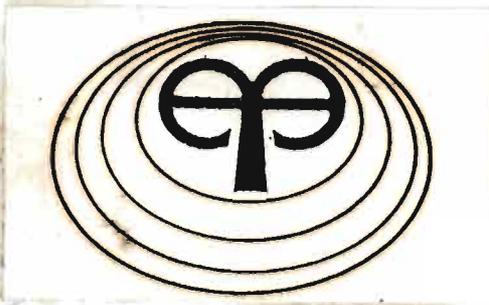


REPUBLIQUE DU SENEGAL
MINISTERE DES FORCES ARMEES

ANNEE ACADEMIQUE
1984 - 1985

**ECOLE
POLYTECHNIQUE DE THIES**



Gm.0280

PROJET DE FIN D'ETUDE

PRÉSENTÉ PUBLIQUEMENT LE.....JUN 1985

EN VUE D'OBTENIR LE GRADE D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION
EN GÉNIE MÉCANIQUE

SUJET : ETUDE D'UN SECHOIR SOLAIRE ASSISTE PAR
UN FOYER "BAN AK SUUF"

AUTEUR: ADAMA ERIC SAWADOGO

JURY : MONSIEUR ANDRÉ WOLSKI
PROFESSEUR, CHEF DU DÉPARTEMENT DU GÉNIE MÉCANIQUE
DIRECTEUR DE PROJET

MONSIEUR _____
PROFESSEUR, MEMBRE

MONSIEUR _____
PROFESSEUR, MEMBRE

J E

D E D I E

C E

M O D E S T E

T R A V A I L

AU PEUPLE BURKINABE

Tu as consenti des sacrifices pour assurer mon éducation ;
je suis prêt à te servir.

AU PEUPLE SENEGALAIS

Tu m'as adopté et j'ai apprécié ta " Téranga ".

AU PEUPLE CANADIEN

Merci pour la bourse que tu m'as accordée ;
Vive l'amitié entre les Peuples.

A MES PARENTS

Voici le fruit de vos encouragements et de vos conseils.

A MA FIANCEE

Ton soutien ne m'a pas fait défaut ; ce travail est aussi
le tien, Yassi.

A TOUS LES INGENIEURS DIGNES DE L'ETHIQUE DE LEUR CORPS.

AVANT - P R O P O S

Dans plusieurs pays dont le Sénégal et le Burkina on utilise encore largement les rayons du soleil comme source directe d'énergie pour sécher et déshydrater les produits alimentaires.

Le coût des combustibles fossiles s'avèrant élevé le séchage solaire direct ou indirect prendra de plus en plus d'importance dans le monde comme procédé de conservation des aliments.

Malheureusement le soleil n'est pas toujours au rendez-vous ou s'il l'est son rayonnement est très faible à certains moments de l'année alors que le besoin de séchage est continu.

Dans ce rapport nous avons entrepris la conception, la réalisation et l'étude d'un prototype de séchoir solaire simple et économique pour des produits alimentaires, pouvant fonctionner efficacement à tout moment grâce à l'assistance d'un foyer amélioré de type "ban ak suuf".

R E M E R C I E M E N T S

Ce rapport me donne l'occasion de remercier tout particulièrement le Professeur André Wolski, Chef du département de génie mécanique qui a bien voulu être mon Directeur de projet et surtout pour m'avoir guidé de façon continue par ses conseils et ses documents.

A monsieur Félix Tiga Yaméogo, Directeur de l'I.B.E.[•] j'adresse mes remerciements pour m'avoir permis de passer quelques jours dans l'Institut et de prendre goût à la recherche sur les énergies renouvelables.

C'est à messieurs Larbat Théophile Garango et Thombiano Godefroy chargés de recherche à l'I.B.E. et à monsieur Mohamadou Seck, chargé de recherche au C.E.R.E.R.[•] que je dois des données indispensables à l'accomplissement de ce travail ; qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Avec les Professeurs Adrian Cernea, Thomas Aquin, Jan Drozd j'ai eu des discussions très fructueuses ; qu'ils en soient remerciés.

Je remercie tout le personnel du casernement de l'Ecole et de l'atelier de mécanique en particulier messieurs Yvon Bugeas, et Moussa Pouye pour leur concours très précieux dans la construction du séchoir.

Enfin à madame Suzanne Young Tisseira, Je dis merci pour l'attention toute particulière apportée à la dactylographie de ce rapport.

• I.B.E. : Institut Burkinabé de l'Energie

• C.E.R.E.R. : Centre d'Etude et de Recherche sur les Energies Renouvelables.

TABLE DES MATIERES

	<u>PAGES</u>
<u>PRÉLIMINAIRES :</u>	
. Avant-propos.....	i
. Remerciements.....	ii
 <u>INTRODUCTION :</u>	 1
 <u>CHAPITRE I : PRINCIPES DE TRANSFERT DE CHALEUR ET DE MASSE</u> <u>APPLIQUÉS AU SÉCHAGE</u>	
I.1 - Définition.....	3
I.2 - Equation de l'extraction de l'air humide dans le séchage.....	4
I.3 - Equation de la transmission de chaleur dans le séchage.....	5
 <u>CHAPITRE II : DESIGN DU SÉCHOIR</u>	
II.1 - Objectifs et critères du désign.....	8
II.2 - Matériaux utilisés.....	10
II.3 - Calcul de la consommation thermique du séchoir.....	13
II.4 - Calcul de la surface de plexiglas.....	17
II.5 - Calcul des cheminées.....	21
II.6 - Dimensionnement de l'armoire de séchage.....	24
II.7 - Calcul de la quantité de chaleur transmise à l'air de séchage par le conduit de fumée et la quantité de combustible.....	24
II.8 - Le support de l'armoire de séchage.....	33
II.9 - Facteur de sécurité au renversement.....	40
II.10- Quelques détails de construction.....	42

CHAPITRE III : EXPÉRIMENTATION

III.1 - Les essais à vide.....	46
III.2 - Essais de séchage de produits.....	52
III.3 - Conclusion.....	70

CHAPITRE IV : ÉTUDE SOCIO-ÉCONOMIQUE

IV.1 - Implications sociologiques.....	72
IV.2 - Implications économiques.....	74

<u>CONCLUSION</u>	79
-------------------------	----

<u>ANNEXE</u>	82
---------------------	----

<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	92
----------------------------	----



I N T R O D U C T I O N

L'utilisation de l'énergie thermique du soleil pour le séchage des récoltes est une pratique vieille de plusieurs siècles dans le monde entier : ceci s'explique par le fait que les produits sont récoltés à une période de l'année tandis que la consommation s'étale sur toute l'année. Il est de coutume d'étaler les récoltes en plein air, au soleil, soit à même le sol soit sur des plates-formes surélevées ; les récoltes et les denrées que l'on expose le plus souvent au séchage en plein air comprennent, les épices, le tabac, le café etc...

C'est un procédé peu coûteux mais présentant plusieurs inconvénients parmi lesquels il faut souligner :

- le caractère intermittent de l'ensoleillement tant pendant la journée qu'aux différentes époques de l'année ;
- les risques de contamination par la poussière et les rongeurs ;
- l'infestation par les insectes ;
- les pertes et dégâts causés par la volaille.

La qualité des produits séchés est souvent satisfaisante mais est susceptible d'améliorations.

Il est possible de disposer d'installations perfectionnées qui donneront un produit séché de très bonne qualité mais leur prix est élevé et la plupart utilisent l'énergie électrique ou un combustible fossile comme le pétrole ou le gaz pour produire la chaleur nécessaire.

Plusieurs pays en développement n'ont pas d'électricité dans les campagnes et les combustibles fossiles doivent être importés. Des progrès dans ce sens paraissent donc peu réalisables à l'heure actuelle ; les améliorations devraient alors provenir de diverses modifications aux procédés actuels ou de recours à des systèmes de séchage mieux adaptés.

Dans les pages qui vont suivre il s'agira de concevoir, et d'expérimenter un séchoir qui soit opérationnel quel que soit le degré d'ensoleillement et pouvant remédier aux désavantages ci-dessus mentionnés. - 1 -

d'ensoleillement et pouvant remédier aux désavantages ci-dessus mentionnés.

La première partie traite de l'application des principes de transmission de chaleur et d'extraction de l'humidité dans le processus de séchage.

La deuxième partie présente le design du séchoir.

La troisième partie rapporte l'étude expérimentale réalisée sur le séchoir.

La quatrième partie au vue des résultats expérimentaux, montre par des implications socio-économiques l'intérêt de poursuivre les travaux sur le séchoir solaire assisté par un foyer "ban ak suuf".

CHAPITRE I

PRINCIPES DE TRANSFERT DE CHALEUR ET DE MASSE
APPLIQUES AU PROCESSUS DE SECHAGE

Dans cette partie nous montrons l'application des lois de transfert de chaleur et de masse dans le séchage par convection ; par soucis de clarté nous considérons le séchage de grains, étant entendu que le principe est le même pour les autres produits.

I.1 - Définitions

Le séchage est défini comme étant le procédé qui permet d'extraire d'un produit l'excès d'humidité qui s'y trouve. Cette extraction, totale ou partielle s'appelle déshydratation. Pour comprendre ce qu'est le séchage du grain il faut d'abord connaître la composition et la nature de ce dernier ainsi que celles du médium classique qui intervient dans ce processus de déshumidification et qui n'est autre que l'air atmosphérique.

I.1.1 - Composition de l'air atmosphérique

L'atmosphère ambiante dans laquelle se trouve ordinairement le grain à un moment donné est un mélange d'air sec (celui-ci à son tour est un composé d'oxygène 20,95 %, d'azote 78,09 %, d'acide carbonique 0,03 % et d'argon 0,93 %) et de vapeur d'eau d'où le terme d'air humide.

La quantité de vapeur d'eau par unité de poids d'air sec est appelé taux d'humidité ou humidité absolue. La vapeur d'eau de l'air exerce une certaine pression qui dépend de sa quantité conformément à la loi des mélanges de Dalton. Le rapport entre la pression effective de la vapeur de l'air et la pression de saturation (état dans lequel l'air contient le maximum possible d'humidité) est appelé humidité relative.

I.1.2 - Composition et nature du grain

Les grains de céréales sont composés de matières sèches (amidon surtout) et d'humidité. A la moisson, ces grains ont normalement un excès d'humidité qui s'oppose à leur bonne conservation ou les rend impropres à la mouture.

La teneur en humidité (T.H) du grain s'exprime généralement en pourcentage du contenu humide soit sur base sèche soit sur base humide.

Le grain de céréale est par nature hygroscopique, c'est-à-dire qu'il peut absorber ou perdre de l'humidité selon les conditions de son environnement. Le déplacement de l'humidité pénétrant dans le grain ou en sortant est fonction de la différence de pression existant entre la vapeur contenue dans le grain et celle de l'air ambiant.

Si la pression de la vapeur dans le grain dépasse la pression de l'air ambiant le déplacement de l'humidité s'effectuera du grain à l'air et produira ainsi le séchage.

De la même façon si c'est la pression de la vapeur dans l'air qui est plus forte que celle dans le produit le déplacement de l'humidité se fera de l'air au grain.

I.2 - Equation de l'extraction de l'air humide dans le séchage (2)

Le déplacement par diffusion dans la masse du grain est semblable à la conduction de la chaleur dans un solide et l'équation suivante s'applique

$$(1) \quad \frac{\delta G}{\delta \theta} = -Dv \rho A \left(\frac{\delta TH}{\delta X} \right)$$

dans laquelle :

G = la quantité d'humidité (kg)

θ = le temps (heures)

Dv = diffusivité dans la masse (m^2 /heures)

ρ = densité du solide à sec (kg/m^3)

A = surface (m^2)

TH = teneur en humidité en décimales (kg/kg)

X = la distance à partir du centre de la masse en voie de séchage. (m)

A la surface du grain le déplacement de l'humidité est fonction du gradient de concentration de l'humidité de l'air de séchage et la surface du produit et l'équation suivante s'applique :

$$(2) \quad - Dv \rho \left(\frac{\delta TH}{\delta X} \right) = S. \rho (TH_s - TH_e)$$

$$(3) \quad \left(\frac{\delta TH}{\delta X} \right) = D_v \left(-\frac{\delta^2 TH}{X^2} \right)$$

dans laquelle :

S = la conductance en surface (m/heure)

TH_s = teneur en humidité à la surface (% base sèche)

TH_c = teneur en humidité d'équilibre à l'humidité relative de l'air de séchage (% base sèche).

La résolution des équations (1) et (3) établit un rapport indiquant la variation du contenu humide en fonction du temps et de la géométrie du produit.

I.3 - Equation de la transmission de chaleur dans le séchage

De façon générale le processus de séchage comporte quatre mouvements circulatoires distincts de la chaleur entre le grain et son environnement :

- chaleur latente en vertu de l'évaporation de l'humidité (qL)
- chaleur sensible due au déplacement par convection (qc)
- chaleur sensible due au déplacement par radiation (qr)
- chaleur sensible due au déplacement par conduction (qu)

$$qL = qc + qr + qu$$

Le bilan calorifique établi à une unité de surface du grain donne l'équation :

$$hd (W_s - W) h_{fg} = h_c (t - t_s) + h_r (t_r - t_s) + U(t_o - t_s)$$

dans laquelle

W_s = taux d'humidité de l'air saturé à la surface du grain ;

W = taux d'humidité de l'air de séchage ;

- t = température de l'air de séchage ;
 t_s = température de surface du grain ;
 t_r = température de la surface environnante ;
 t_o = température du support (voir figure) ;
 h_c = coefficient de transmission de la chaleur par convection ;
 h_d = coefficient de déplacement dans la masse.
 h_r = coefficient de transmission de la chaleur par radiation ;
 U = coefficient de transmission globale de la chaleur du support ;
 h_{fg} = chaleur latente de vaporisation de l'eau à t_s .

Dans le séchage par convection les effets de la radiation et de la conduction sont négligeables et l'équation devient :

$$(W_s - W) h_{fg} = \left(\frac{h_c}{h_d C_p} \right) C_p (t - t_s) = L_e C_p (t - t_s)$$

L_e = nombre de Lewis.

L'application des lois fondamentales de la transmission de la chaleur et de l'évacuation de l'humidité à un système de séchage en couche épaisse conduit cependant à une série d'équations différentielles assez compliquées.

Des programmes de simulation permettent d'atteindre une solution à l'aide d'ordinateurs. Des programmes de cette nature ont été mis au point par la Michigan State University pour le séchage du maïs, le Kansas State University pour le maïs et le riz.

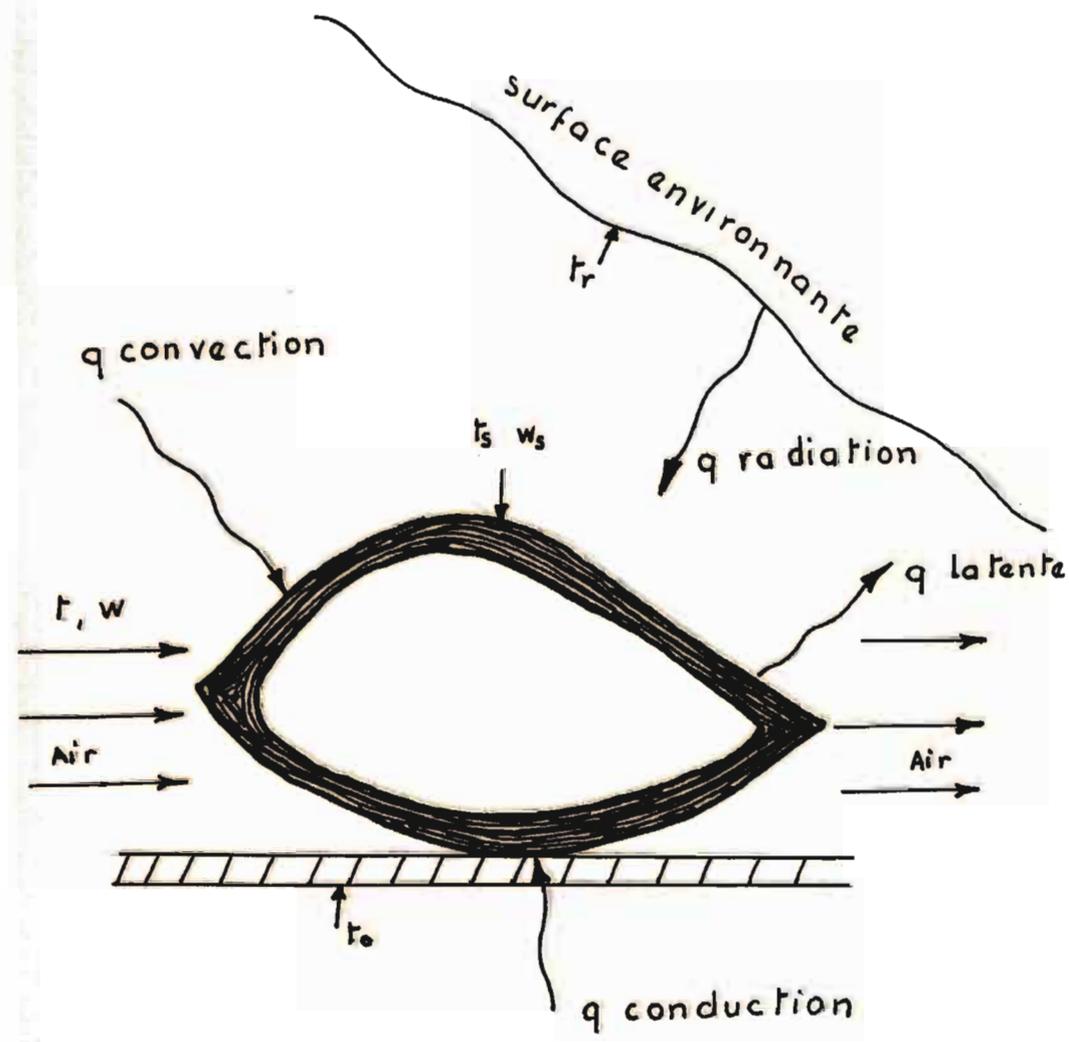


SCHÉMA DU DÉPLACEMENT DE CHALEUR
ENTRE LE GRAIN ET SON ENVIRONNEMENT

CHAPITRE II

DESIGN DU SÉCHOIR

II.1 - Objectifs et critères de design

II.1.1 - Objectifs

La performance d'un séchoir variera avec l'attention apportée à sa conception, à sa fabrication et à son fonctionnement. Un système de séchage bien conçu et un autre assemblé sans souci majeur des principes de thermodynamique, de la mécanique des fluides, des propriétés du produit et de son environnement auront des performances différentes.

De ce point de vue les objectifs poursuivis sont les suivants :

a) Objectifs généraux :

- . la qualité du produit doit être préservée ;
- . le lot de produit entier doit subir un séchage uniforme ;
- . le séchage doit s'effectuer assez rapidement pour éviter la germination où la formation de moisissures ;
- . le séchoir doit être robuste et pouvoir être déplacé au besoin ;
- . le séchoir doit pouvoir être relié à la cheminée d'un foyer de type "Ban ak suuf".

b) Objectif de fonctionnement :

L'air ambiant doit être préchauffé dans un capteur par convection naturelle sur les parois d'un absorbeur ; l'air pénètre ensuite dans une armoire de séchage où les produits à sécher sont disposés sur des claies étagées.

