÷14	14÷15	15÷16	16÷17	17÷17 <sup>h</sup> 52 <sub>min</sub>
$\bar{x}$ [°]	50,175	53,46	59,48	67,45			
avant réglage	$\bar{S}$	573	533	454	342	207	58
	$\bar{D}$	215	200	170	128	78	22
	$\bar{G}$	788	733	624	470	285	80
$\tau(\bar{x})$	0,85	0,83	0,79	0,70			
après un réglage simple standard	$\bar{S}'$	487	442	359	239		
	$\bar{D}'$	173	161	137	103	63	18
	$\bar{G}'$	660	603	496	342		
$\tau'(\bar{x})$	0,90	0,88	0,87	0,82			
après un réglage simple plus élaboré simple standard	$\bar{S}''$	438	389	312	196		
	$\bar{D}''$	153	142	121	91		
	$\bar{G}''$	591	531	433	287		

$$S_{\text{massc}} \approx 169 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,99 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$$

$$S_{\text{min}} \approx 92 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,08 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$$

# SEPTEMBRE

$S = 4901 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$ ,  $\delta \approx +3,0^\circ$ ,  $\theta_{\text{moy}} = 23,60^\circ\text{C}$ ,  $\tau(z) = 0,805$   
 $D = 1489 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$ ,  $\bar{\sigma} = 0,77$ ,  $\theta_{\text{max}} = 38,0^\circ\text{C}$ ,  $\tau(z) = 0,710$   
 $G = 6390 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$ ,  $H_0 \approx \pm 88$

H [°]	0-15	15-30	30-45	45-60	60-75	75-88	
	[R]	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-17 <sup>h</sup> 52 <sub>mn</sub>
$\bar{x}$ [°]	46,99	50,52	56,92	65,31			
$\bar{S}$	648	603	513	387	234	66	
$\bar{D}$	197	183	156	118	71	20	
$\bar{G}$	845	786	669	505	305	86	
$\tau(\bar{x})$	0,85	0,85	0,81	0,73			
$\bar{S}'$	551	513	416	283			
$\bar{D}'$	159	147	126	95	57	16	
$\bar{G}'$	710	660	542	378			
$\tau(\bar{x})$	0,91	0,895	0,88	0,84			
$\bar{S}''$	501	459	366	238			
$\bar{D}''$	140	130	111	84			
$\bar{G}''$	641	589	477	322			

$S_{\text{max}} \approx 173 \text{ m}^2 \Rightarrow 2,04 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$

$S_{\text{min}} \approx 95 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,12 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$

# OCTOBRE

$S = 4447 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $\delta \approx -8,8^\circ$  ;  $\theta_{\text{moy}} = 23,60^\circ\text{C}$  ;  $\Sigma(\alpha_z) = 0,805$   
 $D = 1300 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $\delta = 0,69$  ;  $\theta_{\text{max}} = 31,90^\circ\text{C}$  ;  $\Sigma\alpha_z = 0,710$   
 $G = 5447 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $H_0 \approx \pm 80$

H [°]	0-15	15-30	30-45	45-60	60-75	75-80	
	[R]	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-17 <sup>20</sup> mn
$\alpha_z$ [°]	45,87	49,41	55,81	64,17			
avant vitrage	$S$	645	590	483	335	159	11
	$D$	189	172	141	98	46	3
	$G$	834	762	624	433	205	14
$\alpha_z$	0,85	0,85	0,82	0,75			
après un vitrage simple standard	$S'$	548	501	396	251		
	$D'$	152	138	114	79	37	2
	$G'$	700	639	510	330		
$\alpha_z$	0,91	0,90	0,885	0,85			
après un vitrage simple et un absorbeur simple standard	$S''$	499	451	350	213		
	$D''$	134	122	100	70		
	$G''$	633	573	450	283		

$S_{\text{max}} \approx 486 \text{ m}^2 \Rightarrow 2,19 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée. l}$   
 $S_{\text{min}} \approx 114 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,34 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée. l}$

$\alpha_z$	45,87	49,41	55,81	64,17			
$S_{\text{max}}$	645	590	483	335	159	11	
$S_{\text{min}}$	189	172	141	98	46	3	
$G$	834	762	624	433	205	14	
$\alpha_z$	0,85	0,85	0,82	0,75			
$S'$	548	501	396	251			
$D'$	152	138	114	79	37	2	
$G'$	700	639	510	330			
$\alpha_z$	0,91	0,90	0,885	0,85			
$S''$	499	451	350	213			
$D''$	134	122	100	70			
$G''$	633	573	450	283			

NOVEMBRE

$S = 3881 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $\delta = -18,4^\circ$  ;  $\theta_{\text{moy}} = 12,40^\circ \text{C}$  ;  $\tau(\bar{z}) = 0,805$   
 $D = 1067 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $\delta = 0,64$  ;  $\theta_{\text{max}} = 29,3^\circ \text{C}$  ;  $\tau(\bar{z}') = 0,710$   
 $G = 4270 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $H_0 = \pm 72^\circ$  ;

H [°]	0 ÷ 15	15 ÷ 30	30 ÷ 45	45 ÷ 60	60 ÷ 72		
	[R] 12 ÷ 13	13 ÷ 14	14 ÷ 15	15 ÷ 16	16 ÷ 16 <sup>h</sup> 48 <sup>mn</sup>		
$\bar{z}$ [°]	46,70	50,05	56,14	64,12			
$\bar{S}$	624	558	432	261	66		
$\bar{D}$	172	153	119	72	18		
$\bar{G}$	796	711	551	333	84		
$\tau(\bar{z})$	0,85	0,85	0,82	0,75			
$\bar{S}'$	530	474	354	196			
$\bar{D}'$	138	123	96	58	14		
$\bar{G}'$	668	597	450	254			
$\tau(\bar{z}')$	0,91	0,905	0,88	0,85			
$\bar{S}''$	482	429	312	167			
$\bar{D}''$	122	109	84	51			
$\bar{G}''$	604	538	396	218			

$S_{\text{max}} \approx 261 \text{ m}^2 \Rightarrow 3,07 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$

$S_{\text{min}} \approx 128 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,51 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$



DECEMBRE

$S = 3276 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $\delta \approx -23,0^\circ$  ;  $\theta_{\text{moy}} = 8,95^\circ\text{C}$  ;  $\tau(\bar{i}_z) = 0,805$   
 $D = 994 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $\bar{\delta} = 0,57$  ;  $\theta_{\text{max}} = 24,2^\circ\text{C}$  ;  $\tau\tau(\bar{i}_z) = 0,710$   
 $G = 4270 \text{ Wh/m}^2 \text{ Jour}$  ;  $H_0 \approx \pm 69^\circ$  ;

H	[°]	0÷15	15÷30	30÷45	45÷60	60÷69		
	[R]		12÷13	13÷14	14÷15	15÷16	16÷16 <sup>h</sup> 36 <sub>mn</sub>	
$\bar{x}$	[°]	47,56	50,75	56,61	64,32			
avant vitrage	$\bar{S}$	549	485	366	204	34		
	$\bar{D}$	167	147	111	62	0		
	$\bar{G}$	716	632	477	266	44		
	$\tau(\bar{x})$	0,85	0,84	0,81	0,75			
après un vitrage simple et un absorbeur simple standard	$\bar{S}'$	467	407	296	153			
	$\bar{D}'$	134	118	89	50	8		
	$\bar{G}'$	601	525	385	203			
	$\tau(\bar{x})$	0,905	0,900	0,883	0,85			
après un vitrage simple et un absorbeur simple standard	$\bar{S}''$	423	366	261	130			
	$\bar{D}''$	119	104	79	44			
	$\bar{G}''$	542	470	340	174			

$S_{\text{max}} \approx 320 \text{ m}^2 \Rightarrow 3,76 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$

$S_{\text{min}} \approx 160 \text{ m}^2 \Rightarrow 1,88 \text{ m}^2/\text{kg d'eau évaporée} \cdot \text{h}$

Energie solaire

Avant vitrage

Par tranche horaire: Global

[Wh/m<sup>2</sup>]