Au contact avec le produit l'air chaud se refroidit en cédant des calories au produit. Cette chaleur va servir à vaporiser l'eau que contient le produit ; la vapeur d'eau ainsi formée passe dans l'air qui est évacué hors du séchoir par une cheminée.

Le chauffage de l'absorbeur se fait de deux manières :

- L'absorbeur absorbe la lumière solaire à travers une surface transparente et rayonne.
- Un conduit canalise des gaz de combustion chauds à partir d'un foyer et par conduction thermique transmet la chaleur à l'absorbeur qui s'échauffe et rayonne.

II.1.2 - Critères de design

a) Critères relatifs au site

Nous utilisons dans nos calculs des données sur l'ensoleillement de Dakar. Nous considérons qu'elle sont valables pour notre étude compte tenu de la faible différence d'altitude (= 80 m) et de latitude entre Dakar et Thiès.

b) Critères relatifs aux produits

Les produits alimentaires présentent une grande variation dans leurs propriétés physiques, chimiques et thermiques. Nous nous limiterons à des considérations moyennes basées sur les données de la référence (7)

Ainsi pour nos calculs nous considérons :

une teneur moyenne initiale en eau du produit $e_1 = 75 \%$

une teneur moyenne finale en eau à obtenir $e_2 = 10 \%$

une masse de produit à sécher $m_1 = 20 \text{ kg}$

c) Critères relatifs à l'air de séchage

- A partir des données météorologiques de Thiès, nous considérons que l'air de séchage possède les propriétés suivantes :

air à l'entrée du séchoir température $t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

humidité $\epsilon_1 = 60 \%$

air évacué du séchoir $\epsilon_2 = 70 \%$

- . La température moyenne que nous voulons obtenir à l'intérieur du séchoir est $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ compte tenu du fait que la plupart des produits agricoles supportent mal des températures supérieures à $70 \text{ }^\circ\text{C}$ (22)
- . La durée moyenne de séchage est supposée égale à 16 heures soit de 9 heures à 17 heures pendant deux journées

II.2 - Matériaux utilisés

- . Le bois contre-plaqué

Il réduit le nombre d'assemblage et son coefficient de conductivité thermique est faible, ce qui constitue une bonne isolation d'ensemble.

- . Le plexiglas

Il est rigide et parmi les plus résistantes des toiles transparentes. La température qu'elle peut supporter (60 à $93 \text{ }^\circ\text{C}$) est acceptable pour le séchage.

- . Les cornières et les tubes carrés (HSS)

Ils constituent le support du séchoir et permettent ainsi de le déplacer, de l'ajuster à la hauteur de la cheminée du foyer utilisé.

- . La laine de verre

Elle permet de diminuer les déperditions de chaleur au niveau de l'absorbeur.

. La toile moustiquaire

Elle constitue le support des produits et assure la circulation de l'air de séchage dans le lot de produits à sécher.

. La tôle d'acier de 1 mm d'épaisseur

Elle constitue la conduite de canalisation des gaz de combustion du foyer et l'absorbeur.

. La tôle d'aluminium de 1 mm d'épaisseur

Elle constitue les cheminées expérimentales d'évacuation de l'air de séchage.

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Le plexiglas (<i>Polymetacrylate de méthyle</i>)	
Epaisseur.....	$e = 2 \text{ mm}$
Indice de réfraction.....	$n = 1,5$
Masse ^{poide} volumique.....	$\rho = 11,8 \text{ kN/m}^3$
Température de résistance en chaleur continue.....	$60^\circ < t < 93^\circ \text{C}$
Propagation de la flamme en cas d'incendie.....	lente
indice d'absorption	$\mu = 0,04$
La tôle d'acier	
Epaisseur.....	$e = 1 \text{ mm}$
Conductivité thermique.....	$k = 110,3 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
Masse ^{poide} volumique.....	$\rho = 77 \text{ kN/m}^3$
L'isolation	
. Contreplaqué :	
épaisseur.....	$e = 15 \text{ mm}$
conductivité thermique.....	$k_b = 0,23 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
masse ^{poide} volumique.....	$\rho = 5 \text{ kN/m}^3$
. Laine de verre :	
conductivité thermique.....	$k = 0,027 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
Le support	
Profilé L 25 x 25 x 3 : masse ^{poide} linéaire...	$\gamma = 0,011 \text{ kN/m}$
Profilée HSS 31,8 x 31,8 x 2,54 :	
masse ^{poide} linéaire...	$\gamma = 0,032 \text{ kN/m}$
HSS 25,4 x 25,4 x 2,54 :	
masse ^{poide} linéaire...	$\gamma = 0,025 \text{ kN/m}$

II.3 - Calcul de la consommation thermique du séchoir

La quantité de chaleur à fournir à l'air de séchage doit comprendre :

- . la chaleur nécessaire pour assurer le séchage proprement dit du produit
- . les pertes par les parois du séchoir.

II.3.1 - Quantité de chaleur nécessaire pour le séchage proprement dit

a) Détermination de la quantité d'eau à évaporer

Nous posons m_1 = masse du produit initial $m_1 = 20$ kg

m_2 = masse du produit séché

E_1 = masse d'eau dans le produit initial

E_2 = masse d'eau dans le produit séché

m = masse d'eau à évaporer

$$e_1 = \frac{E_1}{m_1} \quad e_2 = \frac{E_2}{m_2} = \frac{E_2}{m_1 - m}$$

$$m = E_1 - E_2 = e_1 m_1 - e_2 (m_1 - m)$$

$$m = \frac{m_1 (e_1 - e_2)}{1 - e_2}$$

$$m = \frac{20 (0,75 - 0,10)}{1 - 0,10} = 14,44 \text{ kg}$$

$$m = 14,44 \text{ kg}$$

=====

b) Quantité de chaleur nécessaire pour assurer cette évaporation

Nous utilisons la construction (voir diagramme en page 15)
L'air est pris à l'extérieur du séchoir à $t_1 = 25^\circ\text{C}$ et $\epsilon_1 = 60\%$
(point A) il est réchauffé jusqu'à 50°C (point B) ; du point B nous
suivons l'isenthalpe jusqu'à sa rencontre avec la ligne $\epsilon_2 = 70\%$
représentant l'humidité de l'air à sa sortie du séchoir (point C)

Entre les points B et C chaque kg d'air traversant le
séchoir évaporera $\Delta W = 21,7 - 12,7 = 9$ g d'eau.

Pour évaporer 14,4 kg soit 14 400 g d'eau il faut donc :

$$\frac{1 \times 14\,400}{9} = 1\,600 \text{ kg}$$

La masse d'air à fournir pour le séchage : m_3

$$\underline{\underline{m_3 = 1\,600 \text{ kg}}}$$

L'air réchauffé de A à B absorbe une énergie

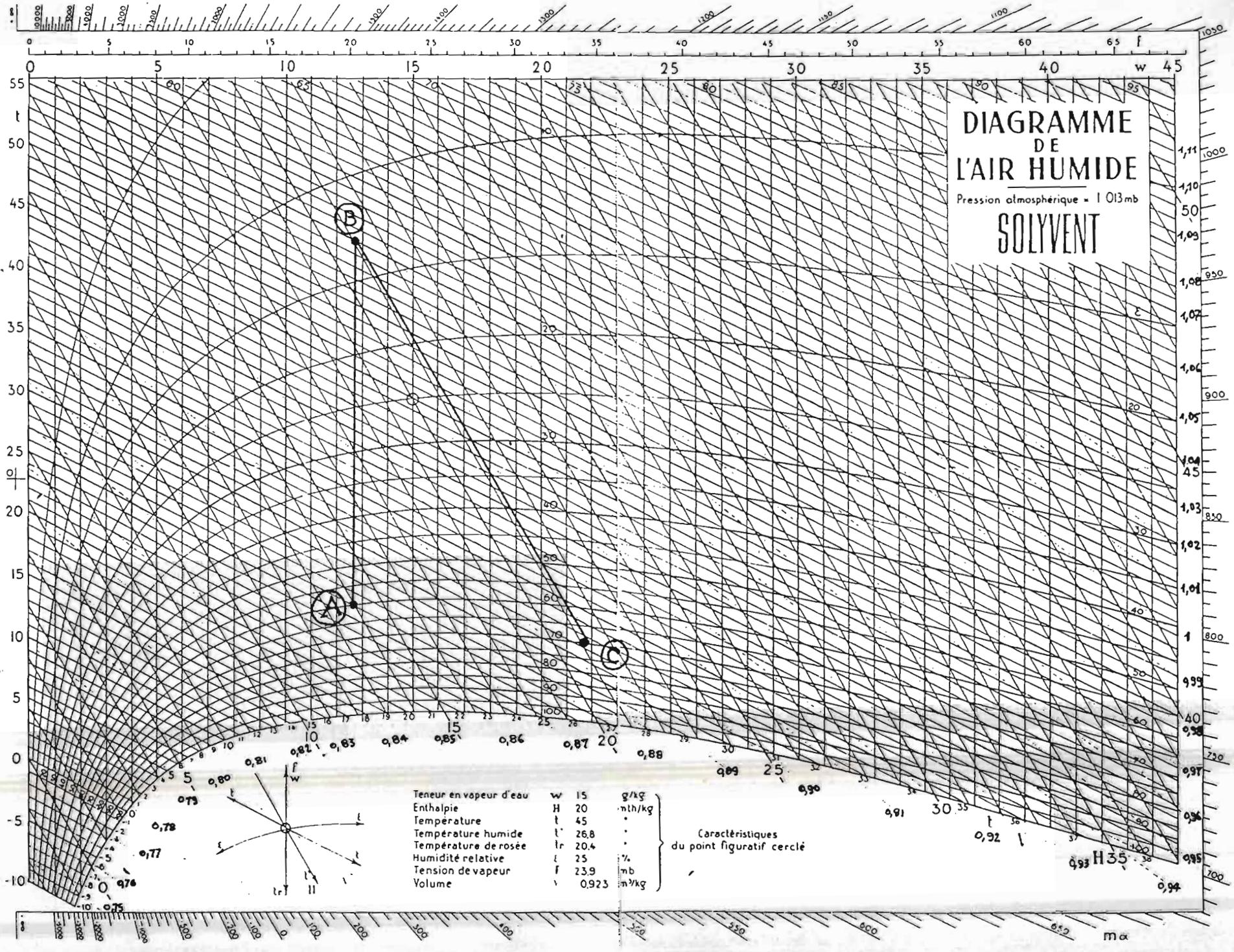
$$h = 21,2 - 14 = 7,2 \text{ kcal/kg}$$

La quantité de chaleur nécessaire pour assurer l'évaporation
vaut alors :

$$Q = 7,2 \times 1\,600 = 11\,520 \text{ kcal}$$

Comme le séchage complet est supposé être réalisé en 16
heures (2 journées de 8 heures), il faut en moyenne pour chaque journée
fournir

$$\frac{11\,520}{2} = 5\,760 \text{ kcal}$$



II.3.2. - Pertes par les parois

Ces déperditions sont la somme des pertes calculées séparément pour chaque élément homogène de paroi par application de la formule générale de transmission de chaleur.

$$Q_p = k S (t_i - t_e)$$

dans laquelle

Q_p = quantité de chaleur perdue

k = coefficient global de transmission

S = surface de la paroi

t_i = température intérieure du séchoir ($t_i = 50^\circ\text{C}$)

t_e = température extérieure ($t_e = 25^\circ\text{C}$)

Compte tenu du fait que nous n'avons pas à ce stade du design défini les dimensions des parois, nous considérons conformément aux recommandations de la référence (5) relatives aux déperditions dans une construction en bois, une majoration de 15 %.

II.3.3 - Consommation thermique du séchoir

$$Q_1 = 5760 \times 115 \% = 6624 \text{ Kcal/jour}$$

La quantité de chaleur à introduire dans le séchage par jour est :

$Q_1 \approx 7000 \text{ Kcal/jour}$

II.4 - Calcul de la surface de plexiglas

II.4.1 - Paramètres solaires

a) Le coefficient de réflexion du plexiglas

$$\rho = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 = \left(\frac{1,5 - 1}{1,5 + 1} \right)^2$$

$$\underline{\rho = 0,04}$$

b) Le coefficient de transmission du plexiglas

$$\tau = \frac{1 - \rho}{1 + \rho} e^{-\mu e} = \frac{1 - 0,04}{1 + 0,04} e^{-0,04 \times 0,02}$$

$$\underline{\tau = 0,92}$$

c) Orientation de la surface de plexiglas

Les courbes d'énergie solaire reçue sur une surface transparente dans l'hémisphère nord montrent que les orientations plein sud, sud est, sud ouest sont les plus favorables.

Pour nos calculs nous retenons une orientation plein sud ; l'angle azimuthal

$$\psi = 0.$$

d) inclinaison optimale de la surface de plexiglas

On devrait faire en sorte que la surface soit perpendiculaire aux rayons du soleil lorsqu'il passe à son point le plus haut.

La référence (3) donne l'inclinaison optimale par rapport à l'horizontal pour l'orientation plein sud.

$$\beta = \phi - \delta$$

β = inclinaison par rapport à l'horizontal

\emptyset = latitude du site

δ = déclinaison moyenne.

La valeur de δ peut être approximée par l'équation de Copper (1)

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right)$$

où n est l'ordre du jour de l'année ($n = 1, \dots, 365$)

Le calcul de δ fait sur l'année donne *en dehors des mois pluvieux (juillet - Août - septembre)*

$$\delta = -2,32$$

Par ailleurs la latitude de Thiès vaut $\emptyset = 14,98$

On obtient : $\beta = 17,3^\circ$

e) Intensité du rayonnement sur la surface de plexiglas

Pour les surfaces inclinées les équations suivantes permettent de calculer le rayonnement :

$$I_D = H_D \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} \qquad I_d = H_d \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Nous admettons que la reflexivité de l'environnement : $\rho = 0$

I_D = rayonnement incident direct sur le plexiglas

I_d = rayonnement incident diffus sur le plexiglas

H_D = rayonnement direct sur une surface horizontale

H_d = rayonnement diffus sur une surface horizontale

α = altitude du soleil

θ = angle d'incidence du rayonnement

. L'altitude α du soleil

$$\sin \alpha = \cos \varnothing \cos \delta \cos W + \sin \varnothing \sin \delta \quad (27)$$

Nous choisissons d'évaluer α à 13 heures locales,
(mi période de séchage au cours de la journée)

$$\text{l'angle horaire } W = +1 \times \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$$

$$\sin \alpha = \cos 14,9 \cos -2,32 \cos 15 + \sin 14,9 \sin -2,32$$

$$\alpha = \underline{67,22^\circ}$$

. angle d'incidence θ du rayonnement

$$\cos \theta = \cos (\varnothing - \beta) \cos \delta \cos W + \sin (\varnothing - \beta) \sin \delta$$

$$\cos \theta = \cos (14,9 - 17,3) \cos -2,32 \cos 15 + \sin (14,9 - 17,3) \sin -2,32$$

$$\cos \theta = 0,966$$

$$\theta = \underline{15^\circ}$$

Au Sénégal le rayonnement solaire direct vaut 65 % du rayonnement global (9).

Le rayonnement global moyen mensuel obtenu au CERER de 1968 à 1982 donne

$$H_g = 177,45 \text{ kWh/m}^2 \text{ mois}$$

$$\text{Nous déduisons } H_D = 115,34 \text{ kWh/m}^2 \text{ mois}$$

$$H_d = 62,11 \text{ kWh/m} \text{ mois}$$

On peut calculer alors I_D et I_d

$$I_D = H_D \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} = 115,34 \cdot \frac{\cos 15}{\sin 67,22} = 120,83 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{mois}$$

$$I_d = H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) = 62,11 \cdot \left(\frac{1 + \cos 17,3}{2} \right) = 60,70 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{mois}$$

Le rayonnement incident total sur le plexiglas vaut

$$I_t = I_D + I_d = 120,83 + 60,70$$

$$\underline{I_t = 181,53 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{mois}}$$

II.4.2 - Calcul de la surface de plexiglas

L'énergie reçue par une surface A est donnée par l'équation

$$Q = I_t \cdot A \cdot \tau$$

d'où

$$A = \frac{Q}{I_t \cdot \tau}$$

$$Q = Q_1 = \text{Consommation thermique du séchoir pour une journée}$$

$$Q = 7000 \text{ Kcal/jour}$$

$$I_t = 181,53 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{mois} \cong 0,70 \text{ Kcal/cm}^2 \cdot \text{jour}$$

$$\tau = \text{Coefficient de transmission du plexiglas } \tau = 0,92$$

$$A = \frac{7000}{0,70 \times 0,92} = 10870 \text{ cm}^2 \approx 1 \text{ m}^2$$

Surface totale du plexiglas : $A = 1 \text{ m}^2$

II.5 - Calcul des cheminées

II.5.1 - Le conduit de fumée :

Les difficultés de calcul d'une cheminée résident dans les incertitudes dont sont entachées les données du problème comme celles concernant par exemple les conditions atmosphériques - le dimensionnement doit tenir compte du tirage qui peut être cependant influencé d'une façon absolument imprévisible par le vent, le temps qu'il fait etc. Si les feux sont poussés la cheminée doit pouvoir évacuer une quantité de gaz plus grande que celle correspondant à l'allure normale.

Pour assurer l'évacuation des fumées il doit exister une différence de pression qui varie entre 2 et 6 mm H₂O (10) : Nous considérons pour notre système 2 mm H₂O.

a) Calcul de la hauteur

La hauteur de la cheminée est fonction de cette différence de pression et des poids volumiques de l'air extérieur γ_e et des fumées γ_i et est donnée par l'équation (10)

$$H = h (\gamma_e - \gamma_i)$$

dans laquelle

$$H = \text{différence de pression} \quad H = 2 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$h = \text{hauteur de la cheminée}$$

$$\gamma_e = \text{poids volumique de l'air} \quad \gamma_e = 1,24 \text{ daN/m}$$

$$\gamma_i = \text{poids volumique des fumées} \quad \gamma_i = 0,5 \text{ daN/m}$$

à environ 100°C

$$h = \frac{H}{\gamma_e - \gamma_i}$$

h = 2,70 m

b) Calcul du diamètre

La section intérieure du conduit de fumée des foyers à combustible solide fonctionnant en tirage naturel est donnée par la formule de Herody. (11)

$$S = \frac{P}{70\sqrt{h}}$$

dans laquelle

S = section du conduit (m²)

P = quantité de combustible brûlé à l'heure (kg)

h = longueur du conduit (m)

Nous posons P = 1 kg/h de charbon de bois ; il s'ensuit que :

$$S = 8,69 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad D = 2 \frac{S}{\pi} \quad D = 105 \text{ mm}$$

Diamètre du conduit de fumée : D = 100 mm

II.5.2 - Cheminée d'évacuation de l'air de séchage

Le renouvellement de l'air de séchage est dû, surtout en l'absence de vent à la différence de température entre l'intérieur du séchoir et l'extérieur ; il résulte un mouvement ascensionnel de l'air dont l'importance dépend également des dimensions de la cheminée.

L'équation suivante de la référence (6) donne dans le système impérial

$$V = 9,4 A \cdot h (t_i - t_e)$$

En exprimant cette équation dans le système S.I

$$V = 0,36 A \cdot h (t_1 - t_e)$$

dans laquelle

V = volume d'air renouvelé (m^3/s)

A = section de la cheminée (m^2)

t_i = température intérieure du séchoir ($^{\circ}C$)

t_e = température extérieure du séchoir ($^{\circ}C$)

On déduit la hauteur h

$$h = \frac{(V/0,36 A)^2}{t_i - t_e}$$

Nous considérons une cheminée circulaire de diamètre

$D = 100 \text{ mm}$.

$$A = \pi r^2 = \pi \times 0,05^2 m^2$$

$$t_i = 50^{\circ}C$$

$$t_e = 25^{\circ}C$$

Des calculs sur la consommation thermique du séchoir il ressort que 1 600 kg d'air doivent traverser le séchoir au cours du

séchage soit $\frac{1 m^3 \times 1 600 \text{ kg}}{1,3 \text{ kg}/m^3} = 1 230 m^3$.

Pour la durée de séchage considérée cela correspond à un renouvellement moyen de $\frac{1230}{60 \times 16} = 1,28 m^3/mn$.

Pour tenir compte de l'influence du vent dans ce renouvellement nous supposons que le renouvellement dû à la température, la plus importante dans ce processus de séchage par thermo-convection naturelle est $1 m^3/mn$ soit 80 % du volume renouvelé.

$$h = \frac{(1/60 \times 0,36 \times \pi \times 0,05^2)^2}{50 - 25}$$

$$h = 1,390 \text{ m}$$

Nous prenons

$$h = 1 500 \text{ mm}$$

$$D = 100 \text{ mm}$$

II.6 - Dimensionnement de l'armoire de séchage

Du point de vue de l'écoulement de l'air de séchage, nous aurions préféré une armoire de séchage cylindrique permettant un écoulement plus uniforme de l'air, mais compte tenu du fait que la vitesse de l'air n'est pas élevée (thermo-convection naturelle) et des difficultés liées à la construction d'une enceinte cylindrique en contreplaqué nous avons retenu une forme parallélopipédique rectangle. Cette forme a également l'avantage de donner une capacité plus grande en occupant moins de place qu'une enceinte plate.

L'armoire de séchage comprend quatre claies espacées de 200 mm l'une de l'autre. Ceci permet de les charger et de les décharger différemment, de sécher au besoin des produits différents pendant la même période.

Les claies sont des plateaux à fond en tamis permettant à l'air chaud de circuler à travers les couches du produit et augmentent ainsi l'efficacité du séchage, les treillis étant en matière plastique les produits ne s'y collent pas et peuvent sécher uniformément sans devoir être retournés.

Les dimensions de l'armoire de séchage sont portées sur les dessins techniques ; nous avons veillé au respect des différents résultats de dimensionnement obtenus dans les paragraphes précédents.

II.7 - Calcul de la quantité de chaleur transmise à l'air de séchage par le conduit de fumée et de la quantité de combustible

II.7.1 - Quantité de chaleur échangée

a) vitesse de l'air de séchage

Le taux de renouvellement de l'air de séchage est

$$Q_1 = 1,28 \text{ m}^3/\text{mm} \approx 0,025 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{cf } \S \text{ II.5})$$

la section de l'armoire de séchage vaut
 $A_1 = 0,50 \times 0,50 = \pi \times 0,05^2 = 0,24 \text{ m}^2$

$$q_1 = A_1 V_1 \quad V_1 = \frac{q_1}{A_1} = \frac{0,025}{0,24}$$

$$\underline{V_1 = 0,1 \text{ m/s}}$$

b) Vitesse de la fumée dans le conduit

Cette vitesse est due au tirage

$$q_2 = 0,36 \cdot A_2 \sqrt{h (t_i - t_e)} \quad (\text{cf } \S \text{ II.5})$$

$$A_2 = \text{section du conduit} = 0,0079 \text{ m}^2$$

$$h = \text{hauteur du conduit} = 2,7 \text{ m}$$

$$t_i = \text{température de la fumée dans le conduit}$$

$$t_e = \text{température extérieure } t_e = 25^\circ\text{C}$$

$$t_i \approx 100^\circ\text{C} ; \text{ selon la référence (28) la}$$

température des gaz de combustion d'un foyer fonctionnant normalement est supérieure ou égale à 100°C

$$q_2 = 0,36 \cdot 0,0079 \sqrt{2,7 (100 - 25)}$$

$$q_2 = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_2 = 0,36 \cdot \sqrt{2,7 (100 - 25)}$$

$$\underline{V_2 \approx 5 \text{ m/s}}$$

Nous avons un échangeur à courant parallèle ;
 fluide froid : air de séchage

$$t_{e_1} = \text{température d'entrée du fluide froid}$$

$$t_{f_2} = \text{température de sortie du fluide froid}$$

$$m_f = \text{masse volumique du fluide froid}$$

$$C_{P_f} = \text{chaleur massique du fluide froid}$$

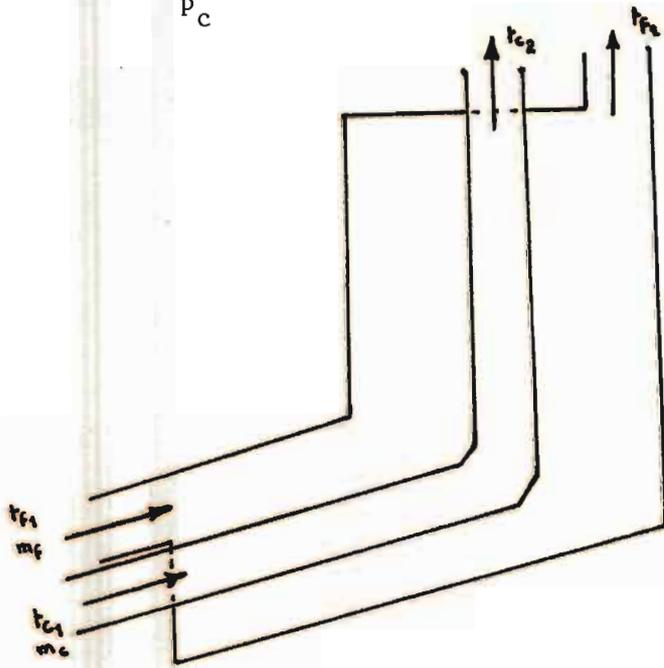
fluide chaud : fumée

t_{c_1} = température d'entrée du fluide chaud

t_{c_2} = température de sortie du fluide chaud

m_c = masse volumique du fluide chaud

C_{p_c} = chaleur massique du fluide chaud



$$t_{f_1} = 25^\circ\text{C} \quad t_{f_2} = 50^\circ\text{C} \quad m_f = 1,3 \text{ kg/m}^3 \quad C_{p_f} = 0,3 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$t_{c_1} = 100^\circ\text{C} \quad m_c = 1,3 \text{ kg/m}^3 \quad C_{p_c} = 0,25 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \quad (25) \text{ et } (26)$$

$$m_f \cdot C_{p_f} = 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 0,025 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,3 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} = 0,0098 \text{ kcal/s}^\circ\text{C}$$

$$m_f \cdot C_{p_f} = 35,1 \text{ kcal/h}^\circ\text{C}$$

$$m_c \cdot C_{p_c} = 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 0,04 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,25 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} = 0,013 \text{ kcal/s}^\circ\text{C}$$

$$m_c \cdot C_{p_c} = 46,8 \text{ kcal/h}^\circ\text{C}$$

On a $\underline{C_{\min} = 35,1 \text{ kcal/h}^\circ\text{C}}$ $\underline{C_{\max} = 46,8 \text{ kcal/h}^\circ\text{C}}$

$$C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{35,1}{46,8} \qquad \underline{C = 0,75}$$

Le nombre d'unité de transfert (N.T.U.) vaut :

$$\text{N.T.U.} = \frac{U.A}{C_{\min}} \qquad (24)$$

équation dans laquelle

U : coefficient global moyen de transmission de chaleur
- air - gaz de combustion

$$U \approx 40 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \qquad (24)$$

A = surface d'échange

$$A = 2\pi \cdot r \cdot l \quad \text{avec } r = \text{rayon au conduit} \quad r = 0,05 \text{ m}$$

$$l = \text{longueur du conduit} \quad l = 2,7 \text{ m}$$

$$A = 0,85 \text{ m}^2$$

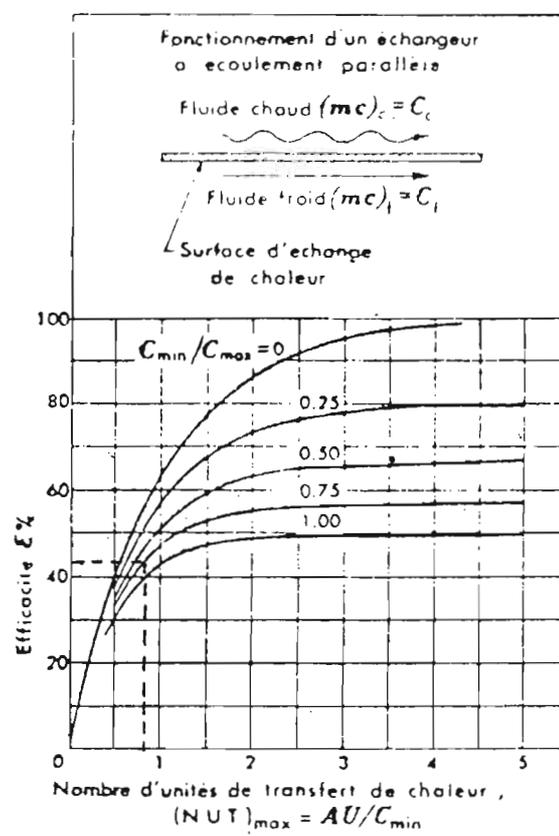
$$\text{N.T.U.} = \frac{40 \times 0,85}{41} \qquad \underline{\text{N.T.U.} = 0,83}$$

Sur le graphique de l'efficacité de l'échangeur en fonction de N.T.U. nous avons

$$\left. \begin{array}{l} C = 0,75 \\ \text{N.T.U.} = 0,83 \end{array} \right\} \quad \underline{\varepsilon = 0,43}$$

Par définition

$$\varepsilon = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{t_{c1} - t_{f1}}$$



d'où

$$t_{c_2} = t_{c_1} - \xi (t_{c_1} - t_{f_1})$$

$$t_{c_2} = 100 - 0,43 (100 - 25) \quad t_{c_2} = 68^\circ\text{C}$$

La quantité de chaleur cédée à l'air de séchage est

$$q = m_c \cdot c_{p_c} \cdot (t_{c_1} - t_{c_2})$$

$$q = 46,8 \text{ kcal/h}^\circ\text{C} (100 - 68)^\circ\text{C} \quad q = 1500 \text{ kcal/h}$$

Au cours d'une journée les périodes d'utilisation du foyer comme source de chaleur pour le séchage correspondent en général aux périodes de faible ensoleillement soit de 6 heures à 9 heures de 16 heures à 18 heures.

Toutefois l'utilisation peut se faire à tout autre moment. En considérant environ 5 heures d'utilisation par jour nous pouvons remarquer que le conduit de fumée peut fournir au séchoir.

$$q_f = 1500 \text{ kcal/h} \times 5 \text{ h} = 7500 \text{ kcal.}$$

Ce qui est presque équivalent à la consommation thermique du séchoir par jour (7000 kcal/jour)

En conclusion on peut dire que même en l'absence de soleil le séchoir devrait pouvoir fonctionner à partir du foyer.

II.7.2 - Calcul de la quantité de combustible

La quantité de chaleur qui traverse le conduit de fumée est donnée par l'équation

$$Q = \frac{q}{\epsilon \times (1 - \eta)}$$

dans laquelle

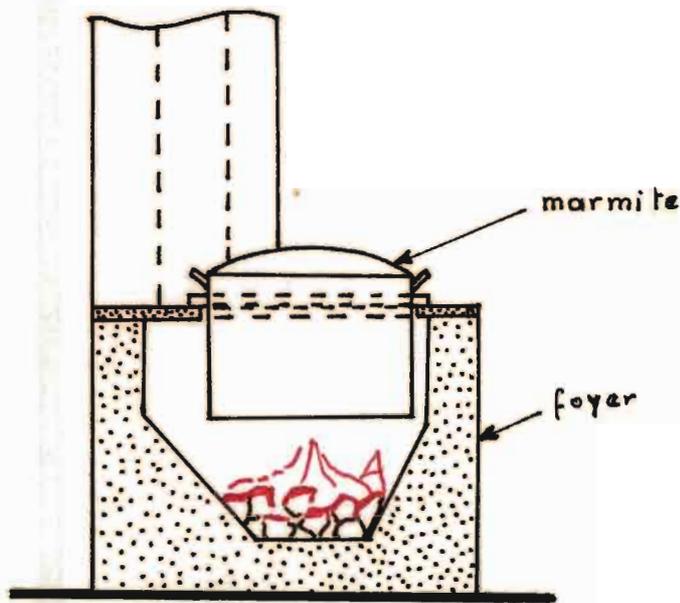
q = quantité de chaleur cédée à l'air de séchage

ϵ = efficacité de l'échangeur (conduit)

η = rendement du foyer

Remarque : les rendements de foyer sont définis par :

$$\eta = \frac{\text{quantité de chaleur cédée à la marmite}}{\text{quantité de chaleur libérée par le combustible brûlé}}$$



Vue en coupe d'un foyer

Nous admettons que $(1 - \eta)$ est le pourcentage de chaleur qui pénètre dans le conduit par la cheminée du foyer car les parois du foyer sont généralement bien isolantes.

Les tableaux de rendement de foyer indiquent que $\eta \leq 50 \%$

donc :

$$Q = \frac{1500 \text{ kcal/h}}{0,43 \times 0,50} \approx 6977 \text{ kcal/h} \equiv 8,11 \text{ kJ/s}$$

La masse de combustible brûlé est telle que

$$m \times C = Q$$

$$m = \frac{Q}{C}$$

La référence (28) donne les valeurs du pouvoir calorifique C pour les combustibles suivants :

bois peu sec $C = 8\,200 \text{ kJ/kg}$

bois séché à l'air libre $C = 15\,500 \text{ kJ/kg}$

bois séché au foyer $C = 18\,800 \text{ kJ/kg}$

Nous considérons $C = 18\,800 \text{ kJ/kg}$ car le charbon de bois est le combustible le plus généralement utilisé.

$$m = \frac{Q}{C} = \frac{8,11 \text{ kJ/s} \times 3\,600 \text{ s}}{18\,800 \text{ kJ/kg}}$$

$m \approx 1,5 \text{ kg/h}$

II.8 - Le support de l'armoire de séchage

Les raisons qui nous ont conduit à concevoir un support métallique pour le séchoir sont nombreuses ; on peut mentionner :

- la durabilité ;
- la possibilité de transporter le séchoir d'un site à un autre ;
- la possibilité d'adapter le séchoir à la cheminée d'un foyer de type "ban ak suuf" en ajustant sa hauteur afin qu'elle corresponde à celle de la cheminée du foyer.

Les colonnes du support sont faites de profilés HSS pouvant coulisser les uns dans les autres. Deux vis par colonne permettent de serrer les deux parties coulissantes à la hauteur désirée. Nous recommandons un chevauchement des profilés HSS d'au moins 150 mm pour assurer plus de stabilité au séchoir.

Les calculs de vérification de flambage des colonnes, de flexion des poutres montrent que les conditions sont largement sécuritaires même en choisissant les profilés de plus petites dimensions figurant dans le "handbook of Steel Construction"

a) Calcul des charges sur le support

. Poids de contre-plaqué : P_1

dimensions de la feuille utilisée pour la construction du séchoir

- longueur = 3 500 mm
- largeur = 1 500 mm
- épaisseur = 15 mm
- poids volumique = 5 KN/m³

$$P_1 = 3,5 \times 1,5 \times 0,015 \times 5$$

$$P_1 = \underline{0,40 \text{ kN}}$$

. Poids de la tôle d'acier utilisé : P_2

dimensions de l'absorbeur

- longueur = 750 mm
- largeur = 500 mm

dimension du conduit

- longueur = 2 700 mm
- circonférence = 315 mm
- poids volumique = 77 kN/m^3
- épaisseur = 1 mm

$$P_2 = 0,75 \times 0,500 \times 0,001 \times 2,7 \times 0,315 \times 0,001$$

$$\underline{P_2 = 0,095 \text{ kN}}$$

. Poids du chargement : P_3

$$P_3 = 20 \text{ kg} \times 9,81$$

$$\underline{P_3 = 0,196 \text{ kN}}$$

. Poids des cornières 25 X 25 X 3 : P_4

dimensions :

- longueur = 5 100 mm
- poids linéaire = 10,89 N/m

$$P_4 = 5,100 \times 10,89$$

$$\underline{P_4 = 0,056 \text{ kN}}$$

• Poids des tubes carrés 31,8 X 31,8 X 2,54 : P_5

dimensions :

- longueur = 1 400 mm
- poids linéaire = 21,58 N/m

$$P_5 = 1,4 \times 21,58$$

$$\underline{P_5 = 0,030 \text{ kN}}$$

. poids des tubes carrés 25,4 X 25,4 X 2,54 = P_6

- longueur = 1 400 mm
- poids linéaire = 16,58 N/m

$$P_6 = 1,4 \times 16,58 \qquad P_6 = 0,083 \text{ kN}$$

Poids total sur le support : P

Nous considérons un coefficient de pondération pour charge permanente = 1,25 et un coefficient de pondération pour charge vive = 1,50

$$P = 1,25 (P_1 + P_2) + 1,50 P_3$$

$$P = 1,25 (0,40 + 0,095) + 1,5 \times 0,196 \qquad \underline{P = 0,913 \text{ kN}}$$

Poids total du séchoir chargé

$$P_T = 1,25 (P_1 + P_2 + P_4 + P_5 + P_6) + 1,50 P_3$$

$$P_T = 1,25 (0,40 + 0,095 + 0,056 + 0,030 + 0,023) + 1,50 \times 0,196$$

$$\underline{P_T = 1 \text{ kN}}$$

Poids total du séchoir non chargé

$$P_{T'} = 0,80 \text{ kN}$$

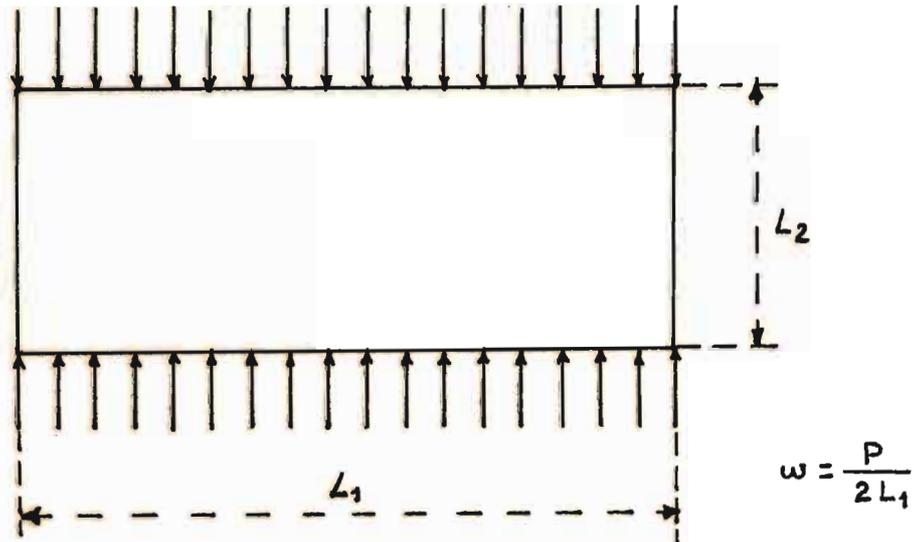
Le calcul du centre de gravité du système non chargé donne

$$y_{CG} = 800 \text{ mm par rapport au sol.}$$

N.B. : On considère le séchoir à la hauteur maximale des colonnes du support (h = 500 mm).