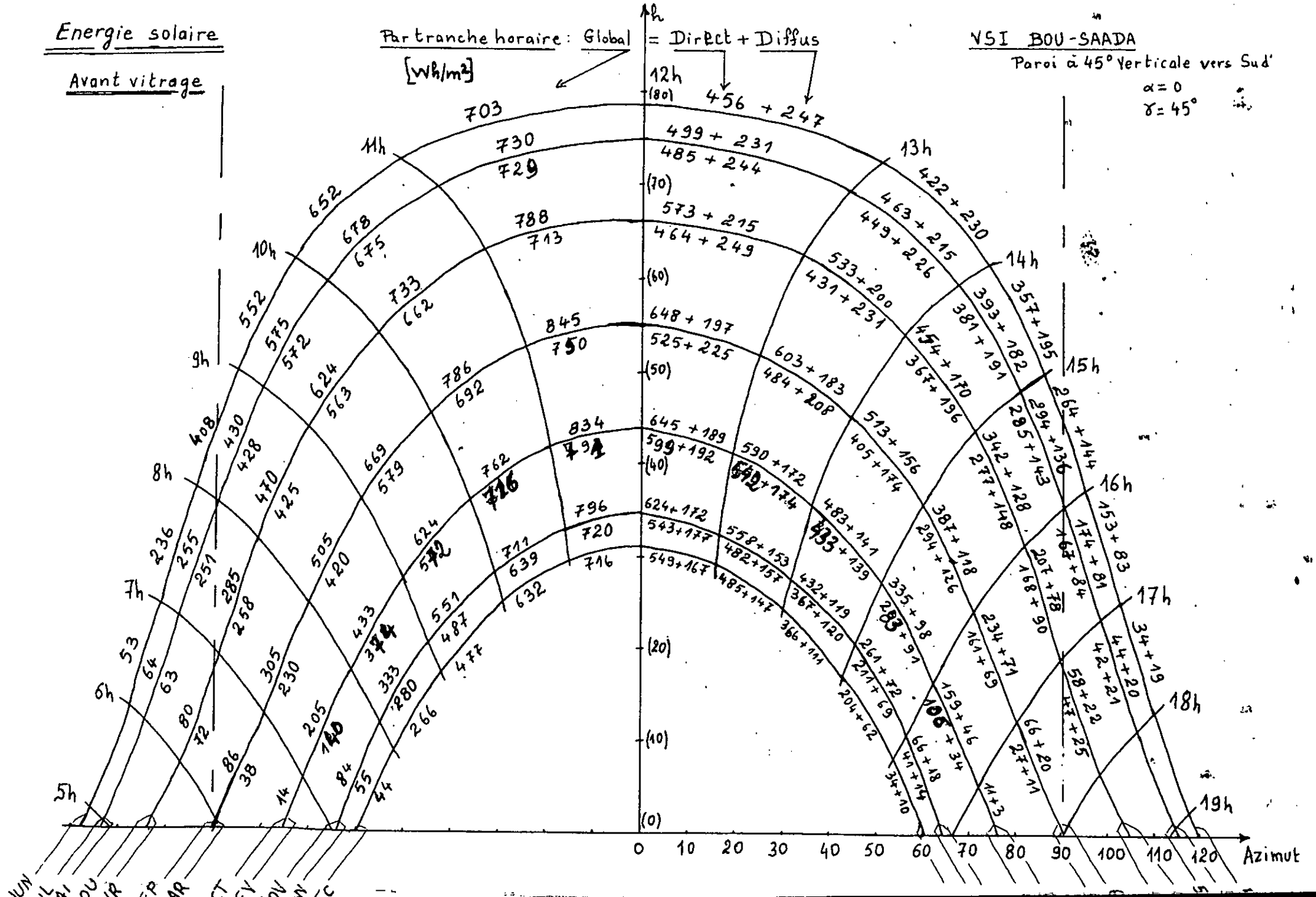
$= \text{Direct} + \text{Diffus}$

VSI BOU-SAADA

Paroi à 45° verticale vers Sud'

$\alpha = 0$

$\gamma = 45^\circ$



Energie solaire

Par tranche horaire: Global

$R = \text{Direct} + \text{Diffus}$

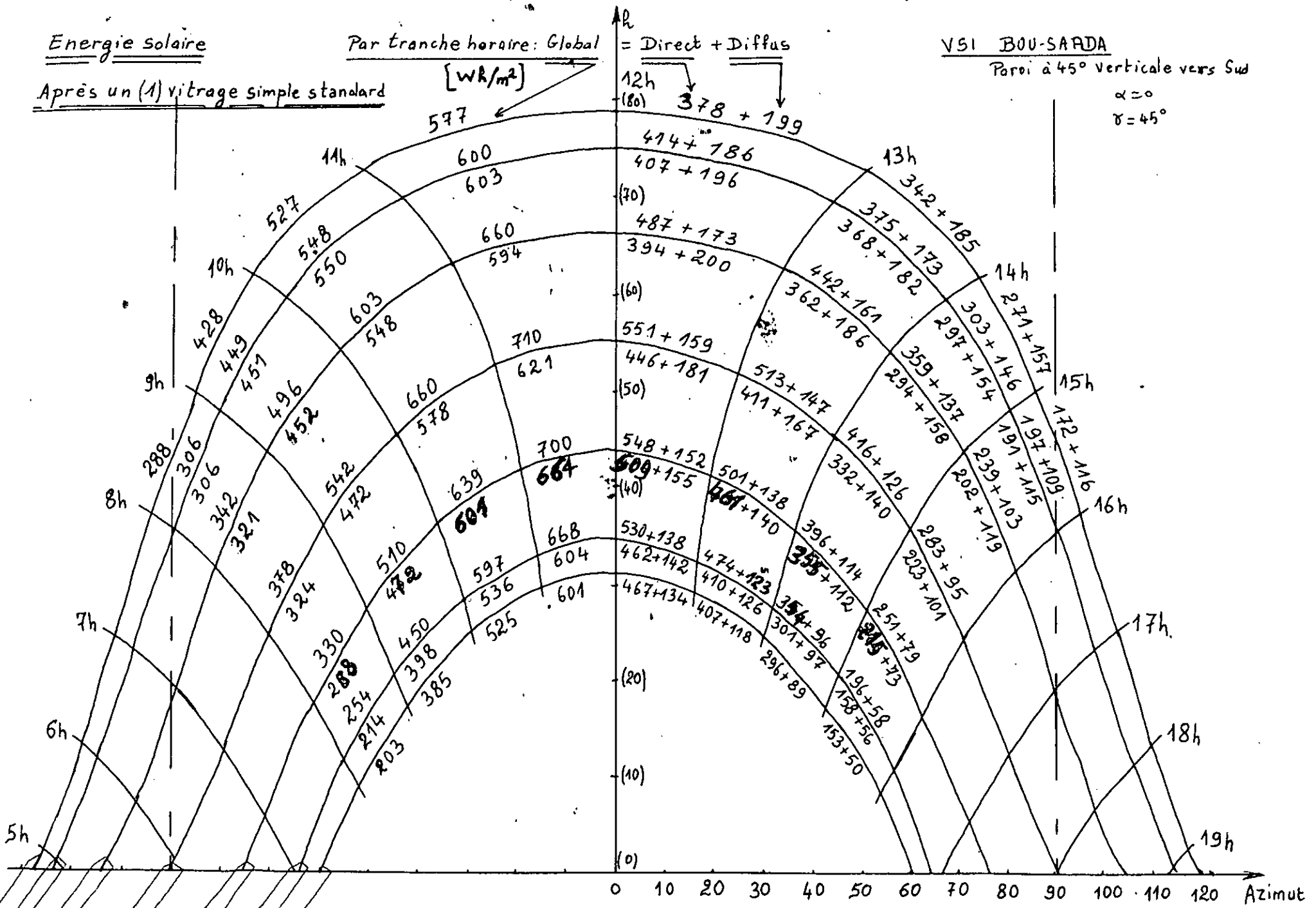
VSI BOU-SARDA

Paroi à 45° verticale vers Sud

$\alpha = 0$   
 $\gamma = 45^\circ$

Après un (1) vitrage simple standard

[Wh/m<sup>2</sup>]



# Energie Solaire

Par tranche horaire: Global = Direct + Diffus

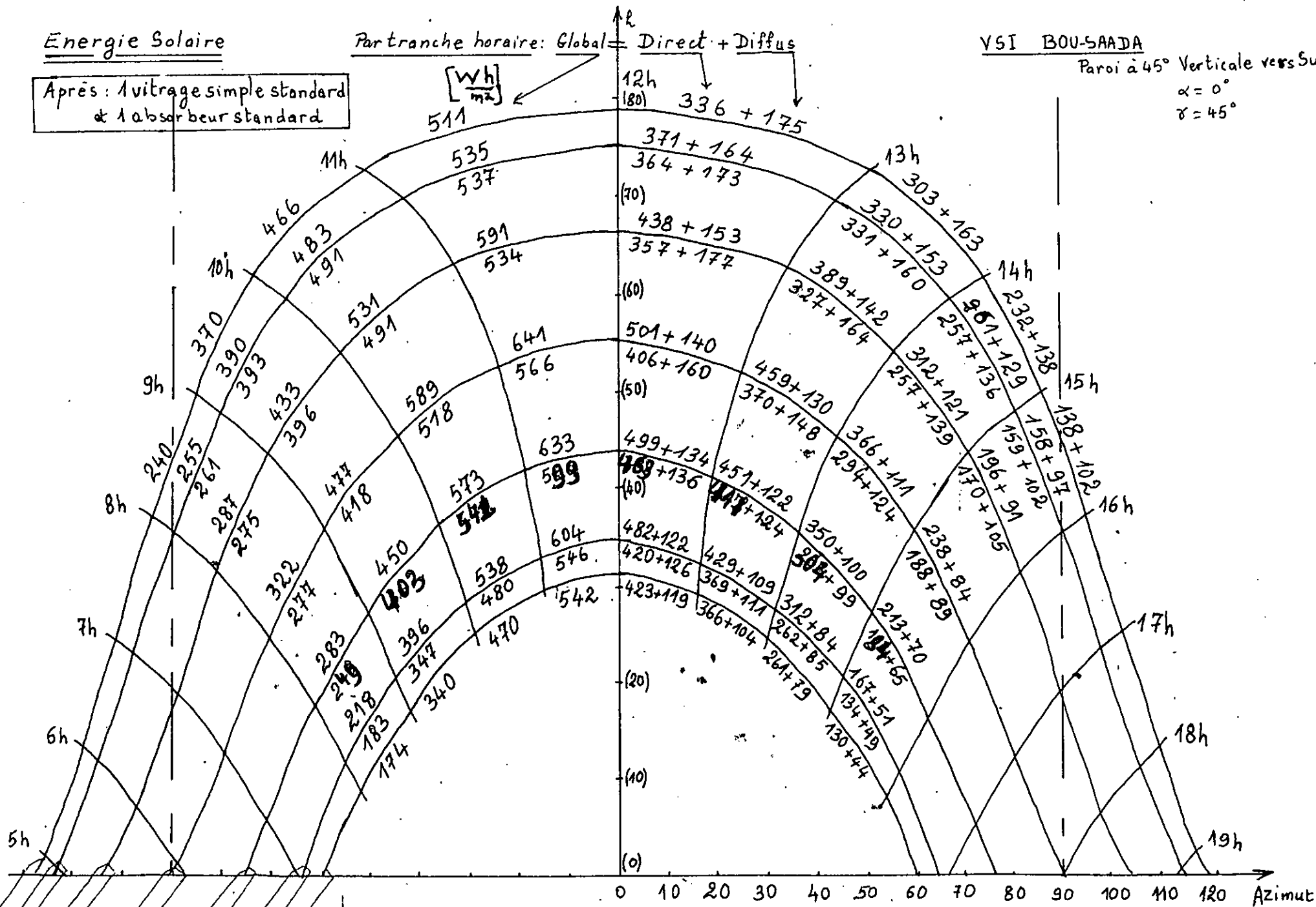
VSI BOU-SAADA

Paroi à 45° Verticale vers Sud

$\alpha = 0^\circ$   
 $\gamma = 45^\circ$

Après : 1 vitrage simple standard  
& 1 absorbeur standard

$\left[ \frac{Wh}{m^2} \right]$



## Chapitre VI: DETERMINATION DE LA PUISSANCE DU VENTILATEUR

Dans le paragraphe IV.2.2 nous avons déterminé le débit d'air à 70°C que le ventilateur, placé entre le capteur solaire et le séchoir, doit fournir. Le débit ( $G_{a.s} = 6049 \text{ kg/h}$ ) est un paramètre important mais insuffisant à lui seul, pour construire ou choisir le ventilateur. Il doit être accompagné du paramètre "perte de charge" ou directement de la puissance.

La formule donnant la perte de charge est:

$$\Delta P = \sum \Delta P_i = \sum \left[ Rl + \sum \left( \xi \frac{u^2 \rho}{2} \right)_j \right]_i$$

$i$  = indice du tronçon de la conduite d'air

$R$  = résistance (ou perte de charge / m) due à la rugosité du tronçon de conduite  $i$ . Elle dépend du matériau de construction du tronçon. Elle est déterminée à l'aide d'abaque.

$l$  = longueur du tronçon de conduite  $i$

$\left( \xi \frac{u^2 \rho}{2} \right)_j$  = perte de charge singulière d'indice  $j$

$\xi$  = résistance singulière en  $j$ . Elle est donnée par les abaques.

$u$  = vitesse de l'air en  $j$

$\rho$  = densité de l'air.

Les pertes de charges ne sont calculées qu'une fois connus:

- les dimensions exactes et les matériaux de construction des différents tronçons; ce qui permettra le calcul de  $\sum (Rl)_i$ .
- les différents changements de direction, les volés de réglage, les changements de sections; ce qui permettra de calculer  $\sum \left( \xi \frac{u^2 \rho}{2} \right)_j$ .

Ces calculs se feront à l'aide d'abaque qu'on peut trouver dans la référence n° 11.

Dans notre cas un calcul très approximatif nous permet de déterminer, à l'aide de ces abaques, dans le tronçon: de l'entrée du capteur jusqu'à l'entrée du ventilateur, une valeur de perte de charge  $\Delta P_1 = 23 \text{ mm CE}$

Le tronçon: séchoir, est très difficile à déterminer la perte de charge; la perte de charge due à la présence de charriot et de produit ne peut être connue par calcul. C'est pour cela que nous estimons la perte de charge dans ce tronçon à  $\Delta P_2 = 2 \Delta P_1$ , car c'est dans cette partie qu'il y a le plus de résistance au mouvement de l'air.

Ce qui nous donne la perte de charge totale que doit vaincre le ventilateur:  $\Delta P = 3 \Delta P_1 = 69 \text{ mm CE}$ .

La formule donnant la puissance du ventilateur est:

$$N = \frac{\Delta P \cdot G_{a.s}}{102 \cdot 3600 \text{ Ventilateur}}$$

$$\rho_{\text{air}} = \rho_{\text{air à } 70^{\circ}\text{C}} (1 + x_2) = 1,031 (1 + 0,0042) = 1,035$$

$$x_2 = 0,0042 \text{ kg/kg d'air sec} = \text{teneur absolue en vapeur d'eau}$$

$$G_{\text{as}} = 6049 \text{ kg/h} \quad (\text{voir paragraphe IV.2.2})$$

$$\eta_{\text{ventilateur}} = 0,6 \quad (\text{supposé})$$

$$\Rightarrow N \approx \frac{70 \cdot \frac{6049}{1,035}}{102 \cdot 3600 \cdot 0,6} = 1,86 \text{ kW}$$

Donc la puissance sur l'arbre du ventilateur (moteur électrique) est

$$N = 2 \text{ kW}$$

Remarque : C'est la puissance minimale du moteur électrique. Il n'y a aucun inconvénient de prendre un moteur électrique (et un ventilateur) de puissance plus grande (2,5 ou 3 kW) ; une puissance plus grande ne fera qu'augmenter le débit d'air ( $\Delta P$  restera pratiquement constant ou variera peu). Le débit d'air que nous avons calculé lors du paragraphe IV.2.2, est le débit minimal à fournir pour pouvoir sécher 100 kg/h d'abricot sous les conditions fixées.

Si lors de la construction, on constate que le ventilateur construit ou acheté, n'arrive pas à fournir le débit minimal, il n'y a aucun inconvénient à ajouter un autre ventilateur à la sortie du séchoir de manière à compenser le débit.

Ces remarques sont faites à cause de l'imprécision du calcul de la puissance du ventilateur.

## Chapitre VII. L'ENERGIE EOLIENNE

Le débit du ventilateur devant être maintenu constant (ou varier peu) et par là même sa puissance car les pertes de charges ne varient pas beaucoup (voir chapitre VI), la puissance fournie par l'éolienne si dimensions constantes, est proportionnelle à la 3<sup>ème</sup> puissance de la vitesse du vent ( $N_{\text{éolienne}} = k v^3$ ), ce qui fait - comme nous allons le voir - que l'énergie éolienne ne peut être utilisée directement par des systèmes mécaniques. S'il existe des variateurs de vitesse, des limiteurs de couple, il n'existe pas de variateur de puissance mécanique.

Mais nous allons quand même donner une étude sur l'éolienne pour bien montrer ce que nous affirmons ci-dessus.

L'aérodynamique des éoliennes obéit aux lois de la mécanique des fluides incompressible. (L'air, dans la théorie des ventilateurs et des machines analogues dont l'éolienne, est considéré incompressible).

Un filet d'air (de vent) contient une puissance:

$$N = S_a \cdot v \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} = S_a \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^3 = k_a \cdot v^3$$

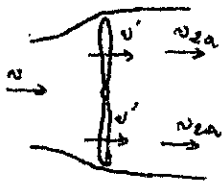
où  $S_a$  = section du filet d'air

$\rho$  = densité de l'air (on prend généralement  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ )

$v$  = vitesse de l'air (vent)

$\frac{\rho v^2}{2}$  = pression dynamique du vent.

En adoptant une éolienne à axe horizontale, auto-orientable (grâce à un système analogue à celui d'une girouette), le schéma ci-dessous représente l'action du vent sur celle-ci.



La puissance théorique que peut recevoir une éolienne donnée est:

$$N_{th} = S v' (v_1^2 - v_2^2) \frac{3}{2}$$

avec  $v' = \frac{1}{2} (v_1 + v_2)$  moyenne arithmétique.

$\frac{\rho v_1^2}{2}$  = pression dynamique à l'entrée de la roue

$\frac{\rho v_2^2}{2}$  = pression dynamique à la sortie de la roue

$S v'$  = débit d'air traversant la roue

$S$  = section de passage du vent.

$$N_{th} = \frac{\rho S v'}{2} (v_1^2 - v_{2a}^2) \quad \text{or } v_{2a} = 2v' - v_1 \text{ d'après } v' = \frac{v_1 + v_{2a}}{2}$$

$$\begin{aligned} N_{th} &= \frac{\rho S}{2} v' [v_1^2 - (2v' - v_1)^2] \\ &= \frac{\rho S}{2} v' [v_1^2 - 4v'^2 - v_1^2 + 4v'v_1] \\ &= \frac{\rho S}{2} \cdot 4v' [v'v_1 - v'^2] \\ &= \left(\frac{\rho S}{2}\right) \cdot 4 [v'^2 v_1 - v'^3] \\ &= \left(\frac{\rho S}{2}\right) \cdot 4 \frac{v_1^3}{v_1^3} [v'^2 v_1 - v'^3] \\ &= \left(\frac{\rho S}{2}\right) \cdot 4 v_1^3 \left[\left(\frac{v'}{v_1}\right)^2 - \left(\frac{v'}{v_1}\right)^3\right] \end{aligned}$$

$$\text{d'où } N_{th} = C_{th} \cdot \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad \text{avec } C_{th} = 4 \left[ \left(\frac{v'}{v_1}\right)^2 - \left(\frac{v'}{v_1}\right)^3 \right]$$

$C_{th}$  = rendement théorique de Betz

La limite théorique de Betz est déterminée comme suit :

$$C_{th, \max} = \text{Max} \left[ 4 \left( \left(\frac{v'}{v_1}\right)^2 - \left(\frac{v'}{v_1}\right)^3 \right) \right]$$

$$\frac{dC_{th}}{d\left(\frac{v'}{v_1}\right)} = 4 \left[ 2\left(\frac{v'}{v_1}\right) - 3\left(\frac{v'}{v_1}\right)^2 \right] = 0 \quad \text{si } \frac{v'}{v_1} = \frac{2}{3} \quad \text{donc si } v_{2a} = \frac{1}{3} v_1$$

$$\frac{d^2 C_{th}}{d\left(\frac{v'}{v_1}\right)^2} = 8 - 24\left(\frac{v'}{v_1}\right) \Rightarrow \frac{d^2 C_{th}}{d\left(\frac{v'}{v_1}\right)^2} \left(\frac{v'}{v_1} = \frac{2}{3}\right) = 8 - 24 \times \frac{2}{3} = -8 < 0$$

donc  $\frac{v'}{v_1} = \frac{2}{3}$  correspond à un maximum de rendement.