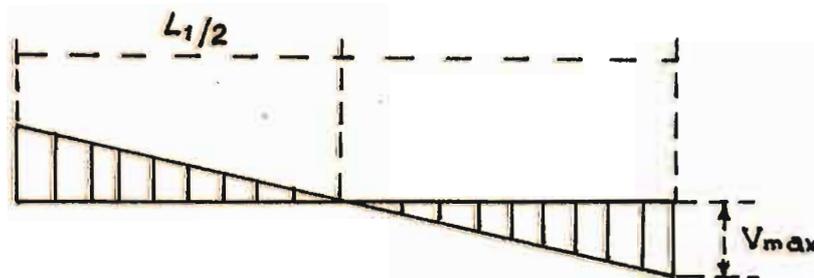
b) Diagrammes des sollicitations

On a $L_1 > 2L_2$ on peut négliger la partie de la charge supportée par les petits côtés.



$$\omega = \frac{913 \text{ N}}{2 \times 1,25} = 365 \text{ N/m}$$

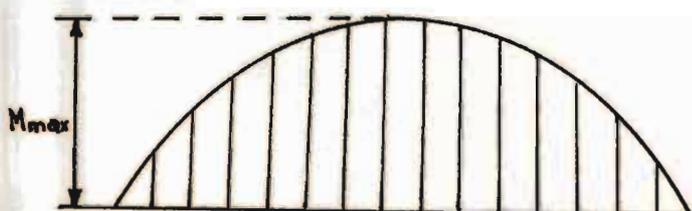
- diagramme des efforts tranchants



$$V_{\max} = \frac{\omega \cdot L_1}{2} = \frac{365 \times 1,25}{2} = 228,25 \text{ N}$$

$V_{\max} = 232,50 \text{ N}$

- diagramme des moments fléchissants



$$M_{\max} = \frac{\omega L_1^2}{8} : \frac{365 \times 1,25^2}{8}$$

$M_{\max} = 71,3 \text{ N.m}$

c) Vérification des cornières en flexion

L 25 X 25 X 3 groupe 1 (23)

nuance 300 W $F_y = 300 \text{ Pa}$

$F_u = 450 \text{ MPa}$

$$\frac{b}{t} = \frac{25}{3} = 8,23$$

$$\frac{200}{\sqrt{F_y}} = \frac{200}{\sqrt{300}} = 11,55$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{b}{t} = 8,23 \\ \frac{200}{\sqrt{F_y}} = 11,55 \end{array} \right\} \frac{b}{t} \leq \frac{200}{\sqrt{F_y}}$$

Le profilé est de classe 3

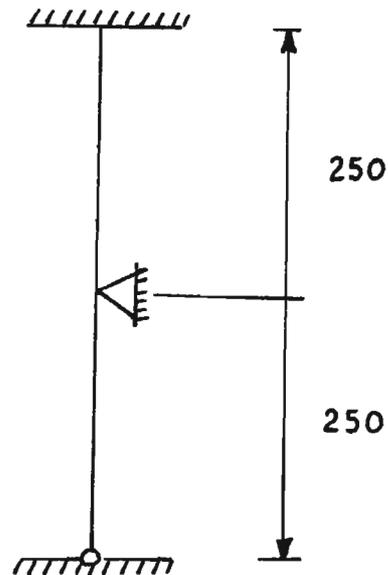
$$M_r = 0,9 M_y = 0,9 S_x F_y$$

$$S_x = 467 \text{ mm} \quad M_r = 0,9 \times 467 \times 300$$

$$M_r = 126 \text{ N.m}$$

La résistance pondérée M_r est supérieure à la sollicitation pondérée M_{\max}

d) Vérification du flambage dans les colonnes



Nous considérons le cas le plus critique $h = 500 \text{ mm}$
tous les tubes comme égaux au HSS 25,4 X 25,4 X 2,54 de $L = 500 \text{ mm}$

$$F_y = 300 \text{ MPa} \quad F_u = 450 \text{ MPa}$$

. Flambage local

$$\left. \begin{aligned} \frac{b}{t} &= \frac{25,4 - 2 \times 2,54}{2,54} = 8 \\ \frac{670}{\sqrt{F_y}} &= \frac{670}{\sqrt{300}} = 38,68 \end{aligned} \right\} \frac{b}{t} \leq \frac{670}{\sqrt{F_y}}$$

il n'y a pas de flambage local.

. Flambage général

$$k = 0,65 \quad L = 500 \quad r = 9,119 \text{ mm} \quad A = 215,483 \text{ mm}^2$$

$$\frac{K \cdot L}{r} = \frac{0,65 \cdot 500}{9,119} = 35,64$$

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 \times 200000}} = 35,64 \sqrt{\frac{300}{\pi^2 \times 200000}} = 0,44$$

$$\lambda < 1,0 \longrightarrow C_r = 0,9 \cdot A \cdot F_y (1,035 - 0,202 \lambda - 0,222 \lambda^2)$$

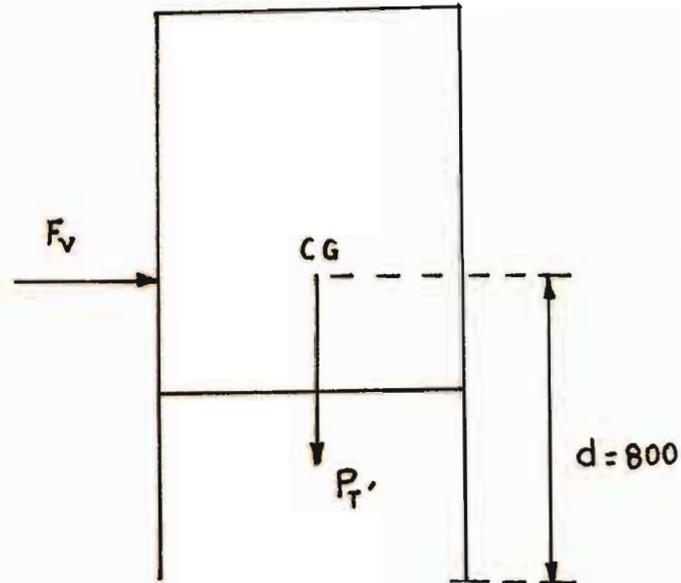
$$C_r = 0,9 \times 215,483 \times 300 (1,035 - 0,202 \times 0,44 - 0,222 \times 0,44^2)$$

$$\underline{C_r = 52,54 \text{ kN}}$$

C_r est supérieure à la sollicitation pondérée V_{\max}

il n'y a pas de flambage général.

II.9 - Facteur de sécurité au renversement



Nous évaluons dans ce paragraphe la vitesse minimale de vent qui renverserait notre séchoir afin de pouvoir prendre les dispositions nécessaires suivant le site.

Nous considérons un facteur de sécurité $FS = 1,5$

$$FS = \frac{M_R}{m_R} = 1,5$$

M_R = moment résistant dû au poids du séchoir P_T

m_R = moment de renversement dû au vent

P_T' = poids du séchoir non chargé (cf § II.8)

$$P_T' = 800 \text{ N}$$

$$M_R = P_T \times \frac{L}{2} = 800 \cdot \frac{0,55}{2}$$

$$M_R = 220 \text{ Nm}$$

$$m_R = \frac{MR}{FS} = \frac{220}{1,5}$$

$$m_R = 147 \text{ N.m}$$

$$m_R = F_v \times d$$

F_v = force due au vent

d = distance du centre de gravité du séchoir au sol

$$F_v = \frac{m_R}{d} = \frac{147}{0,80}$$

$$F_v = 183,8 \text{ N}$$

Pression due au vent

$$P = \frac{F_v}{A}$$

La surface maximale A du séchoir exposée au vent

$$A = (1,5 \times 0,50) + (0,70 + 0,30)$$

$$A = 0,960 \text{ m}^2$$

$$P = \frac{183,8}{0,960 \cdot 10^3} = 0,19 \text{ kPa}$$

Vitesse du vent

Elle est donnée par la formule

$$v = \sqrt{\frac{P}{50 \cdot 10^{-6}}}$$

v = vitesse du vent en km/h

p = pression due au vent en kPa

$$v = \sqrt{\frac{0,19}{50 \cdot 10^{-6}}}$$

$$v = 61,6 \text{ km/h}$$

soit

$$v = 17 \text{ m/s}$$

Ainsi si le site est souvent le lieu de vent $\geq 17 \text{ m/s}$ à environ 2 m du sol, nous recommandons de fixer le séchoir au sol à l'aide de boulons ou par des attaches.

II.10 - Quelques détails de construction

II.10.1 - Le conduit de fumée

Il est composé de deux cylindres de 100 mm de diamètre soudés bout à bout et formant un angle de 107° entre eux. La réalisation de l'intersection des deux cylindres a été rendu possible grâce aux développements de ces cylindres.

Un des cylindres est soudé à l'absorbeur et fait un angle de 17° avec l'horizontal ; pour avoir une surface de contact conduit - absorbeur maximale en vue de faciliter le plus possible la transmission de chaleur des ailettes sont prévues sur ce cylindre.

Afin de pouvoir adapter le conduit à la cheminée du foyer un coude de 107° est réalisé ; il porte deux trappes dont l'une verticale permet de varier le débit des fumées entrant dans le conduit l'autre est horizontale et son ouverture permet à la fumée de s'échapper sans pénétrer dans le conduit.

II.10.2 - Le support

Pour ajuster la hauteur du séchoir les colonnes du support peuvent coulisser les unes dans les autres et être serrées à la hauteur adéquate à l'aide de deux vis sur chaque colonne.

CHAPITRE III

EXPERIMENTATION

III.1 - Les essais à vide

A travers les essais à vide nous visons un double but :

- tester le système en le soumettant à des conditions d'opérations différentes ;
- recommander les améliorations à apporter au design pour mieux répondre aux objectifs fixés.

III.1.1 - Les appareils de mesures

Pour suivre le comportement du séchoir nous disposons de :

- 5 thermomètres de laboratoire gradués de 0 à 110° C dont 1 thermomètre au niveau de chaque claie et 1 pour la mesure de la température ambiante hors du séchoir.
- 2 hygromètres à bulbes sèche et humide dont un à l'intérieur du séchoir et l'autre à l'extérieur pour mesurer le degré d'humidité relative.
- 1 pyranomètre pour mesurer l'ensoleillement ; (un multimètre permet de lire cet ensoleillement en millivolts que nous convertissons en watt par centimètre carré à partir de la relation $105 \text{ mV} \equiv 1 \text{ W/cm}^2$)
- 1 balance Mettler P 1210 Max 1,200 kg d = 10 mg pour la pesée des masses de produits au cours de leur séchage.

III.1.2 - Journée du 6 février 1985

Nous présentons les mesures effectuées sans cheminée d'évacuation de l'air de séchage afin d'évaluer les températures maximales dans le séchoir.

Le rayonnement global moyen était de 791 W/m^2 , le ciel clair, le vent faible.

Le tableau des résultats et les courbes de température en fonction du temps permettent de faire les remarques suivantes :

- la température maximale atteint 66°C dans le séchoir alors qu'elle est de $36,5^{\circ}\text{C}$ à l'extérieur ;
- la claie supérieure enregistre les plus hautes températures et elles diminuent sur les claies inférieures ;
- le degré d'humidité relative est plus faible à l'intérieur du séchoir qu'à l'extérieur.

Des mesures effectuées pendant les journées du 8 et 19 février 1985 permettent de vérifier les remarques de la journée du 6 février 1985 ; l'allure des courbes de températures reste la même à quelques différences près dues aux différences d'ensoleillement en ces journées .

Remarques : les claies sont numérotées de haut en bas.

T_i = température de la claie numéro i ($i = 1, 2, 3, 4$)

t_a = température ambiante hors du séchoir

$\%H_a$ = taux d'humidité relative de l'air hors du séchoir

$\%H_i$ = taux d'humidité relative de l'air de séchage

Hg = ensoleillement global

Journée du 6 février 1985

. ensoleillement global moyen : 791 W/m^2

. temps calme

heures	t_1 (°C)	t_2 (°C)	t_3 (°C)	t_4 (°C)	t_a (°C)	% Ha	% Hi	Hg (W/m^2)
8	23	21,5	22	21,5	21	28	28	-
9	36,5	36	36	34	27	27	19	128
10	43	42	41	40	30	23	17	667
11	53	50	47	45	35	21	14	895
12	58	53	50	48	36	17,5	10,5	1010
13	66	61	58	55	36,5	17	10	1048
14	64	58	54	51	36,5	17	10	1048
15	58	51	47	46	35,5	17,5	10,5	1000
16	54	47	45	43,5	35	17,5	12	762
17	46	44	42,5	42	34,5	17,5	17	667
18	42	40	40	38	35	17,5	21	381

journée du 6 Février 85



III.1.3 - Journée du 7 février 1985

Comme nous l'avons déjà mentionné le séchage ne peut se faire sans ventilation ; pour assurer une ventilation naturelle nous avons expérimenté en cette journée une cheminée d'évacuation de l'air de séchage.

Le rayonnement global moyen de la journée était de 764 W/m^2
le vent calme, le ciel clair

hauteur de la cheminée $H = 1\ 500 \text{ mm}$

diamètre de la cheminée $\varnothing = 100 \text{ mm}$

L'examen des tableaux des résultats et des courbes de températures en fonction du temps amène les remarques suivantes :

- le rayonnement global moyen est à peu près le même que celui de la journée du 6 février
- les températures des claies enregistrent une baisse sensible et la température maximale ne dépasse pas 50°C
- le degré d'humidité demeure plus faible à l'intérieur du séchoir qu'à l'extérieur.

Nous pouvons conclure que la cheminée crée un phénomène de tirage d'où un renouvellement plus rapide de l'air de séchage de telle sorte que la température intérieure ne s'élève pas comme pour la journée du 6 février.

Des relevées effectuées le 22 et le 23 février permettent de confirmer ces remarques.

Journée du 7 février 1985

. ensoleillement global moyen : 764 W/m^2

. vent faible

heures locales	t_1 (°C)	t_2 (°C)	t_3 (°C)	t_4 (°C)	t_a (°C)	% Ha	% Hi	Hg (W/m ²)
8	20,5	20	20	19,5	19	60	55	-
9	24,5	24,5	24,5	23,5	21,5	52	12	448
10	30,5	30,5	30,5	28	23,5	48	41	686
11	43,5	43	41,5	38	28,5	37	32	857
12	48	46	45	41	32	29	24	914
13	49,5	46	45	43	34	24	21	1000
14	49	45,5	45	44	33	27	21	952
15	44	43,5	43	42,5	29	33	22	905
16	38	36,5	36	34	26	40	22	714
17	34	33,5	33	32,5	25	40	30	686
18	28	28	26	24	24	45	32	476

III.1.5 - Journée du 24 février 1985

L'ensoleillement global moyen de la journée était de 338 W/m^2 . Nous avons testé les canalisations des gaz de combustion dans le séchoir. Le foyer a été allumé à 8 heures et toutes les heures nous l'alimentions en charbon de bois à raison de 2 kg/h.

Le tableau des résultats et les courbes de température permettent de faire les remarques suivantes :

- . le rayonnement global de la journée était faible ;
la température ambiante maximale valait $28 \text{ }^\circ\text{C}$
- . les températures enregistrées à l'intérieur du séchoir atteignent celles d'une journée bien ensoleillée
- . la quantité totale de charbon consommé était de 22 kg

Un test réalisé le 3 mars 1985 a permis de prolonger la durée de séchage en allumant le foyer de 7 heures à 10 heures et de 16 heures à 19 heures. Les résultats obtenus témoignent de la possibilité de combiner les deux procédés.

III.2 - Essais de séchage de produits

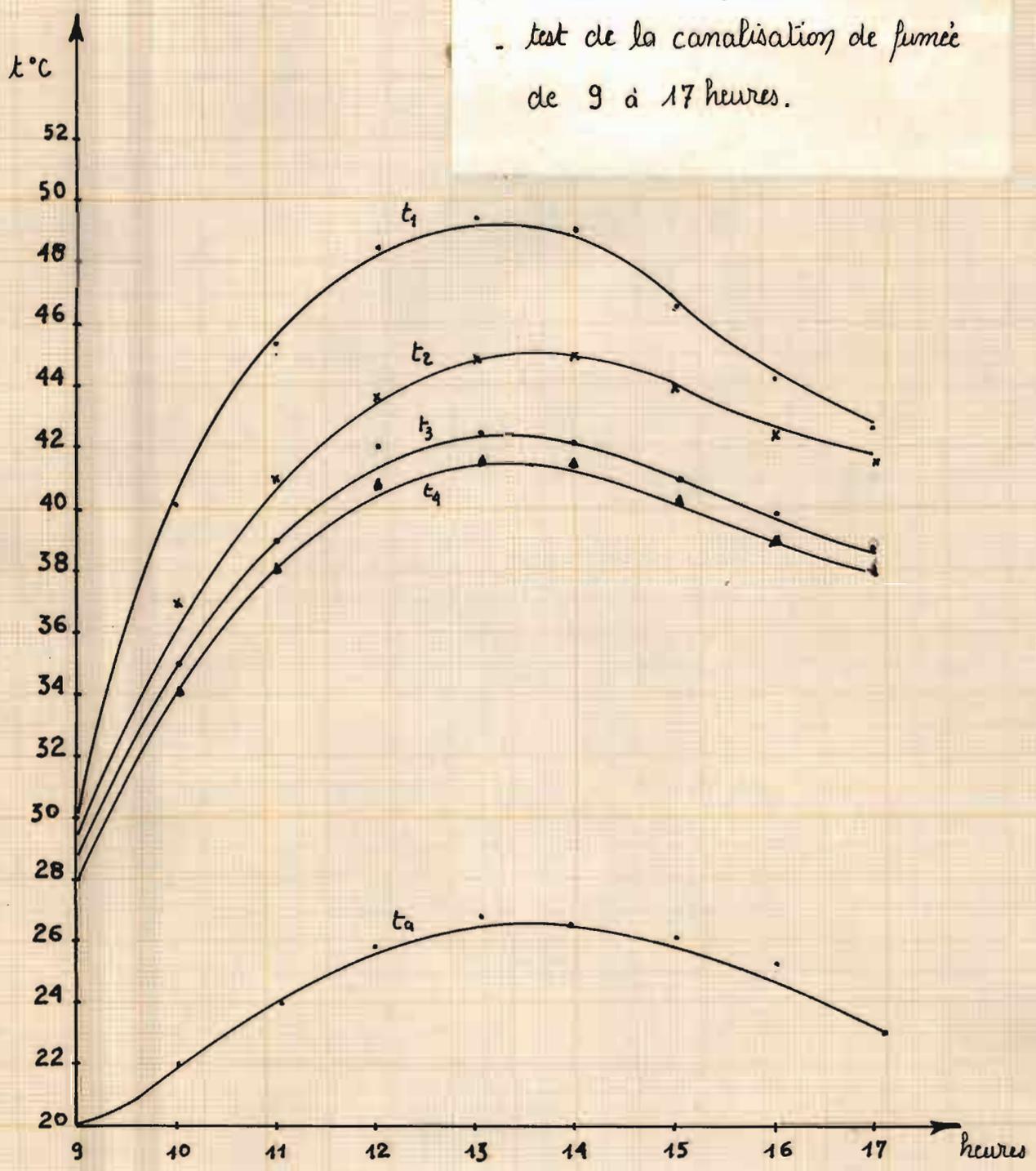
Après les essais à vide deux produits locaux ont été soumis au séchage : le gombo (*Hibiscus esculentus*) et l'oseille (*Hibiscus sabdarifa*). La disponibilité de ces deux produits au moment de nos expériences a motivé leur choix. Toutefois des céréales peuvent également être testées.

Journée du 24 février 1985

- . ensoleillement global moyen : 338 W/m^2
- . cheminée d'évacuation de l'air de séchage de 1500 mm

heures	$t_1(^{\circ}\text{C})$	$t_2(^{\circ}\text{C})$	$t_3(^{\circ}\text{C})$	$t_4(^{\circ}\text{C})$	$t_a(^{\circ}\text{C})$	Ha %	Hi %	Hg (W/m^2)
8	22,5	22,5	22	22	19,5	68	65	-
9	25	25	25	24,	20	62	55	76
10	39	37	37	36	22	50	38	190
11	44,5	41	39	37	25	48	27	428
12	48	48	42	41	27	41	20	571
13	49	45	42,5	42	28	30	21	476
14	47	45	42	42	28	30	20	476
15	45	42	42	40	27	32	20	400
16	44	42	40	38	25	34	28	381
17	43	40	39	37	23	34	27	48
18	40	38	36	36	21,5	40	30	-

- journée du 24 Février 85
- ensoleillement faible (338 W/m^2)
- test de la canalisation de fumée
de 9 à 17 heures.

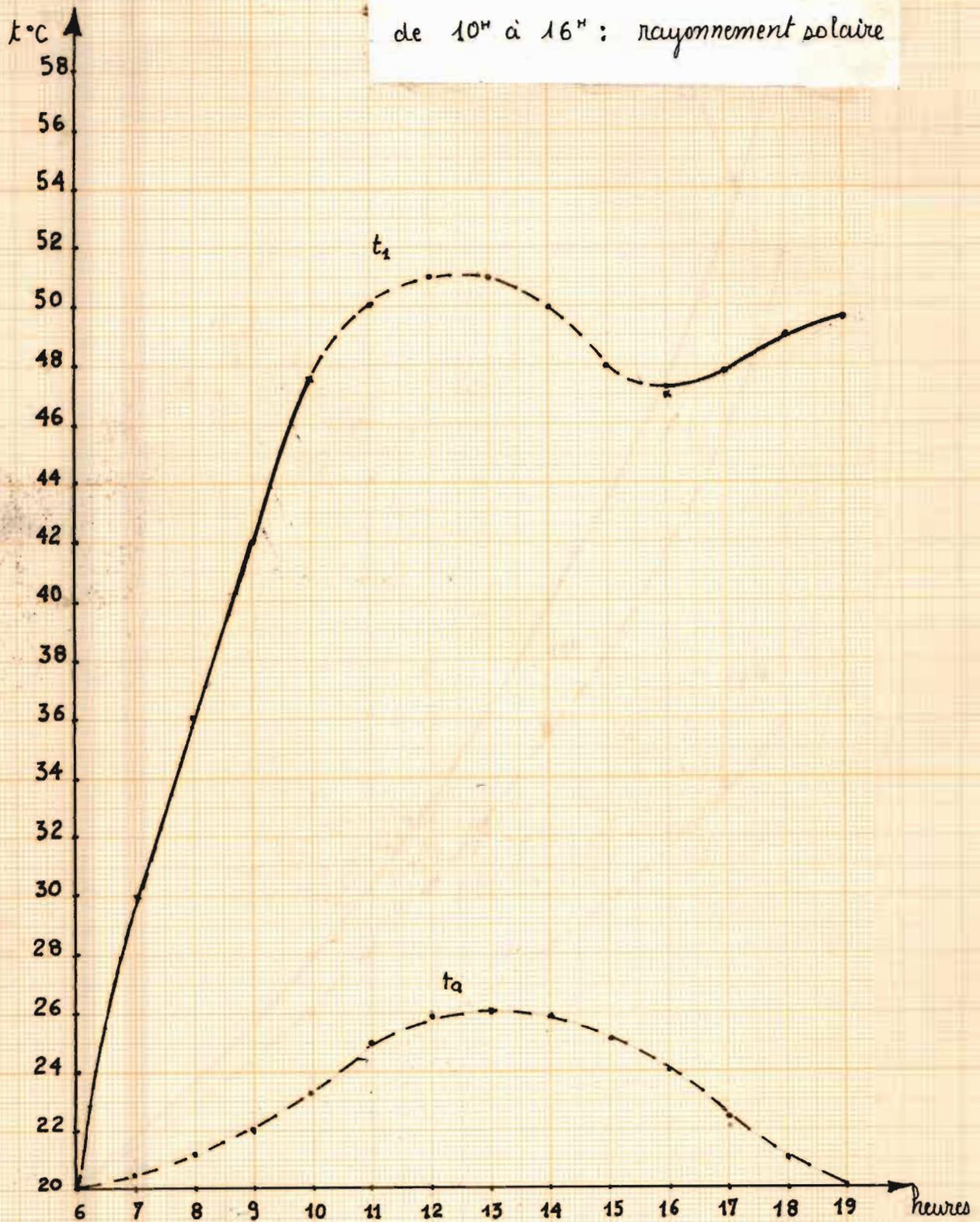


Journée du 03 mars 1985

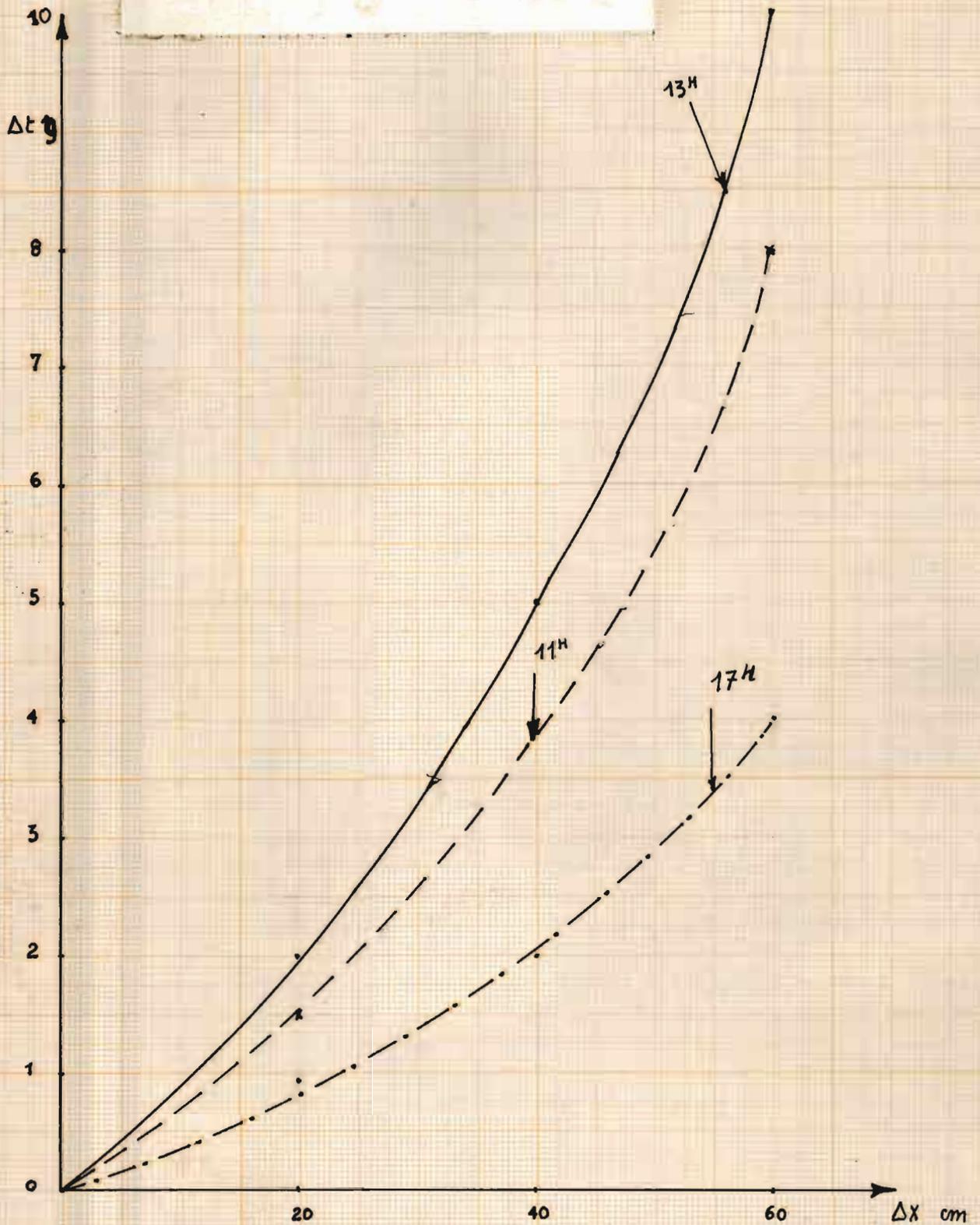
. ensoleillement global moyen : 447 W/m²

heures	t ₁ (°C)	t ₂ (°C)	t ₃ (°C)	t ₄ (°C)	t _a (°C)	% Ha	% Hi	Hg(W/m ²)
7	30	29	29,5	30,5	20,5	57	44	-
8	36	35,5	35	36	20,5	52	38	-
9	41	40	38	37,5	22	42	35	171
10	48	45	43,5	43	23	34	26	286
11	50	47	45,5	44	25	35	23	686
12	51	48	46	44,5	26	35	23	762
13	51	48,5	46,5	45	28	35	22	714
14	49	47	46	45	28	35	22	681
15	45,5	43	42,5	41,5	27	38	24	571
16	48	42	41,5	40,5	25	38	25	314
17	48	44,5	43	42	23	38	24	190
18	49	46	43,5	42	21	41	23	95
19	47	46	45,5	46	19	46	22	-

journee du 3 Mars 85: test combine'
de 6^h à 10^h puis de 16^h à 19^h: foyer
de 10^h à 16^h: rayonnement solaire



variation de la température
en fonction de la variation de niveau
des claires. exemples de quelques heures.



III.2.1 - Intérêt du séchage de ces légumes

Ces légumes fraîchement récoltés sont généralement mis dans des sacs de jute, arrosés d'eau et livrés au marché. Les dommages peuvent résulter des conditions de manutention et d'entreposage inadéquates.

Les cultivateurs sont alors bien souvent contraints soit d'accepter les prix qu'on leur offre soit de deshydrater le reste pour l'écouler hors saison. Dans ce cas-ci ils courent le risque de voir le produit s'il a été imparfaitement deshydratés s'infecter facilement de moisissures.

Ces deux légumes ont un débouché urbain certain.

III.2.2 - Journée du 11 mars 1985

Les produits ont été livrés à 8 heures par un maraîcher et mis en séchage à partir de 9 heures.

Le gombo a été taillé en tranches d'environ 20 mm de diamètre, 3 mm d'épaisseur. Nous avons pris un échantillon de 12 kg pour le gombo et 12 kg pour l'oseille réparti comme suit :

- . 6 kg de chaque produit dans le séchoir
- . 6 kg de chaque produit exposés directement au soleil.

Le rayonnement global moyen de la journée était de 765 W/m^2 . Nous faisons des pesées toutes les deux heures au début du séchage et toutes les heures vers la fin pour suivre l'évolution de la perte en eau des produits en fonction du temps.

Les tableaux des résultats permettent de faire les remarques suivantes :

- . la perte en eau des produits du séchoir est plus élevée que celle des produits exposés directement au soleil.
- . A 15 heures il y a déjà une différence de poids entre les produits du séchoir et de l'extérieur.

III.2.3 - Journée du 12 mars 1985

Les produits de l'extérieur du séchoir avaient repris de l'humidité et leur poids avait augmenté par rapport à la pesée de la veille. Nous avons attendu jusqu'à 10 heures pour poursuivre les pesées.

Le rayonnement global de la journée était de 742 W/m^2 .

Les pertes en eau des produits avaient baissé par rapport à la veille surtout pour ceux du séchoir.

A 17 heures la masse des produits du séchoir ne variait plus de façon sensible tandis que le séchage de ceux de l'extérieur se poursuivait.

III.2.4 - Journée du 13 mars 1985

Le rayonnement global moyen de la journée était de 724 W/m^2 . Les produits de l'extérieur avaient encore repris de l'humidité et il a fallu attendre 16 heures pour la fin du séchage.

Les courbes de températures montrent que la température extérieure est très faible pour évaporer une quantité d'eau importante.

Il y a lieu de remarquer que l'air frappe superficiellement les produits extérieurs et il faut les retourner constamment pour accélérer le séchage.

Selon les considérations que nous avons faites sur le temps de séchage les produits à l'intérieur du séchoir ont mis 18 heures pour sécher tandis que ceux de l'extérieur ont pris 26 heures.

III.2.5 - Journée du 18 mars 1985

Les produits ont été livrés le 17 mars à 18 heures et mis en séchage à partir de 6 heures le 18 mars.

Le gombo a été taillé de nouveau en tranches d'environ 20 mm de diamètre, 3 mm d'épaisseur. Nous avons mis un échantillon de 6 kg de gombo et 6 kg d'oseille dans le séchoir.

Nous procédons comme les expériences passées à des pesées toutes les deux heures. Le foyer a été allumé de 7 heures à 10 heures puis de 16 heures à 18 heures ; de 10 heures à 17 heures le séchoir fonctionnait à partir du rayonnement solaire. Le séchage a duré toute la journée et a pris fin le lendemain à 9 heures soit environ 15 heures de séchage.

Tableau des résultats

- . Produit hors du séchoir
- . Rayonnement global moyen Hg = 765 W/m
- Variété : gombo (*hibiscus esculentus*)
- Echantillon : tranche (0,2 X 20 cm)
- Charge : 6 000 g
- Masse produit sec : 1 500 g

heure de pesée	durée du séchage (h)	masse mesurée (g)	contenu en eau (g)	teneur en eau %
9	0	6000	4500	3
11	2	5580	4080	2,7
13	4	4950	3450	2,3
15	6	4610	3110	2,1
17	8	3600	2710	1,8
9	10	3500	2500	1,7
11	12	3180	2100	1,4
13	14	3000	2000	1,3
15	16	2775	1680	1,1
17	18	2700	1500	1
9	20	2625	1275	0,85
11	22	2250	1200	0,80
12	23	2200	1125	0,75
15	26	2160	1050	0,75

e = teneur en humidité finale

$$e = \frac{1050 \times 100}{6000} = 17,5 \%$$

Tableau des résultats

- . Produit dans le séchoir
- . Fonctionnement à partir du rayonnement solaire uniquement
- . Variété : gombo (*hibiscus esculentus*)
- . Echantillon : tranches (0,3 X 20 cm)
- . Charge des claies : 6000 g
- . Masse de produit sec : 1500 g

heure de pesée	durée du séchage (h)	masse mesurée (g)	contenu en eau (g)	teneur en eau b.s %	ΔT 4-3	ΔT 3-2	ΔT 2-1	
9	0	6000	4500	3	0	0,5	0,5	
11	2	5100	3600	2	0,5	0,5	1	
13	4	4500	3000	1,7	0,5	1	1,5	
15	6	1050	2550	1,4	0	0,5	1	
17	8	3600	2100	1,2	0	0	0,5	
9+	10	3300	1800	1	0	0,5	0,5	
11	12	3000	1500	0,9	0,5	0,5	1	
13	14	2850	1350	0,8	0,5	1	1,5	
15	16	2700	1200	0,8	0	0,5	0,5	
16	17	2500	1000	0,8	0	0	0,5	
16	18	2380	867	0,8	0	0	0	

e = teneur en humidité finale

$$e = \frac{867 \times 100}{6000} \approx 14,5 \%$$

Tableau des résultats

- . Produit dans le séchoir
- . Fonctionnement combiné (rayonnement solaire + foyer)
Hg : 751 W/m
- . Variété : gombo (*hibiscus esculentus*)
- . Echantillon : tranche (0,3 X 20 cm)
- . Charge : 6000 g
- . Masse de produit sec : 1500 g

heures de pesée	durée du séchage (h)	masse pesée	contenu en eau (g)	teneur en eau b.s (%)
7	0	6000	4500	3
9	2	5600	3450	2,3
11	4	5200	2775	1,85
13	6	4100	2250	1,5
15	8	3460	1875	1,25
17	10	2850	1500	1
19	12	2760	1350	0,9
7	14	2620	1260	0,8
8	15	2540	1125	0,75
9	16	2420	920	0,7

e = teneur en humidité finale

$$e = \frac{920 \times 100}{6000} = 15,3 \%$$

Tableau des résultats

- . Produit hors du séchoir
- . Rayonnement global moyen Hg :
- . Variété oseille (hibiscus sabdarifa)
- . Charge : 6000 g
- . Masse de produit sec : 1500 g

heures de pesée	durée du séchage	masse pesée (g)	contenu en eau (g)	teneur en eau h.s (%)
9	0	6000	4500	3,
11	2	5400	3900	2,6
13	4	4875	3375	2,25
15	6	4350	2850	1,9
17	8	3750	2250	1,5
10	10	3375	1875	1,25
12	12	2925	1425	0,95
14	14	2550	1050	0,7
16	16	2250	750	0,5
17	18	2250	780	0,5
10	20	2230	720	0,48
11	22	2215	715	0,48

e = teneur en humidité finale

$$e = \frac{715 \times 100}{6000} = 12 \%$$

Tableau des résultats

- . Produit dans le séchoir
- . Fonctionnement à partir du rayonnement solaire uniquement
- . Variété : oseille (hibiscus sabdarifa)
- . Charge : 6000 g
- . Masse de produit sec : 1500 g