Donc la limite théorique de Betz correspond à  $\frac{v'}{v_1} = \frac{2}{3}$  (ou  $v_{2a} = \frac{1}{3} v_1$ )

$$C_{th, \text{Betz}} = 4 \left[ \left(\frac{2}{3}\right)^2 - \left(\frac{2}{3}\right)^3 \right] = \frac{16}{27} \approx 59,26\%$$

Ce qui signifie qu'il n'est pas possible de capter plus de 59,26% de l'énergie contenue dans le vent.

D'autre part, une autre théorie (celle d'Euler) nous permet de calculer la puissance théorique autrement.

d'après Euler la puissance théorique est : (voir schéma de calcul)

$$N = -M \cdot H = -\rho S v_1 \cdot H = -u (v_{1u} - v_{2u}) \rho S v_1$$

le signe (-) indique qu'on extrait de l'énergie au vent.

$v_{1u} = 0$  car le vent attaque la roue frontalement.

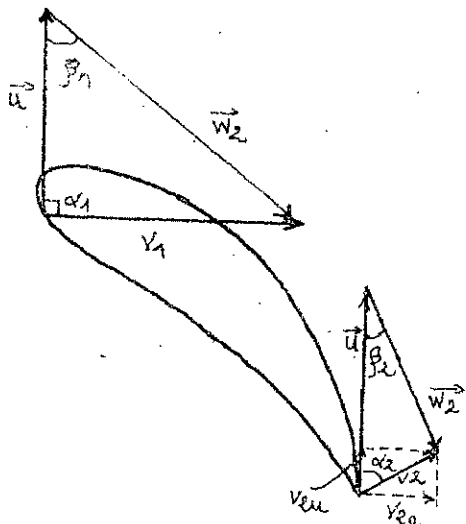
$M$  = débit massique du vent à travers la roue

$H$  = énergie par kg de fluide.

$\rho$  = densité du fluide

$v_1$  = vitesse du fluide à l'entrée





$$v_{2u} = 0 \text{ donc } N_{th} = \rho S v_1 \cdot u \cdot v_{2u} = \rho S v_1 \left( \frac{v_1}{\tan \beta_1} \right) \cdot \left( \frac{v_{2a}}{\tan \beta_2} \right)$$

$$\text{or } u = \frac{v_1}{\tan \beta_1} \text{ et } v_{2u} = \frac{v_{2a}}{\tan \beta_2}$$

$\beta_1$  et  $\beta_2$  fixés par la construction.

$$\text{nous aurons : } \tan \beta_2 = \frac{v_{2a}}{u - v_{2u}} \Rightarrow (u - v_{2u}) = \frac{v_{2a}}{\tan \beta_2}$$

$$\text{donc } \frac{v_1}{\tan \beta_1} - \frac{v_{2a}}{\tan \beta_2} = \frac{v_{2a}}{\tan \beta_2}$$

$$\frac{v_1}{\tan \beta_1} = v_{2a} \left( \frac{1}{\tan \beta_2} + \frac{1}{\tan \beta_2} \right)$$

$$\text{or } \frac{v_{2a}}{\tan \beta_2} = \frac{v_1}{\tan \beta_1} - \frac{v_{2a}}{\tan \beta_2} = v_{2u}$$

$$\text{donc } N_{th} = \rho \cdot S \cdot v_1 \cdot \frac{v_1}{\tan \beta_1} \cdot \left( \frac{v_1}{\tan \beta_1} - \frac{v_{2a}}{\tan \beta_2} \right)$$

$$N_{th} = \rho \cdot S \cdot v_1 \cdot \frac{v_1}{\tan \beta_1} \cdot \left( \frac{v_1 \tan \beta_2 - v_{2a} \tan \beta_1}{\tan \beta_1 \cdot \tan \beta_2} \right)$$

Afin d'approcher le rendement maximal de Betz nous avons intérêt à respecter  $v_{2a} = \frac{1}{3} v_1$ , et en égalant les formules obtenues selon la théorie de Betz et celle d'Ouler nous avons :

$$\rho S v_1 \cdot \left( \frac{v_1}{\tan \beta_1} \right) \left( \frac{v_1 \tan \beta_2 - v_{2a} \tan \beta_1}{\tan \beta_1 \cdot \tan \beta_2} \right) = \frac{16}{27} v_1^3 \cdot \rho \frac{S}{2}$$

$$\rho S v_1^3 \left[ \frac{\tan \beta_2 - (1/3) \tan \beta_1}{\tan^2 \beta_1 \cdot \tan \beta_2} \right] = \frac{16}{27} v_1^3 \cdot \rho \frac{S}{2}$$

et ainsi nous tirons une directive pour les dimensions : Pour approcher le plus possible le rendement de Betz il faut que :

$$\frac{\operatorname{tg} \beta_2 - (1/3) \operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_1^2 \operatorname{tg} \beta_2} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} = \frac{16}{54}$$

$$\Rightarrow \operatorname{tg} \beta_2 = \frac{18 \operatorname{tg} \beta_1}{54 - 16 \operatorname{tg}^2 \beta_1}$$

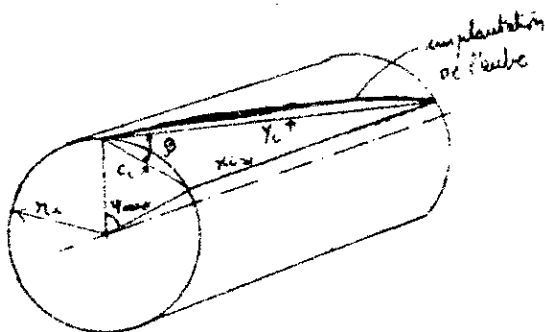
Cependant, malgré toutes les précautions d'ordre constructif, il y a toujours des pertes dues à la rotation du fluide en aval, aux intervalles entre les aubes, etc... C'est pour cela que le rendement par rapport au rendement maximum de Betz est de 0,4 à 0,85, en général. Le rendement ne peut être établi par calcul.

La référence n° 12 donne des abaques pour le calcul de dimensions des aubes et du rendement.

Détermination des dimensions et de la disposition d'une aube plane optimale :

En adoptant une éolienne de 1,5 m de rayon extérieur et de rayon intérieur de 0,5 m, avec 18 aubes planes réparties de 20 à 20° sur la roue qui d'occuper toute la surface exposée.

En tenant compte de la directive obtenue ci-dessus, nous devons incliner les aubes de 56° (car  $\beta_1 = \beta_2$ ).