heure de pesée	durée du séchage (h)	masse pesée (g)	contenu en eau (g)	teneur en eau b.s %	ΔT 4-3	ΔT 3-2	ΔT 2-1	
9	0	6000	4500	3	0	0,5	0,5	
11	2	5250	3750	2,5	0,5	0,5	1	
13	4	4575	3075	2,05	0	1	1,5	
15	6	3975	2475	1,65	0	0	0,5	
17	8	3430	1930	1,3	0,5	0,5	1	
9+	10	2925	1425	0,95	0,5	0,5	0,5	
11	12	2400	900	0,6	0	0,5	0,1	
13	14	2250	750	0,5	0,5	0,5	0,5	
15	16	2220	720	0,48	0	0,5	0,5	
16	17	2210	710	0,46	0	0	0,5	
17	18	2003	703	0,46	0	0	0	

e = teneur en humidité finale

$$e = \frac{703 \times 100}{6000} \approx 12 \%$$

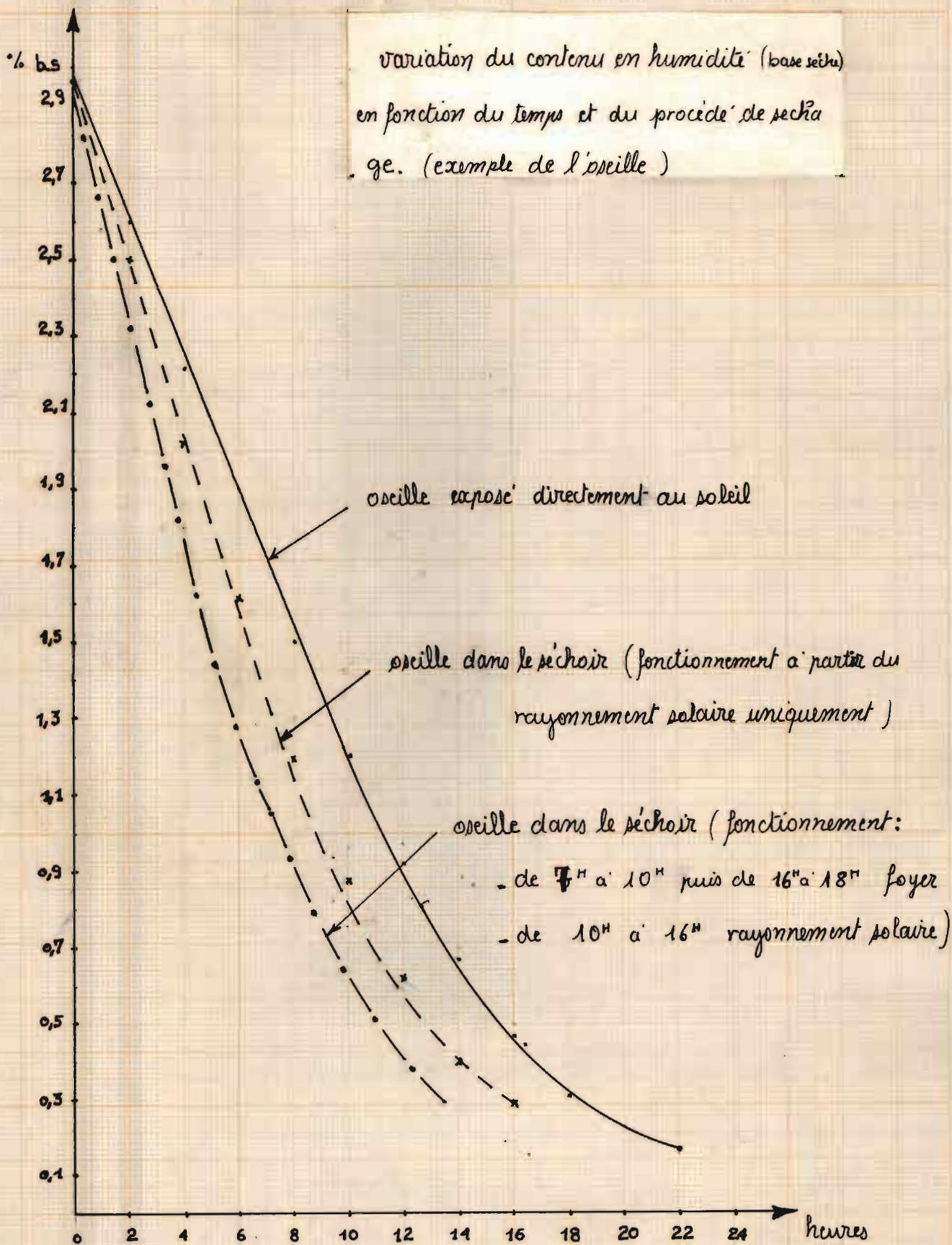
Tableau des résultats

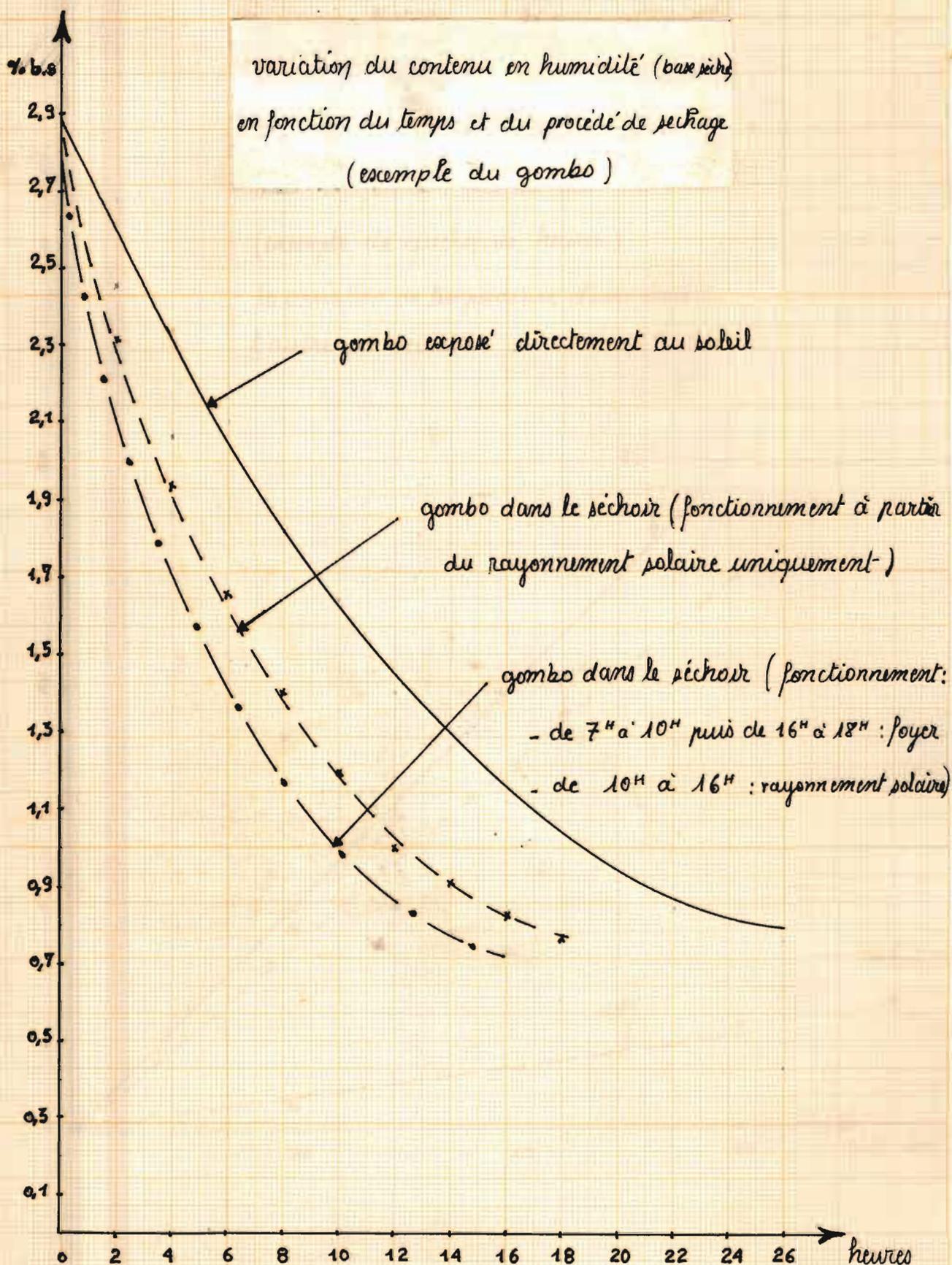
- . Produit dans le séchoir
- . Fonctionnement combiné (rayonnement solaire + foyer)
Hg = 751 W/m
- . Variété : oseille (hibiscus sabdarifa)
- . Charge : 6000 g
- . Masse de produit sec : 1500 g

heures de pesée	durée du séchage	masse pesée (g)	contenu en eau g	teneur en eau b.s (%)
7	0	6000	4500	3
9	2	4875	3375	2,25
11	4	4200	2700	1,8
13	6	3600	2100	1,4
15	8	3010	1510	1
17	10	2475	975	0,65
19	12	2235	735	0,49
7	14	2200	700	0,46
8	15	2110	610	0,4

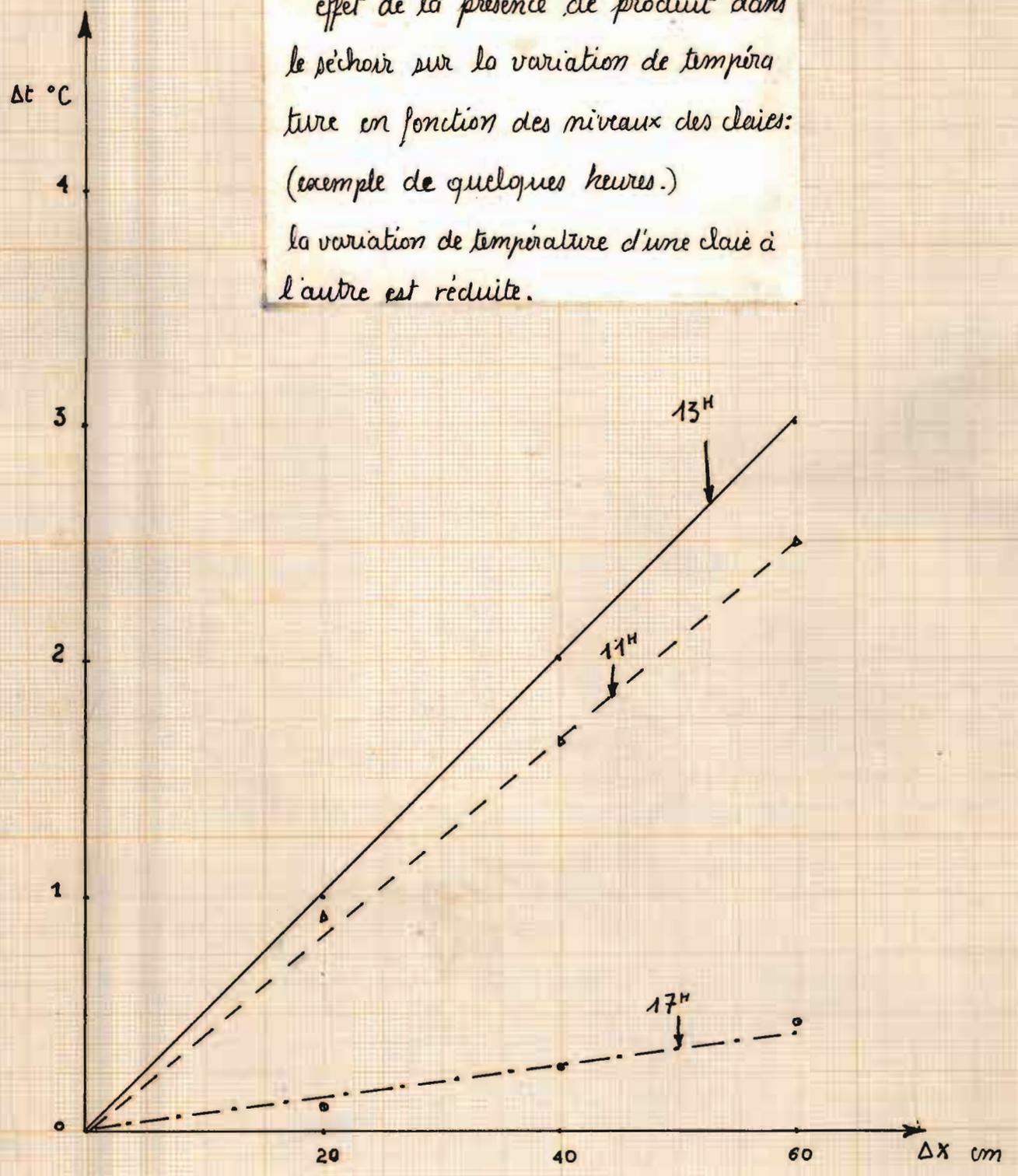
e = teneur en humidité finale

$$e = \frac{610 \times 100}{6000} = 10,2 \%$$





effet de la présence de produit dans le séchoir sur la variation de température en fonction des niveaux des claies: (exemple de quelques heures.)
la variation de température d'une claie à l'autre est réduite.



III.3 - Conclusion

De l'étude expérimentale faite sur le séchoir on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les tableaux des résultats et les courbes de variation du taux d'humidité en fonction du temps montrent que la perte en eau des produits est plus élevée à l'intérieur du séchoir qu'à l'extérieur ; cette perte est d'avantage plus élevée lorsque le séchoir fonctionne en version combinée (rayonnement solaire et foyer) qu'en version solaire uniquement.
- Les courbes de variation de température (Δt) en fonction de la variation de distance (Δx) entre la claie inférieure et les claies supérieures mettent en évidence que Δt augmente plus rapidement que Δx .
- . Cette augmentation est plus marquée lorsque le séchoir fonctionne sans produit parce que l'air chaud qui provient de l'absorbeur est d'avantage réchauffé par la surface de captage supérieure en plexiglas qui lui transmet de l'énergie à partir du rayonnement solaire.
- . Lorsque le séchoir est chargé de produits, l'air chaud qui provient de l'absorbeur cède sa chaleur au produit placé sur les claies inférieures ; sur les claies supérieures cette perte d'énergie de l'air de séchage est compensée par l'énergie transmise par la surface de captage supérieure de telle sorte que dans le séchoir la température est presque identique d'une claie à l'autre.
- Les teneurs en humidité finale et les durées de séchage obtenues au cours des essais s'établissent comme suit :

Produits	Séchoir				hors du séchoir	
	version combinée		version solaire			
	durée (h)	% final en eau	durée (h)	% final en eau	durée (h)	% final en eau
6 kg de gombo	16	15	18	15	26	17,5
6 kg d'oseille	15	10	18	12	22	12

- Le fonctionnement du séchoir peut se faire à partir du rayonnement solaire comme à partir du foyer. Avec le foyer il est possible de faire le séchage à tout moment ou de façon complémentaire avec le rayonnement solaire lorsque celui-ci est faible.

Version combinée : nous avons utilisé cette expression pour décrire le séchoir lorsqu'il fonctionne à partir du rayonnement solaire quand celui-ci est fort et à partir du foyer lorsque le rayonnement solaire est faible.

CHAPITRE IV

ÉTUDE SOCIO-ÉCONOMIQUE

Dans ce chapitre nous traitons de l'impact socio-économique que peut avoir l'introduction du système au sein de la population. Nous nous plaçons dans le cadre d'une éventuelle implantation d'une unité de séchage solaire assisté par un foyer "ban ak suuf" pour suggérer une manière de l'introduire avec succès.

VI.1 - Implications sociologiques

L'introduction d'un nouveau système dans une société est susceptible d'avoir des incidences sociologiques particulièrement importantes surtout lorsque le système concerne l'alimentation. Les effets peuvent aller de totalement négligeables, à très bénéfiques pour des produits de consommation courante comme le gombo, l'oseille etc...

Les conséquences dépendent surtout de la façon dont le système est introduit.

Des enquêtes simples sur les préférences des consommateurs doivent être conduites au préalable en vue de recueillir des renseignements généraux sur les modes d'acquisition et d'utilisation du gombo ou de l'oseille etc.. chez les populations où ces produits entrent dans le régime alimentaire.

Par exemple, ce sondage donnerait des indications sur la demande potentielle en gombo séché, sur les caractéristiques de qualité telles que la propreté, la couleur..... sur le prix que les consommateurs sont disposés à payer, sur une estimation de la fréquence des achats.

En outre une enquête bien menée rassurerait les investisseurs éventuels et faciliterait l'obtention de crédits pour l'implantation de l'unité.

Nous suggérons le formulaire suivant dont l'objet principal est de déterminer s'il existe un marché potentiel pour le gombo séché.

Un test d'échantillon de produit séché est nécessaire pour permettre au consommateur de faire une comparaison avec le produit séché directement au soleil.

IV.2 - Implications économiques

Les avantages économiques du système de séchage sont considérables ; on peut mentionner que

- le procédé utilisé évite les pertes de produits encourues normalement à cause des oiseaux, des insectes.... et assure une durée de séchage plus brève, des conditions d'hygiène, un taux d'humidité final plus faible qui permet une plus grande possibilité de conservation du produit.
- l'assistance du séchoir par un foyer "ban ak suuf" donne au système une grande autonomie de fonctionnement par rapport au rayonnement solaire ; le séchage peut se poursuivre en dehors des périodes ensoleillées.
- la maîtrise du système peut permettre de planifier la production agricole ; ainsi au lieu de laisser les produits sécher au champ, une récolte hative pourrait permettre d'accroître les superficies disponibles pour d'autres cultures et d'améliorer la production grâce à un ensemencement plus hâtif de la récolte suivante.
- les pertes post-récoltes imputables aux grandes distances séparant les lieux de productions des marchés pourraient être sensiblement réduites ainsi que le coût de transport
- l'introduction du système pourrait contribuer à développer l'activité économique.

a) Décision d'investissement

Lorsque les enquêtes préliminaires ci-dessus indiquées auront été satisfaisantes il convient avant toute décision d'investir de chercher d'une part les fournisseurs potentiels de gombo (maraîchers.) Un accord formel ne doit pas être signé avec eux mais il est important d'évaluer les différentes sources d'approvisionnement possibles, de discuter avec elles de la qualité, des prix, des plans de livraison et du transport des produits.

D'autre part, il faut rechercher les débouchés potentiels, le but visé est de pouvoir créer plusieurs débouchés puisque l'on pourra palier au caractère saisonnier du gombo grâce à la possibilité de conservation que nous donne le produit séché. Les débouchés sont les marchands détaillants ou grossistes, les magasins de coopératives, et même certaines cantines d'établissements. Chaque débouché devrait être évalué suivant sa fiabilité.

b) le financement

C'est surtout le volume de la demande qui déterminera l'importance de l'unité. Elle pourrait être privée ou gérée par une coopérative de paysans ou être une entreprise d'état.

Selon son importance et quelle que soit la forme de son administration des capitaux sont nécessaires. Si l'unité est une entreprise publique la recherche de crédits ne s'impose pas ; dans le cas contraire où elle est privée ou gérée par une coopérative il faut contacter des établissements de crédit en prenant soin d'examiner les taux d'intérêt et les conditions de remboursement.