$$x_i = r_i \cos(70^\circ + \varphi)$$

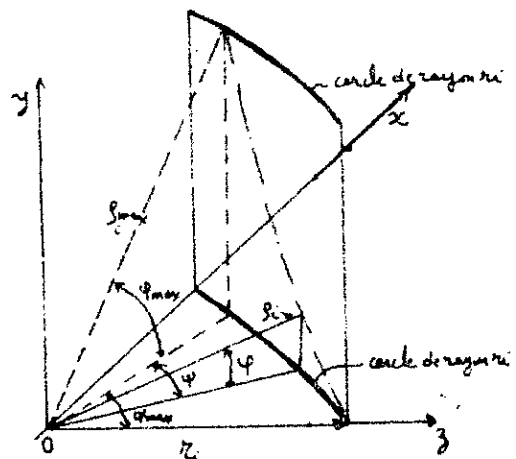
$$y_i = r_i \operatorname{tg} \varphi$$

$$z_i = r_i \sin(70^\circ + \varphi)$$

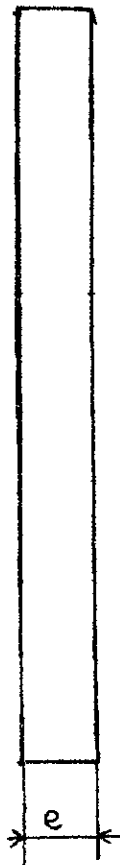
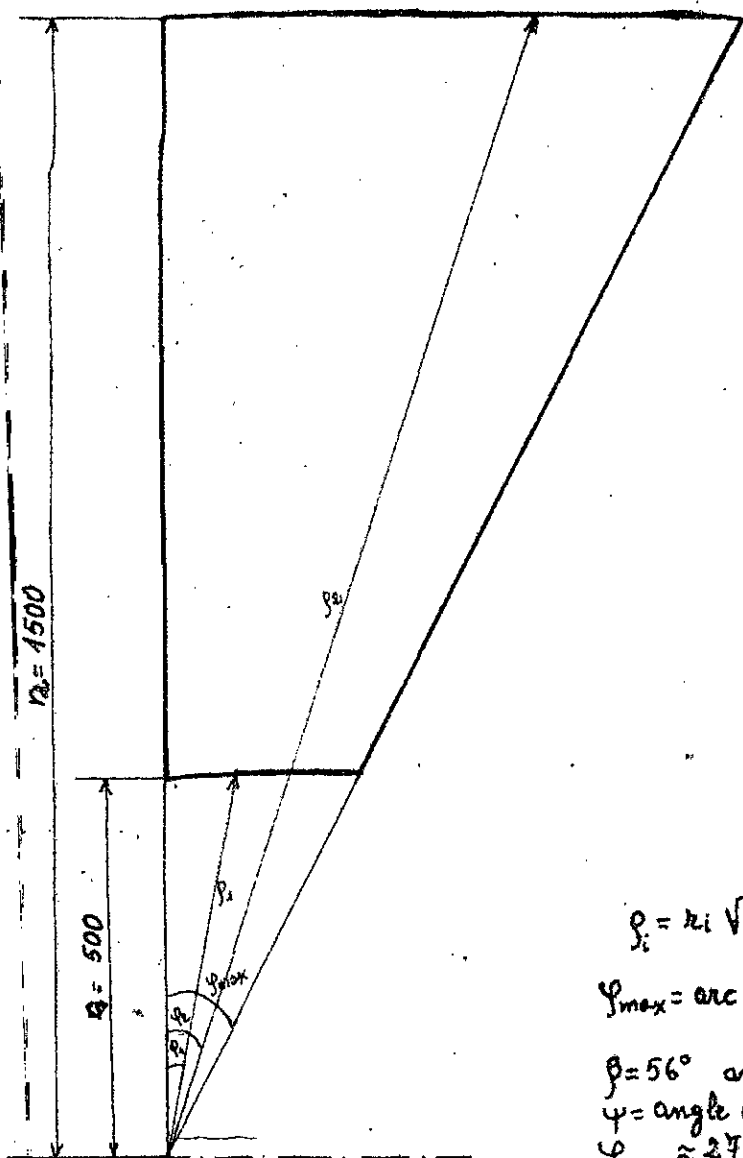
$$\Rightarrow \rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} = r_i \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}$$

$$\text{indice } i = \begin{cases} 1 & \text{rayon intérieur} \\ 2 & \text{rayon extérieur} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \beta &= 56^\circ \\ \varphi_{\text{moy}} &= 20^\circ \\ \text{Orde } c_i &= 2r_i \sin \frac{\varphi_{\text{max}}}{2} \\ x_i &= c_i \operatorname{tg} \beta \\ y_i &= c_i / \cos \beta \end{aligned}$$



Et en vertu de ces formules nous déterminons les dimensions principales de l'aube optimale dans le cas envisagé (voir dessin ci-après).



$$r_i = r_e \sqrt{1 + \tan^2 \psi}$$

$$\psi_{max} = \arctan \left[ 2 \sin \frac{\psi}{2} \tan \beta \right]$$

$\beta = 56^\circ$  angle d'attaque optimum pour ca. cas  
 $\psi =$  angle entre aubes  $\rightarrow$  (18 aubes  $\rightarrow \psi = 20^\circ$ )  
 $\psi_{max} \approx 27^\circ$

$e =$  épaisseur sera déterminée par le calcul de résistance

Dimensions principales d'une aube plane optimale.

Sur le dessin nous ne donnons pas le système de fixation de l'aube sur le diamètre intérieur, ni l'épaisseur. Nous laissons ceci à l'étude constructive. Les aubes doivent être fixées sur un cerceau extérieur pour éviter leurs vibrations.

Avec cette aube nous espérons approcher le rendement de Betz. Les essais ou une étude plus poussée, confirmeront ou annuleront ce que nous venons de développer.

La surface présentée au vent sera :

$$S = \pi [(1,5)^2 - (0,5)^2] \approx 6,28 \text{ m}^2$$

La puissance théorique (max de Betz) sera :

$$N_{th} = \frac{9}{2} S v^3 \cdot \frac{16}{27} = \frac{1,2}{2} \cdot 6,28 \cdot \frac{16}{27} v^3$$

$$N_{th} \approx 2,23 v^3$$

En espérant un rendement de 0,8 (par rapport au rendement maximal de Betz) nous aurons une puissance de :

$$N = 0,8 \cdot N_{th} = 1,784 v^3$$

Le tableau ci-dessous indique la variation de la puissance :

v (m/s)	N <sub>th</sub> [w]	N <sub>opt</sub> [w]
5	278,75	223
10	2230	1784
15	7526,25	6021
20	17840	14272

Donc la puissance est très variable. C'est pour cette raison que nous ne pouvons pas lier le ventilateur à l'éolienne par des moyens mécaniques.

Il existe deux (2) possibilités :

- Soit stocker cette énergie après transformation en énergie électrique dans des batteries d'accumulateurs au plomb.
- Soit d'en alimenter le réseau électrique du V.S.I en compensation de l'énergie consommée par le moteur électrique actionnant le ventilateur, et l'énergie consommée pour l'éclairage de l'installation.

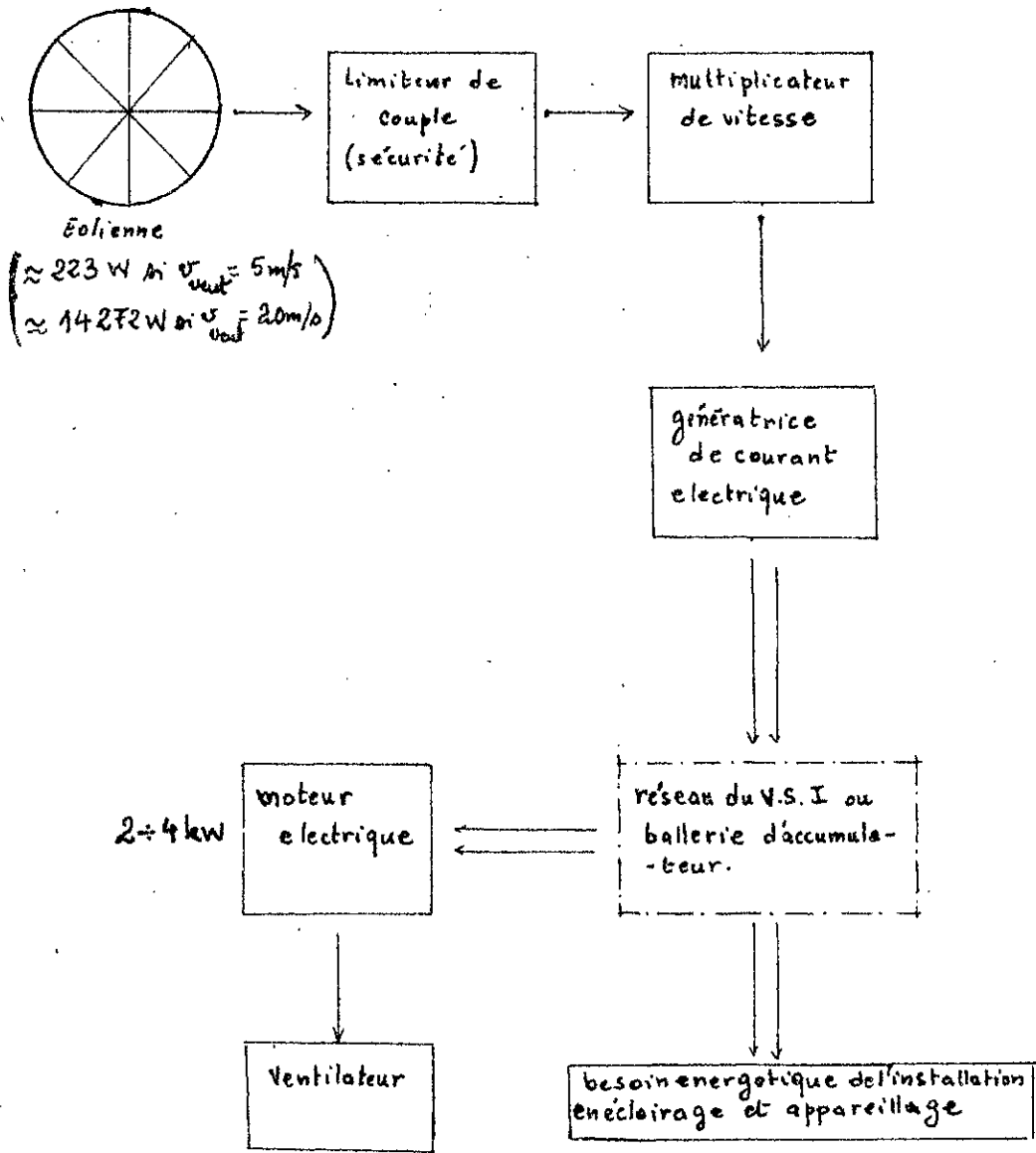


Schéma d'utilisation possible de l'énergie éolienne

## Chapitre VIII: CONTROLE ET REGULATION

Sous tout système où il y a une fluctuation de certains paramètres, la surveillance et le réglage est nécessaire.

En effet, dans le séchage solaire, on utilise l'air et le rayonnement solaire; les paramètres de ces derniers (température et degré hygrométrique de l'air, et intensité du rayonnement solaire) sont très variables aussi bien dans la journée qu'au cours des mois.

Nous avons envisagé une méthode, qui pourra être étudiée d'une manière minutieuse, ultérieurement; elle consiste à construire une surface de captage correspondant au minimum (acceptable) d'irradiation globale solaire et à une température minimale. Cette surface est munie de volets de réglage répartis à des intervalles réguliers. Ainsi on pourra mettre en "hibernation" une partie de la surface et n'utiliser que la partie nécessaire pour porter l'air à la température voulue (dans notre cas précis  $\approx 70^\circ\text{C}$ ). (voir dessin)

Il se fait que cette installation est expérimentale, cette méthode permettra des recherches très intéressantes.