Le financement devrait comprendre le coût de réalisation des séchoirs mais également des fonds pour couvrir les frais de fonctionnement d'une partie de la première année.

. Coût estimatif de construction d'un séchoir

Le tableau suivant donne les prix des matériaux utilisés dans la construction d'un séchoir, le coût de la main-d'oeuvre est obtenu à partir du B.C.O.P. numéro 0.1/85, la durée de la construction d'un séchoir est évaluée à 16 heures soit deux journées de travail.

matériaux	dimensions	prix unitaire Cfa	besoin	prix total
contre plaqué	1,5 X 3,5 X 0,015	10.000		10.000
feuille d'acier	1 X 2 X 0,001	8.000	1	8.000
feuille de plexiglas	1,5 X 2 X 0,002	40.000	$\frac{1}{3}$	14.000
cornière de 25	6 m	5.000	$\frac{1}{2}$	2.500
tubes carré 30	6 m	3.500	$\frac{1}{6}$	585
charnière		200	4	800
1 foyer		5.000	1	5.000

main d'oeuvre	coût/heure	nombre d'heures	coût total de la main-d'oeuvre
casernement	350	8	2 800
atelier mécanique	350	8	2 800
Coût total			45.820

Pour tenir compte des dépenses pour le matériel non comptabilisé (toile moustiquaire, laine de verre....) nous majorons le coût total de 10 % ; ce qui porte le coût d'un séchoir solaire assisté par un foyer "ban ak suuf" à environ 50.000 francs.

● Bulletin de la Commission d'Officialisation des prix

c) gestion de l'unité de séchage

L'exploitation des séchoirs n'est pas compliquée ; un petit thermomètre introduit dans le séchoir sera d'une très grande utilité car les limites de températures maximum que les produits peuvent supporter doivent être respectées pour éviter le croûtage c'est-à-dire un séchage superficiel du produit qui empêche le séchage de se poursuivre vers l'intérieur de celui-ci.

Exemple de températures maximum (22)
de quelques produits

Produits	températures maximales
Gombo	66 °C
oseille	60 °C
ail	60 °C
oignon	71 °C
raisin	88 °C

Nous recommandons l'usage de la feuille de travail suivante

Produit	_____
Date de chargement	_____
Poids frais	_____
Date prévue de déchargement	_____
Date effective de déchargement	_____
Poids sec	_____
Commentaires	_____

Ceci permettra de suivre les comportements des séchoirs, d'apporter tout l'entretien approprié qui du reste consiste principalement à garder les claies, les surfaces de captage, le foyer et le conduit de fumée propres. On pourra peindre l'ensemble du séchoir une fois par an.

Une feuille de gestion des stocks hebdomadaire permettra d'assurer l'équilibre entre les quantités de produits vendus et ceux disponibles en entrepôt en y faisant tous les relevés utiles.

CONCLUSION

ANNEXE

Il est important de noter que ce projet de recherche sur un séchoir solaire est le premier mené à l'Ecole Polytechnique de Thiès ; son originalité tient de l'assistance du séchoir par un foyer "ban ak suuf".

Les expériences menées ont mis en évidence

- la possibilité du séchoir de fonctionner avec le rayonnement solaire uniquement lorsque celui-ci est élevé,
- la possibilité du séchoir de fonctionner correctement en dehors des heures d'ensoleillement grâce au foyer,
- la possibilité d'associer les deux sources de chaleur de manière complémentaire.

C'est ainsi que sur un échantillon de 12 kilogrammes de produit les durées de séchage et les taux d'humidité finale obtenus suivant les modes de fonctionnement sont respectivement :

- mode solaire Δt : 18 heures ϵ % : 15
- mode combinée Δt : 16 heures ϵ % : 10
- mode traditionnel d'exposition direct au soleil
 - Δt : 26 heures ϵ % : 17,5

Par rapport au séchage traditionnel dont les inconvénients vont des mauvaises conditions d'hygiène, aux pertes dues aux oiseaux et insectes en passant par l'intermittence du rayonnement solaire qui conditionne la durée de séchage et le taux d'humidité final généralement non propice à une bonne conservation du produit, le système de séchage assisté par un foyer "ban ak suuf" montre une souplesse permettant de l'adapter à toutes les conditions atmosphériques, et par suite une grande autonomie autorisant une planification des opérations très facile.

Ses implications socio-économiques sont importantes et très avantageuses et l'on devrait envisager sérieusement de recourir à ce procédé de séchage dans nos pays pour plusieurs raisons :

- possibilité de diminuer les pertes : on estime généralement à environ 20 % les pertes causées par les oiseaux, les insectes, les moisissures dans le procédé traditionnel. Ce qui représenterait pour un pays sahélien comme le Sénégal qui produit par exemple environ 60 000 tonnes de niébé/an un manque à gagner de 12 000 tonnes !!!
- possibilité de conservation plus grande permettant de disposer du produit toute l'année
- possibilité de planifier la production agricole
- possibilité de création de coopératives de séchage qui accroîtraient l'activité économique.

Les avantages économiques sont si considérables pour nos pays que nous recommandons que l'Ecole Polytechnique fasse une option sérieuse pour les systèmes de séchage de produits alimentaires dans ses recherches.

Les résultats que nous avons obtenus durant la période d'expérimentation (Février, Mars et Avril) sont encourageants et les expériences méritent d'être poursuivies pendant toutes les périodes de l'année en vue d'avoir une idée précise des performances du système : en effet les conditions atmosphériques qui sont des paramètres importants varient d'une expérience à l'autre et ne peuvent pas être reproduites comme dans un laboratoire : seule une longue **expérimentation** dans le temps permettra de définir correctement les **modifications utiles** à apporter au design pour améliorer les performances du système.

L'appréciation technico-économique du séchoir révèle que son coût de construction est assez élevé. Dans des travaux futurs d'autres matériaux pourraient être testés ; par exemple le remplacement de la

laine de verre par de l'herbe sèche ; la possibilité de construction de support en maçonnerie diminuerait considérablement le coût mais vendrait le séchoir fixe ; cet aspect dépend de l'usage que l'on voudrait faire du séchoir. La construction du foyer peut être faite sans le concours de spécialiste : en annexe nous donnons une documentation du CERER sur la construction du "ban ak suuf". Tout ceci rabaisserait le coût de réalisation à environ : 40.000 francs.

Les expériences de séchage effectuées ont permis de constater que le potentiel énergétique de l'air de séchage pourrait être augmenté en diminuant d'avantage les pertes par les parois, en augmentant la surface de contact entre l'absorbeur et le conduit de fumée.

LES CUISINIÈRES "BAN AK SUUF"⁸²



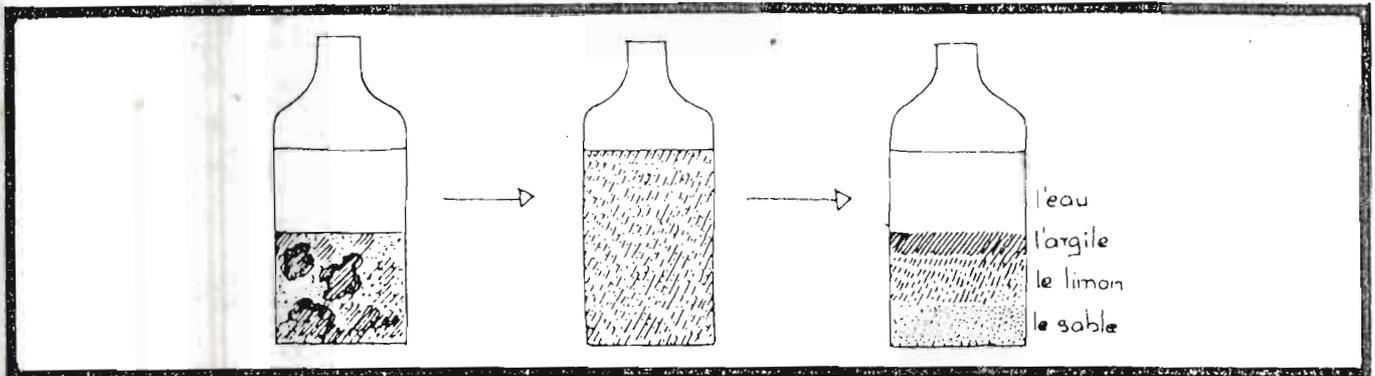
Centre d'Etudes et de Recherches sur les Energies Renouvelables
Université de Dakar - République du Sénégal

TESTS DE L'ARGILE

On fait des tests de l'argile du sol pilée et tamisée pour connaître son degré de pureté :

- s'il y a beaucoup d'argile dans le sol, il faut rajouter beaucoup de sable dans le mélange
- s'il y a seulement un peu d'argile il suffit d'ajouter un peu de sable dans le mélange

Test avec de l'eau



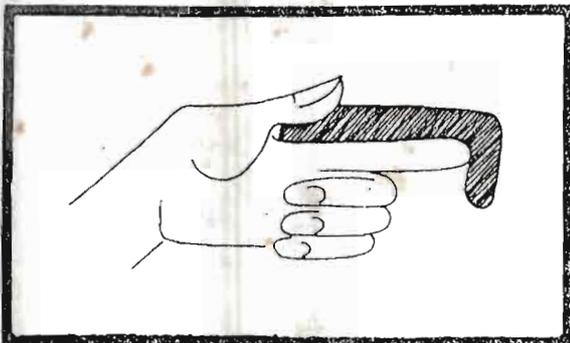
On met dans une bouteille une moitié d'argile du sol pilée et une moitié d'eau

On agite la bouteille

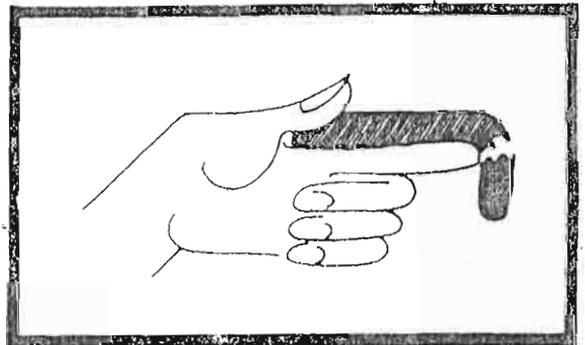
Au bout d'une heure le sable commence à se déposer au fond de la bouteille. Au bout de un ou deux jours sans toucher la bouteille, on peut observer le résultat

Test du Batonnet

On forme une sorte de batonnet en ajoutant un peu d'eau à de l'argile et en la roulant avec ses mains et on essaye de la faire tenir comme c'est montré sur le dessin



beaucoup d'argile peu de sable dans le sol



beaucoup de sable peu d'argile dans le sol

Il faut ensuite tamiser l'argile pilée



Et il faut aussi tamiser le sable qu'on utilisera. Il est préférable de balayer l'endroit choisi pour la préparation des matériaux.



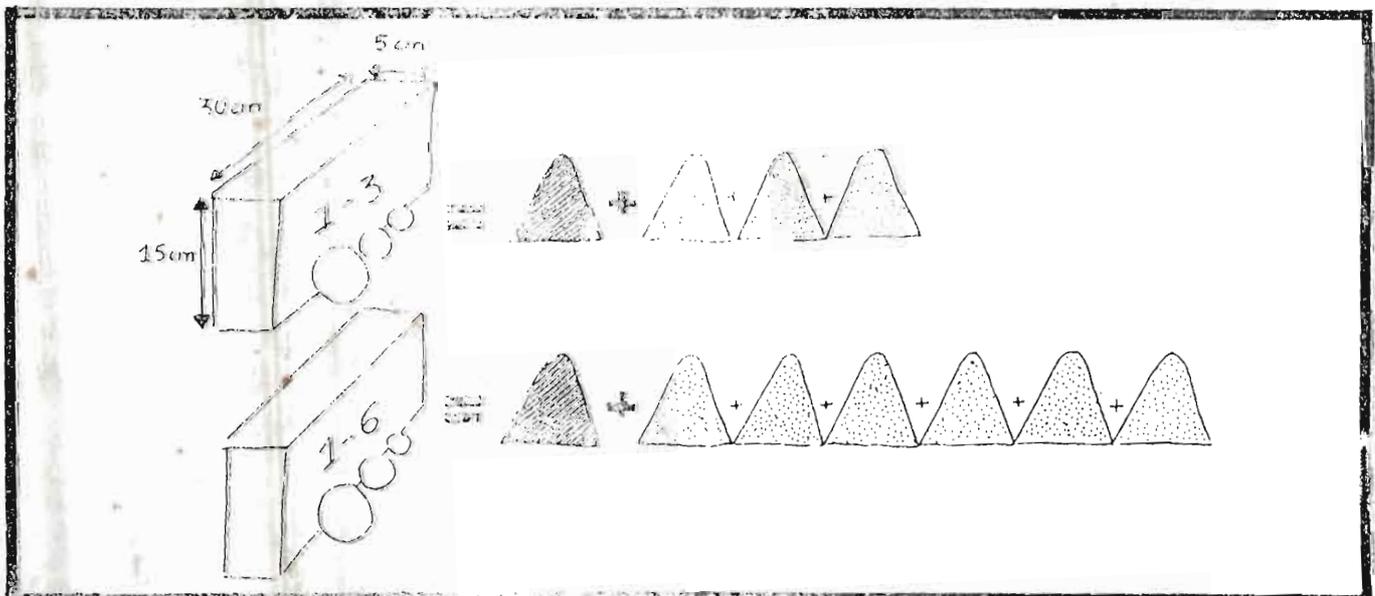
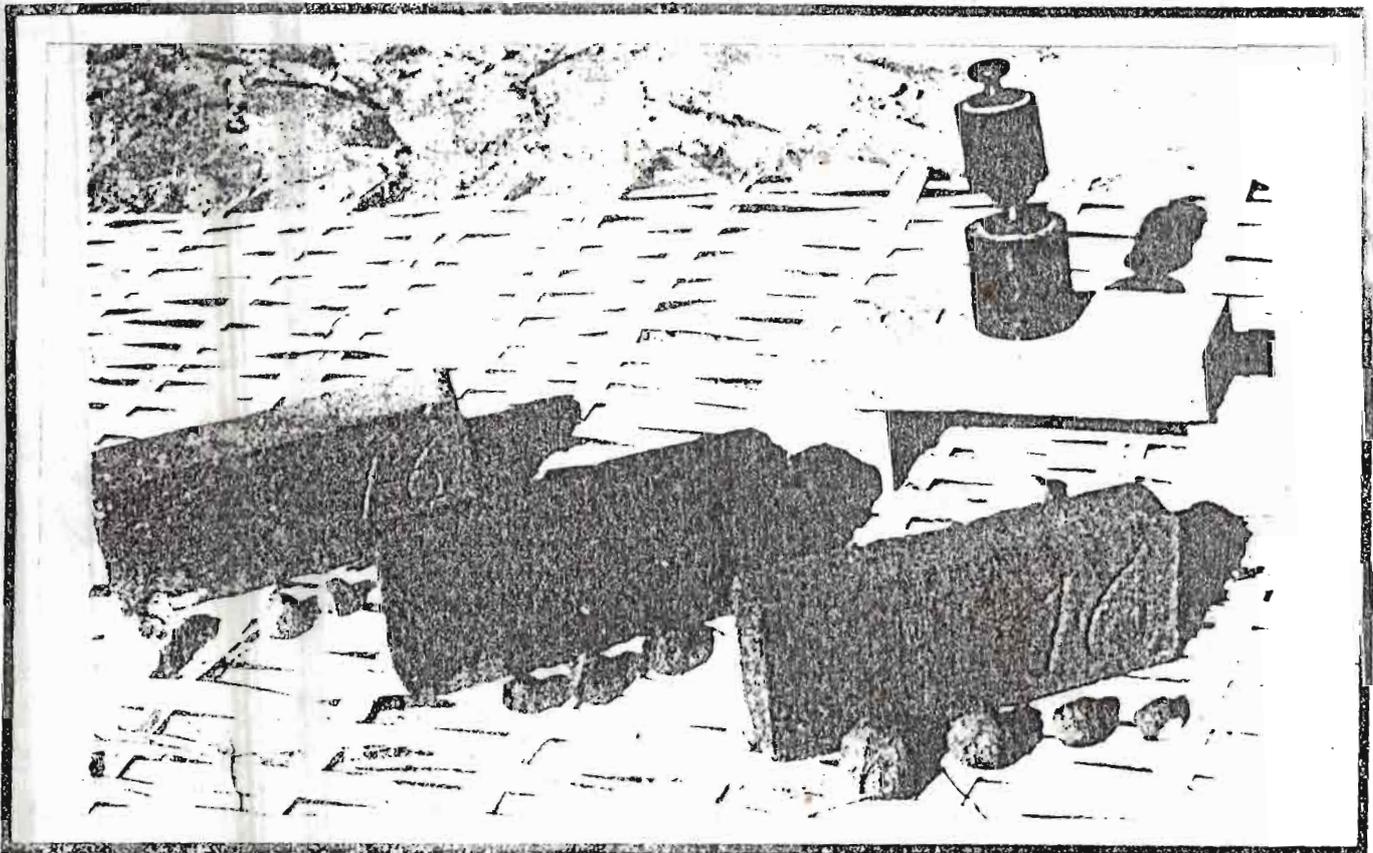
TESTS DU MELANGE

On fait maintenant des tests pour déterminer les proportions d'argile du sol et de sable qui donnent le bon mélange.

Tests des briques et des boulettes :

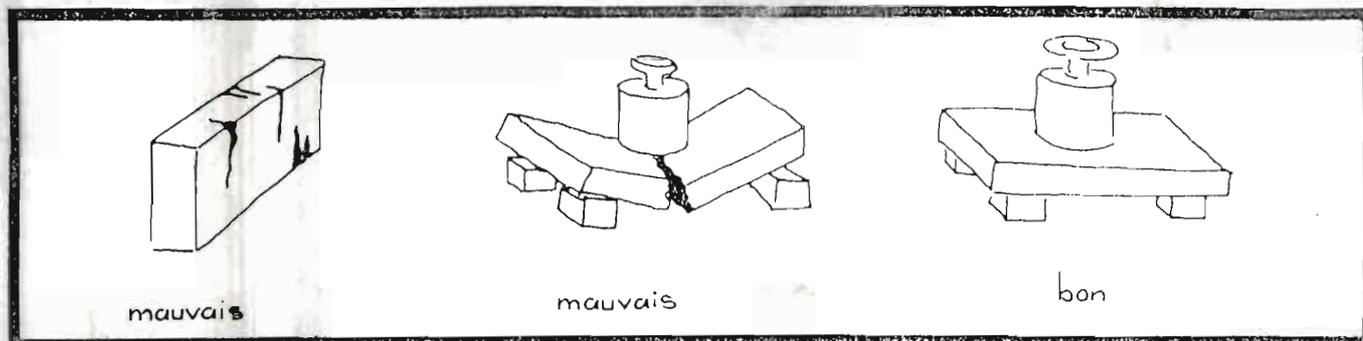
On prépare plusieurs mélanges qui contiennent différentes proportions d'argile du sol et de sable.