On peut utiliser d'une manière approximative la formule déjà utilisée au chapitre II.

$$S = \frac{G_{a.s.} \cdot C_{p.a.s.}}{0,860 \cdot \eta_{\text{capt.}}} \left( \frac{T_0 - \theta}{\bar{G}} \right)$$

avec  $S = 6.l =$  surface de captage nécessaire

$G_{a.s.} = 6049 \text{ kg/h} =$  débit d'air sec (constant ou variable)

$C_{p.a.s.} = 0,24 \text{ kcal/kg. degre} =$  chaleur spécifique de l'air sec à pression constante (peu variable avec la température)

$\bar{G} =$  rayonnement global par tranche horaire ( $\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$ )

$\theta =$  température de l'air ambiant extérieur (variable)

$\eta_{\text{captureur}} = 0,67$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{supposé constant; mais si on le dit il ne peut être} \\ \text{constant, il dépend de la surface de captage, des} \\ \text{conditions atmosphériques. Sa variation ne peut} \\ \text{être établie qu'expérimentalement} \end{array} \right.$

$l =$  distance: sortie - entrée du fluide dans le capteur.

$6m =$  largeur du capteur

$T_0 =$  température de sortie de l'air du capteur

$0,860 \frac{\text{kcal}}{\text{Wh}} :$  facteur de conversion des Wh en kcal.

On peut aussi utiliser la formule suivante qui tient compte, non pas de la tranche horaire mais, de l'instant donné  $t$ .

$$l \approx \frac{3600}{6 \times 0,860} \cdot \frac{G_{a.s.}(t) \cdot C_{p.a.s.}}{\eta_{\text{capt}}} \left( \frac{T_0 - \theta(t)}{g(t)} \right)$$

et avec la hypothèse:

$C_{p.a.s.} = 0,24 \text{ kcal/kg. degre}$  (Constant)

$$\eta_{\text{capt}} = 0,67 \text{ (constant)}$$

$$g_{\text{as}}(t) = 1,68 \text{ kg/s (constant)}$$

$$l \approx 420 \frac{(70 - \theta(t))}{g(t)}$$

donc il suffit de connaître

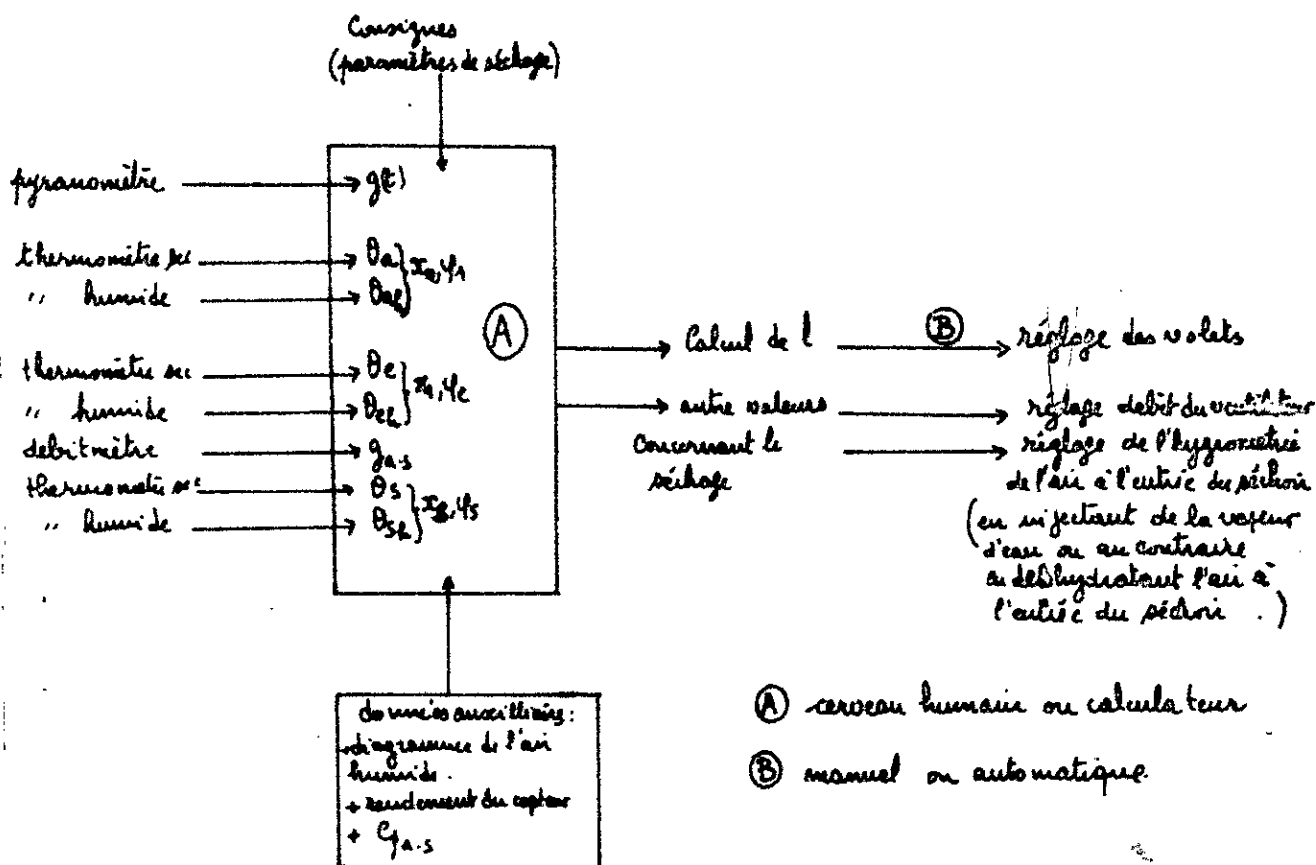
$\theta(t)$  : température de l'air ambiant en °C mesurée par un thermomètre sec.

$g(t)$  : irradiation globale à l'instant  $t$ , en  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  mesurée par un pyranomètre.

Une fois  $l$  calculé, on ouvre l'entrée de dessous à cette distance, tout en fermant l'entrée latérale à ce compartiment (voir schéma). Ces deux opérations se font simultanément à l'aide du volet (manuellement ou par un système automatique).

La seule valeur qu'on règle avec ce procédé est la température de l'air. Ce n'est là qu'une idée première qui peut faire l'objet d'une étude plus poussée.

Pour tenir compte des différents paramètres de séchage, le schéma suivant peut être étudié. Il illustre les actions à faire.

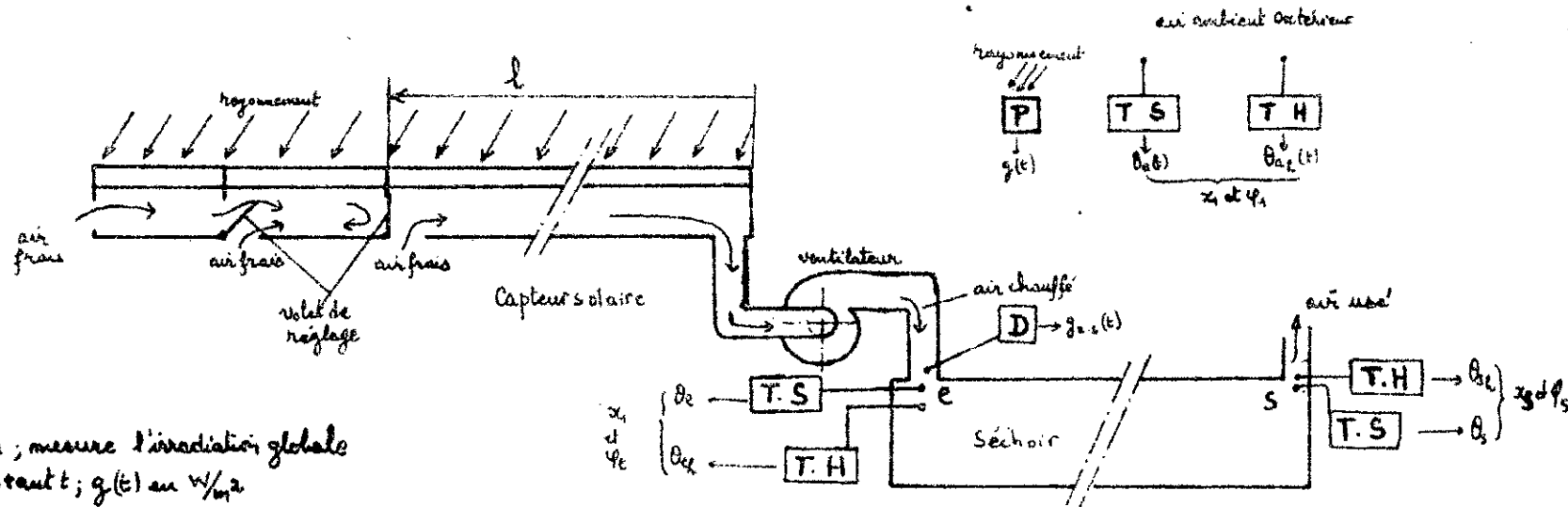


Les appareils de mesures nécessaires sont:

- 1 pyranomètre
  - 3 thermomètres sec
  - 3 thermomètres humides } psychromètres
  - 1 débit-mètre.
-



- Schéma de réglage et appareils de mesure -

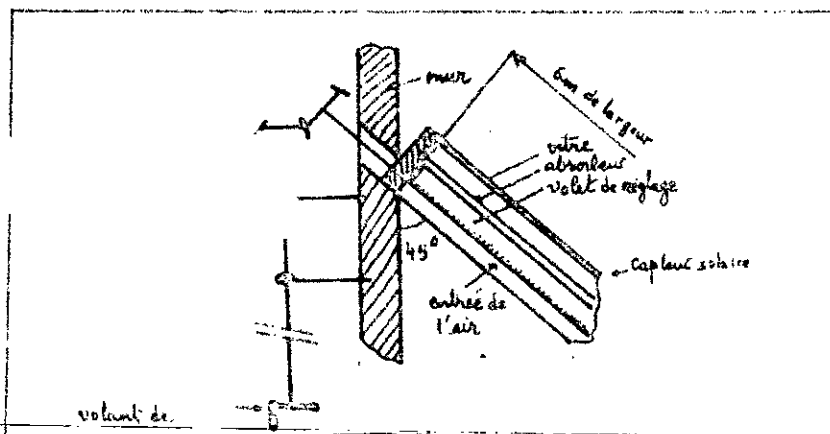


**P** : pyromètre ; mesure l'irradiation globale à l'instant  $t$  ;  $g(t)$  en  $W/m^2$

**T.S** : thermomètre sec ;

**T.H** : thermomètre humide ;

**D** : débit-mètre d'air dans le séchoir.



## CONCLUSION.

L'étude que nous venons de faire n'est qu'une première approche du problème; l'objectif essentiel était de trouver une solution technique en matière d'utilisation de l'énergie solaire dans le séchage industriel.

L'étude des différentes questions inhérentes n'a été qu'approximative et nous n'avons dégagé que les grandes lignes de projet. Ainsi:

a) pour le ventilateur, nous n'avons fait aucun choix impératif. La seule chose qui nous importe est qu'il puisse assurer le débit d'air nécessaire au séchage et qu'il puisse aussi vaincre la résistance au mouvement de l'air (pertes de charges). Il serait intéressant d'entreprendre son étude détaillée (notamment constructive) avec si possible d'assurer une large diaposon de débit.

b) pour le capteur plan solaire, nous avons pris, pour simplifier les calculs, un système basé sur un vitrage simple standard (verre à vitre) et un absorbeur standard (une tôle noircie à la peinture).

Dans la construction de ce capteur nous avons tenu compte des exigences suivantes:

- assurer le calorifugeage,
- assurer l'étanchéité (contre la pluie et contre les fuites d'air)
- assurer l'entretien simple (casse possible de vitre, détérioration de la peinture),
- assurer le réglage
- tenir compte des problèmes de dilatation (à cause de la construction en un seul bloc, sur site).
- assurer la rigidité du système.

Il est possible de poursuivre son étude et d'apporter les améliorations suivantes:

- + utilisation de surfaces sélectives
- + utilisation d'un vitrage double (dans la partie terminale)
- + utilisation d'une tôle munie d'ailettes du côté du passage de l'air.

c) pour l'énergie éolienne nous n'avons fait qu'aborder le problème et démontrer certaines formules permettant de dégager des directives constructives et les voies d'utilisation possibles. Là aussi, une étude plus approfondie peut être entreprise, notamment sur le plan constructif. La réalisation de cette éolienne permettra de vérifier les développements théoriques établis.

d) pour le système de réglage, nous avons dégagé les voies possibles. Nous avons adopté un système de réglage de la température en intervenant sur le capteur à surface variable. Nous avons donné le schéma de réglage des différents paramètres, mais nous nous sommes limités à dégager les grandes lignes d'intervention. Une étude plus poussée peut

être entreprise pour procéder à une automatisation du système.

e) avec une documentation météorologique assez riche, une optimisation du système peut être étudiée. Cette question n'a pu être abordée et les paramètres pris pour le dimensionnement ne sont qu'arbitraires par manque de cette documentation.

De toute façon, l'unité industrielle en question est expérimentale. Sa réalisation permettra des recherches intéressantes, en plus de l'aspect productif.

Ces recherches se feront aussi bien dans le domaine du séchage, qui reste encore un vaste champ d'investigations scientifiques (voir chapitre I), que dans le domaine de l'énergie solaire. Nous pourrions même dire que, du fait que l'exploitation de l'unité nécessite des prises de mesures météorologiques (température et hygrométrie de l'air, ensoleillement) régulières, cette unité permettra ainsi de contribuer à l'étude du climat de la région.

# ANNEXE 1

## FORMULATION MATHÉMATIQUE DES ISOTHERMES DE SORPTION

References	Equation
LANGMUIR (1916, 1918)	$X = \frac{k_1 \cdot k_2 \phi}{1 + k_2 \phi} ; k_1, k_2 \text{ constants}$
BRUNAUER, EMMET and TELLER (BET) (1938)	$\frac{\phi}{X(1-\phi)} = \frac{1}{X_m \cdot C} + \frac{C-1}{X_m \cdot C} \phi$ $X_m \text{ and } C \text{ constants}$
ROUNSELY (1961)	$\frac{\phi(1-\phi^q)}{X(1-\phi)} = \frac{1}{B_1 \cdot C} + \frac{C-1}{B_1 \cdot C} \phi$ $q, B_1, C : \text{constants}$
HARKINS and JURA (1947)	$\ln \phi = D - \frac{C_1}{X^2} ; D \text{ and } C_1 : \text{constants}$
HENDERSON (1952)	$-\ln(1-\phi) = k T_R (100 X)^n ; k \text{ and } n \text{ constants}$ $T_R = \text{temperature } ^\circ R \text{ (} ^\circ \text{Roumkine} = ^\circ \text{Fahrenheit)}$ $\text{---heit absolute}$
KUHN (1964)	$X = k \frac{1}{(-\ln \phi)^\gamma} - B_2 ; k, \gamma, B_2 : \text{constants}$
HALSEY (1948)	$\ln \phi = -\frac{a_1}{RT} \left( \frac{X}{X_m} \right)^{r_1} ; a_1, X_m, r_1 : \text{constants}$
FILONENKO and CHUPRIN (1967)	$X_I = \frac{a_2 + \phi}{k} ; X_{II} = \frac{B \cdot \Delta \phi}{b - \Delta \phi} + X_l$ $a_2, k, B, X_l : \text{constants}$

Source: AICRE Journal . Vol 24. n°6 mois 1968  
(bibliothèque des périodiques ENPA)

# ANNEXE 2

## RELEVÉS MÉTÉOROLOGIQUES

(Source : référence n° 16)

### I: temperature: (BOU-SAADDA)

periode des mesures: 1919-1937

- m = moyenne de tous les minima
- M = " " " les maxima
- m' = " suite de minima mensuels extrêmes
- M' = " " " maxima " "
- m'' = minimum absolu observé
- M'' = maximum " "
- $\frac{M+m}{2}$  = moyenne mensuelle.

mois	m''	m'	m	$\frac{M+m}{2}$	M	M'	M''
Janvier	-1,8	0,0	3,7	8,45	13,2	19,3	23,5
Février	0,0	1,5	5,6	10,85	16,1	22,4	23,4
Mars	0,0	2,0	7,0	12,70	18,4	26,6	31,5
Avril	3,2	4,9	9,9	16,25	22,6	30,3	30,6
Mai	5,8	7,1	13,1	20,35	27,6	34,1	35,6
Juin	11,0	11,9	17,5	24,95	32,4	38,6	41,0
Juillet	15,0	15,9	21,1	29,10	37,1	41,7	43,5
Août	13,0	14,7	20,0	27,75	35,5	39,8	40,9
Septembre	8,4	9,9	17,3	23,60	29,9	36,0	38,0
Octobre	4,0	9,9	17,3	23,60	22,9	27,5	31,9
Novembre	1,0	2,4	7,9	12,40	16,9	24,8	29,3
Décembre	-0,9	-0,1	4,7	8,95	13,2	18,9	24,2
Année	-1,8	6,4	11,6	17,70	23,8	30,0	43,5
Date des extrêmes	12/1 1937						19/7 1921

### II. Hygrométrie:

A défaut de données sur BOU-SAADDA, nous donnons celles de KSAR CHELLALA (ex-Reibell) qui se trouve dans la même zone climatique (Hautes plaines steppiennes).

KSAR CHELLALA:

Latitude: 35°12' N, Longitude: 2°15' E, Altitude: 860m

Période des mesures 1913 - 1934

t = température du thermomètre sec  
 t' = température " " humide  
 t-t' = différence psychrométrique  
 E = tension de vapeur d'eau  
 H(%) = degré hygrométrique

Mois ↓	7 h				13 h				18 h			
	t	t-t'	f	H%	t	t-t'	f	H%	t	t-t'	f	H%
Janvier	4,5	1,3	5,1	80	10,0	2,7	6,1	66	6,5	1,4	5,8	80
Février	5,7	1,4	5,5	80	12,0	3,0	6,9	65	8,7	2,2	6,0	71
Mars	7,9	2,1	5,8	72	15,5	5,0	6,7	50	11,5	3,4	6,3	61
Avril	10,3	1,9	7,2	77	20,7	7,8	6,9	37	13,4	3,6	7,1	61
Mai	15,0	3,5	8,3	65	24,1	7,1	10,4	47	18,0	4,3	9,4	60
Juin	20,0	4,5	10,7	61	27,2	8,8	10,9	40	21,7	5,7	10,4	53
Juillet	23,0	6,1	11,0	52	31,7	11,3	11,4	33	27,7	9,0	11,1	39
Août	24,3	7,0	10,8	47	31,8	11,2	11,9	34	28,3	9,9	10,4	36
Septembre	18,6	4,0	10,2	63	27,8	8,9	11,4	40	22,5	6,2	10,4	54
Octobre	13,3	2,4	8,4	73	21,7	5,8	10,3	53	16,1	3,4	9,2	67
Novembre	8,3	2,4	6,7	81	15,1	3,6	8,2	63	10,0	1,6	7,4	80
Décembre	4,6	1,1	5,3	84	10,4	3,0	6,0	64	7,7	1,8	6,0	75
Année	13,0	3,1	7,9	70	20,6	6,5	8,9	49	16,0	4,4	8,3	61

## ANNEXE 3

### OPERATIONS PRECEDANT LE SECHAGE

Le séchage industriel est précédé de certaines opérations dont :

- le nettoyage et le lavage
- le triage par grosseur et par couleur
- le parage
- le pelage, le découpage, le dénoyautage, etc..., selon le fruit ou légume traité.

- le blanchiment : Parmi le but de cette opération il ya l'accroissement de la perméabilité des parois cellulaires, ce qui augmente la vitesse de séchage et facilite la réhydratation ultérieure.

Cette opération s'effectue, selon le fruit ou légume traité, par :

- + trempage dans l'eau chaude ou dans une solution sodique, dans une solution de bisulfite, ou autre solution.
- + mise sous atmosphère de vapeur d'eau, d'anhydride sulfureux gazeux (soufrage), de gaz carbonique, d'oxyde d'éthylène, etc...

C'est pour cela que dans l'installation de séchage nous prévoyons un laboratoire et une zone réservée à ces opérations.

Pour plus de précision sur ces opérations nous recommandant les documents référencés n° 03, 04 et 05, dans la bibliographie.

## BIBLIOGRAPHIE

Reference

- 01..... "de séchage" par F. KNEULE ; Ed. EYROLLES - Paris 1964; côte ENPA: 66.047 KNE
- 02..... "СУШИЛНА ТЕХНИКА" Я. БАКЕРДЖИЕВ СОФИЯ. 1973  
 Д. ДИМИТРОВ  
 ("Technique du séchage" par Y. BAKERDJIEV et D. DIMITROV, Sofia 1973 (non traduit).
- 03..... "Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments", volume 1 et 2  
 par: CHEFFTEL, CHEFFTEL, BESANÇON; côte biblio. Dpt. Technologie. INA: 581.83/nets
- 04..... "La conservation industrielle des légumes" par P. LÉRAILLÉZ  
 côte biblio. Dpt. Techno. INA: 506.50
- 05..... "La conservation industrielle des fruits" par P. LÉRAILLÉZ  
 côte biblio. Dpt. Techno. INA: 482.48
- 06..... "de séchage dans les industries agro-industrielles (aspects énergétiques)  
 côte biblio. Dpt. Techno. INA: 396.32 /2890
- 07..... "Perspectives agricoles" n°3, Mars 1977, revue de l'IFTC (document personnel)
- 08..... "Manuel de séchage du bois" par A. VILLIÈRE, Brochure technique n°4 (3<sup>ème</sup> édition  
 1953). (document personnel).
- 09..... "Chaleur et thermodynamique" t. II par C. CHAUSSIN, G. AILLY, J. BARRALIS  
 ENAM/EE ; Édition DUNOD 1969. (document personnel).
- 10..... "Thermique générale" Édition de Moscou, 1969. (Traduit). (document personnel).
- 11..... "Traité de chauffage et de climatisation" 2 tomes + planches  
 par H. RIETSCHEL, W. RAISS, Édition DUNOD 1979. (doc. personnel).
- 12..... "Hütte I, II, III, encyclopédie". côte Biblio. périodiques ENPA: 62 Hut /tI/tII/tIII.
- 13..... "La conversion des énergies" de Régis DAVIS, collection "Que Sais-Je?" n°1205 PUF.
- 14..... "Séminaire National sur l'énergie solaire" oct. 1975, O.N.R.S (doc. personnel).
- 15..... "L'énergie solaire; de la recherche appliquée aux utilisations pratiques. Perspectives  
 d'avenir." Actualités documents. oct 1977. (document personnel).
- 16..... "Le climat en Algérie" par SELTEER (1946); côte Dpt. Géographie ENPA: RAN 611.A.
- 17..... "Rayonnement transmis et capteurs plans" par M. CAPDEROU (doc. V.S.I. CRAU. EPAU)
- 18..... "Estimations de l'énergie solaire disponible en Algérie" par D. JACOBS et H. LOTZ  
 (document V.S.I. CRAU. EPAU).
- 19..... "Les besoins en données météorologiques dans le développement de l'utilisation  
 de l'énergie solaire à basse température dans l'habitat en Algérie".  
 (document V.S.I. CRAU. EPAU).
- 20..... "L'énergie solaire dans le bâtiment" par Ch. CHAULIQUET, Édition EYROLLES -  
 Paris 1978. côte biblio. ENPA: 620.97 CHA.
- 21..... AICHE Journal, vol. 24. n°6. nov 1968 (biblio. périodiques. ENPA)
- 22..... "Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires", par J.J. BIMBENET, Cahiers  
 du Génie Industriel alimentaire. Centre de perfectionnement des industries chimiques  
 bâtiment ENSIC, Rue Déglin. 54042 NANCY. CODEX. (doc. personnel).
- 23..... "Transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux" par M. COMBARNOUS  
 idem que 22.
- 24..... "Heat and mass transfer" par LUIKOV, Éditions de Moscou. (doc. personnel).



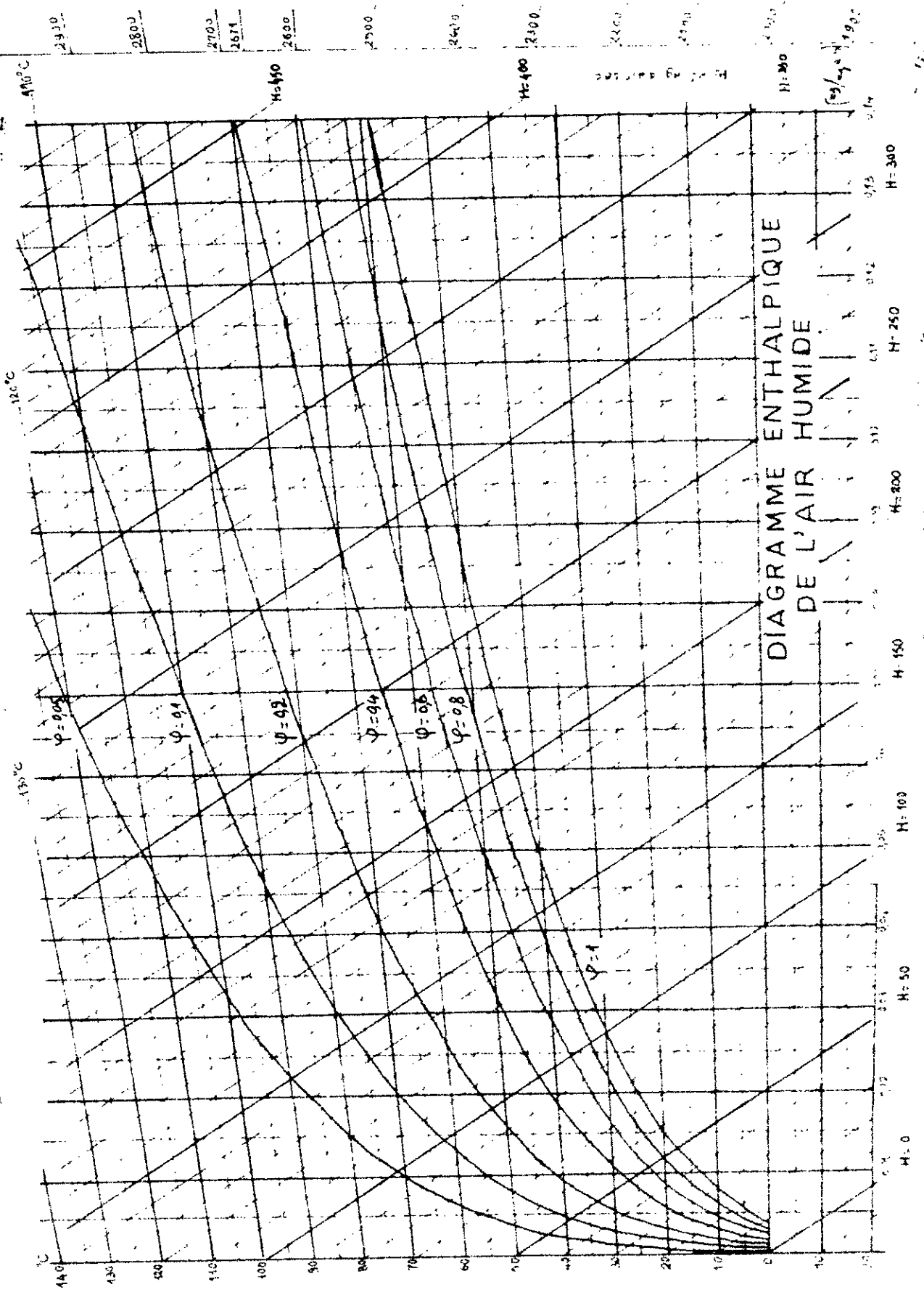


DIAGRAMME ENTHALPIQUE DE L'AIR HUMIDE