On fabrique une brique et plusieurs boulettes de chaque mélange en écrivant bien sur la brique les proportions utilisées.



Les résultats :

On laisse sécher les briques et les boulettes pendant 2 jours.



Si la brique craque ou se fissure le mélange est mauvais.

On fait aussi des essais de résistance à la charge.

On cuit les boulettes en les mettant dans un feu.



Si la boulette s'effrite, le mélange est mauvais.



Tests avec la main :

On prend un peu de mélange dans la main. Quand on retourne la main, le mélange doit tomber sans laisser de traces sur la main.

Sinon il faut ajouter du sable dans le mélange et recommencer.

LE MELANGE

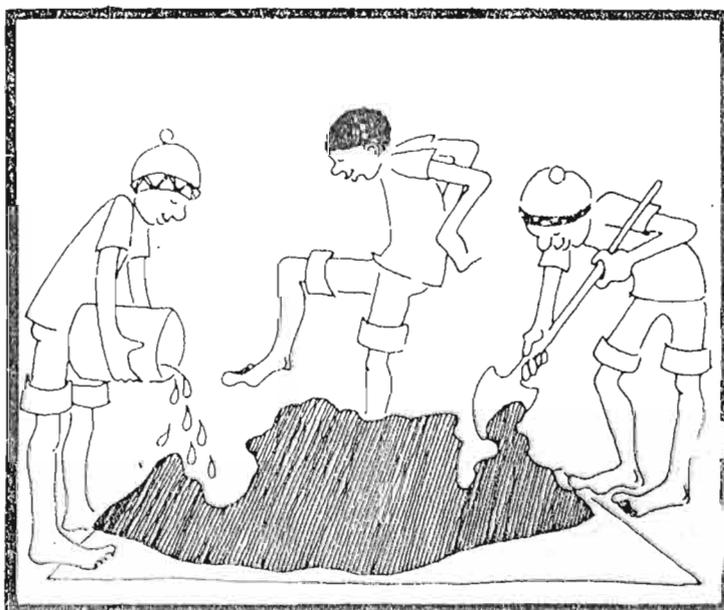
Si on a trouvé que le meilleur mélange est par exemple une part d'argile pour 4 parts de sable, on prépare le matériau suivant ces propositions : par exemple 1 seau d'argile plus 4 seaux de sable.



On mélange l'argile et le sable et c'est beaucoup plus facile et plus efficace de le faire **sans mouiller** les matériaux.

Il faut aussi choisir un endroit propre pour préparer le mélange (soit une natte, soit une dalle de ciment).

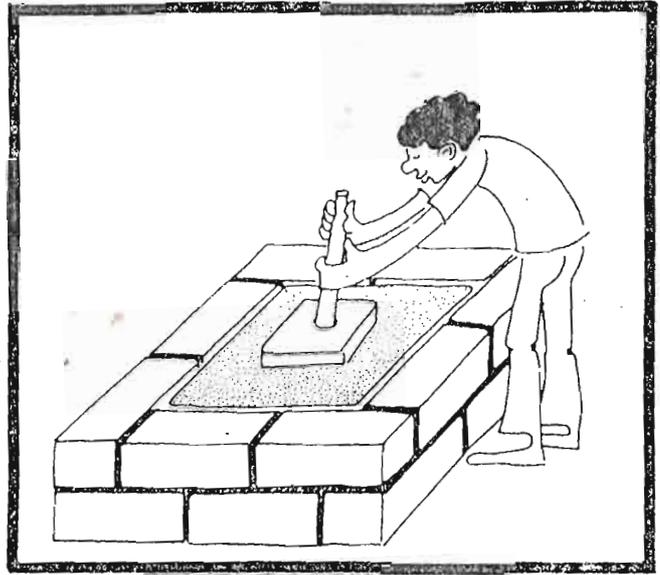
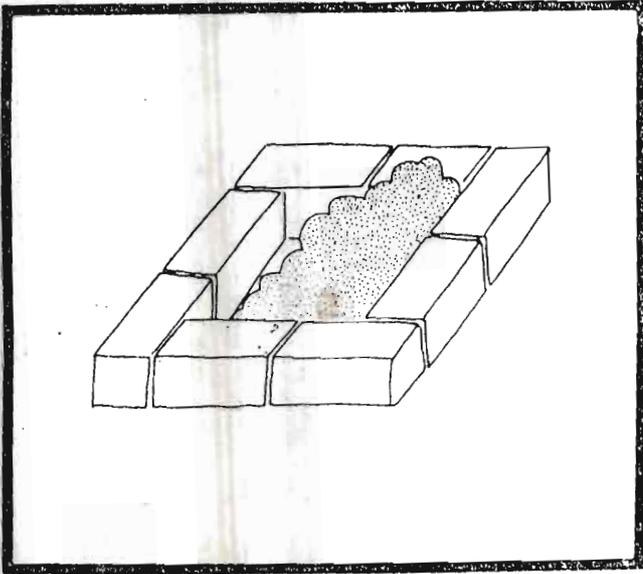
Après avoir fini de mélanger argile et sable, on ajoute de l'eau douce jusqu'à ce que le matériau soit bon.



LA CONSTRUCTION

Le socle :

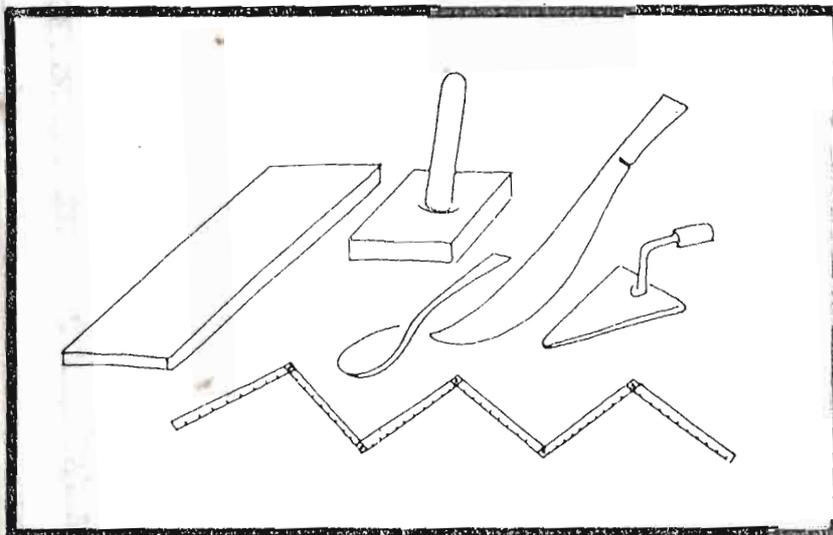
On fabrique d'abord un socle avec quelques briques et on peut choisir la hauteur du socle que l'utilisatrice préfère.



On remplit l'intérieur du socle avec de l'argile ou du sable bien tassé. Pour que les briques collent mieux on utilise le mélange comme mortier.

On peut faire le socle à la hauteur que l'on veut avec une ou deux rangées de briques.

Les outils nécessaires à la construction :



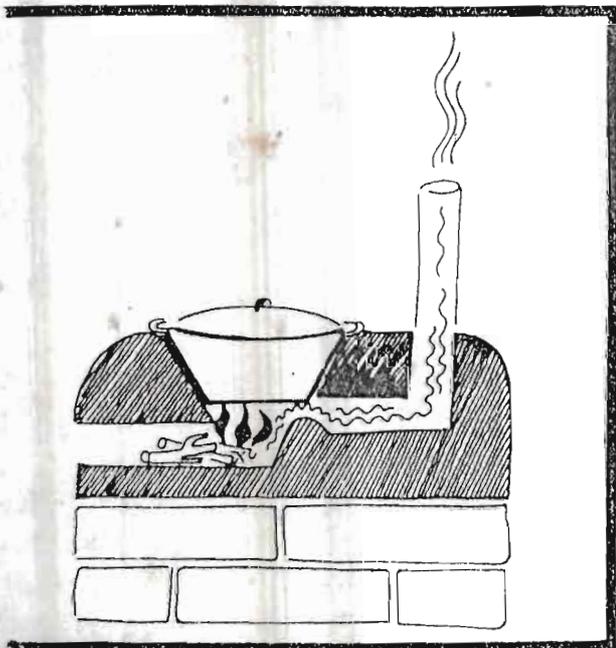


On construit la cuisinière «BAN AK SUUF» autour de la marmite et d'une boîte à conserve ou d'un morceau de bois qui doivent avoir les dimensions de la cheminée prévue (10 à 20 cm de diamètre). Au fur et à mesure qu'on ajoute du mélange on relève un peu à chaque fois la marmite et la boîte de conserve.

Une fois qu'on est arrivé à la hauteur souhaitée on enlève la marmite et la boîte de conserve, on égalise les surfaces et on peut commencer à creuser les tunnels.



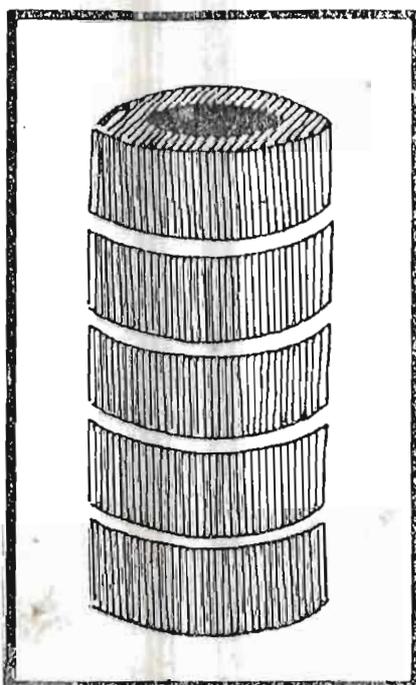
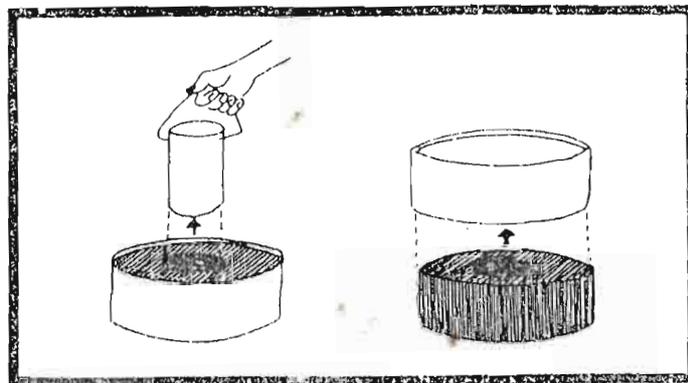
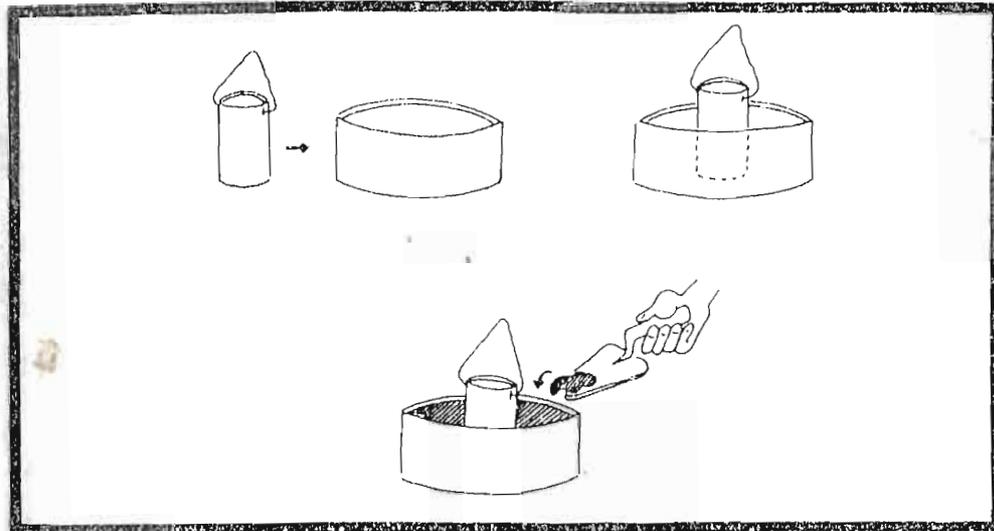
A la fin le fourneau est comme ci-contre : vue en coupe.



On fait les formes intérieures de la cuisinière de façon à ce que les flammes et la fumée viennent lécher la marmite au lieu de s'échapper directement par la cheminée.

La cheminée

On peut construire la cheminée avec le même matériau : argile et sable. On utilise la même boîte de conserve que précédemment et une autre plus grande et ouverte des deux côtés.

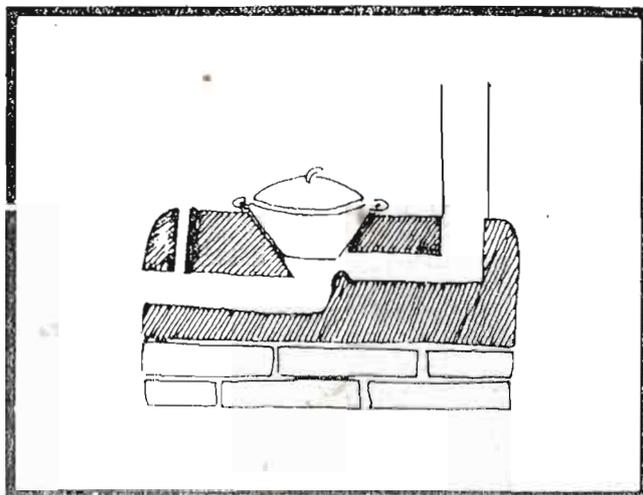
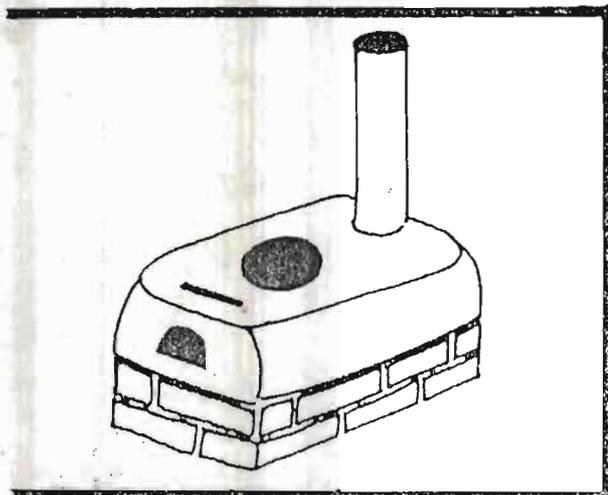
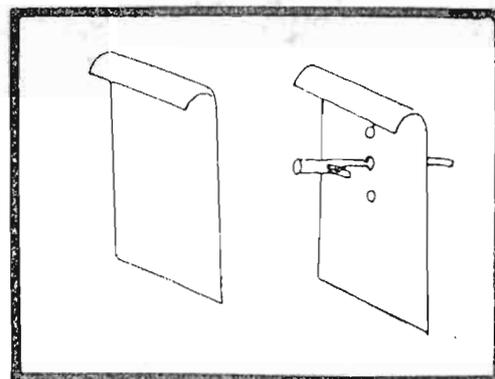


On fabrique le nombre d'éléments de cheminée nécessaire pour obtenir la hauteur que l'on veut. On les assemble avec le mélange.

On peut aussi utiliser d'autres matériaux pour la cheminée ex : tuyaux, boîtes de conserve, tôle roulée.

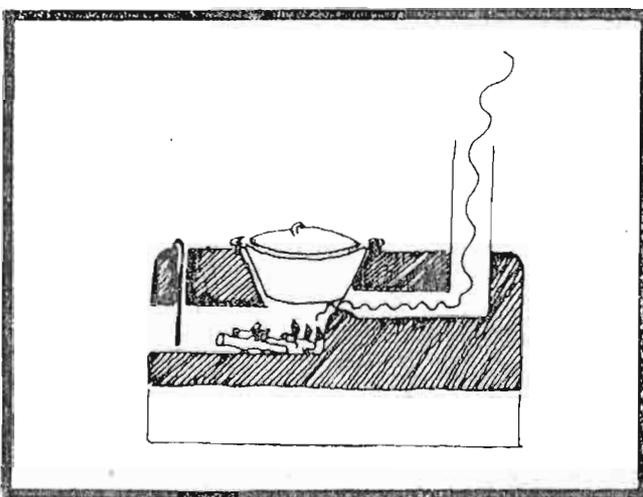
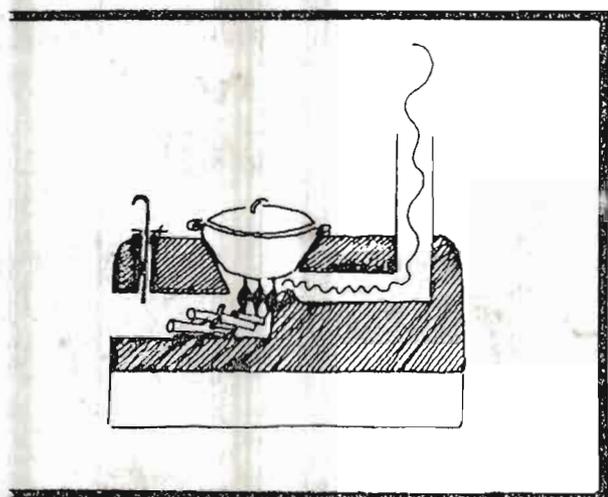
On utilise la porte pour pouvoir régler la force du feu. En effet pour régler le feu on doit régler la quantité d'air qui entre et qui passe dans la cuisinière.

On fabrique la porte avec un morceau de tôle. On peut la percer à plusieurs niveaux, ce qui permet de régler sa position avec un batonnet.



Si on ouvre les portes la force du feu devient plus grande, il donne beaucoup de chaleur et le bois brûle très vite.

Si on referme la porte un peu le feu brûle plus lentement.

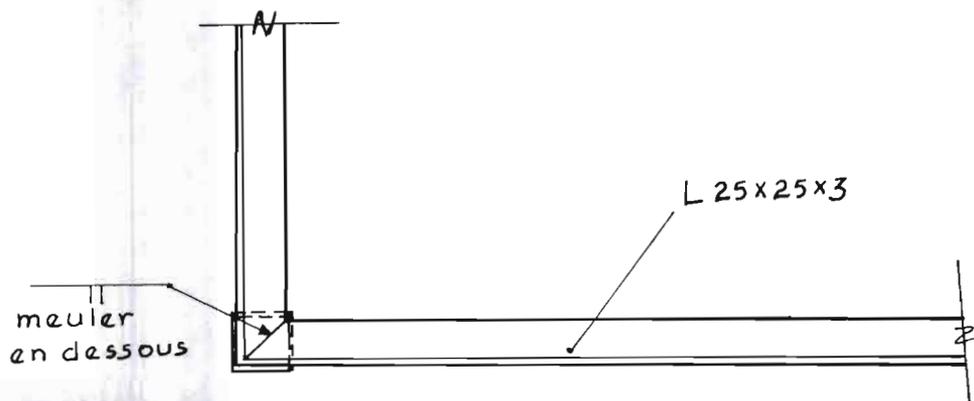
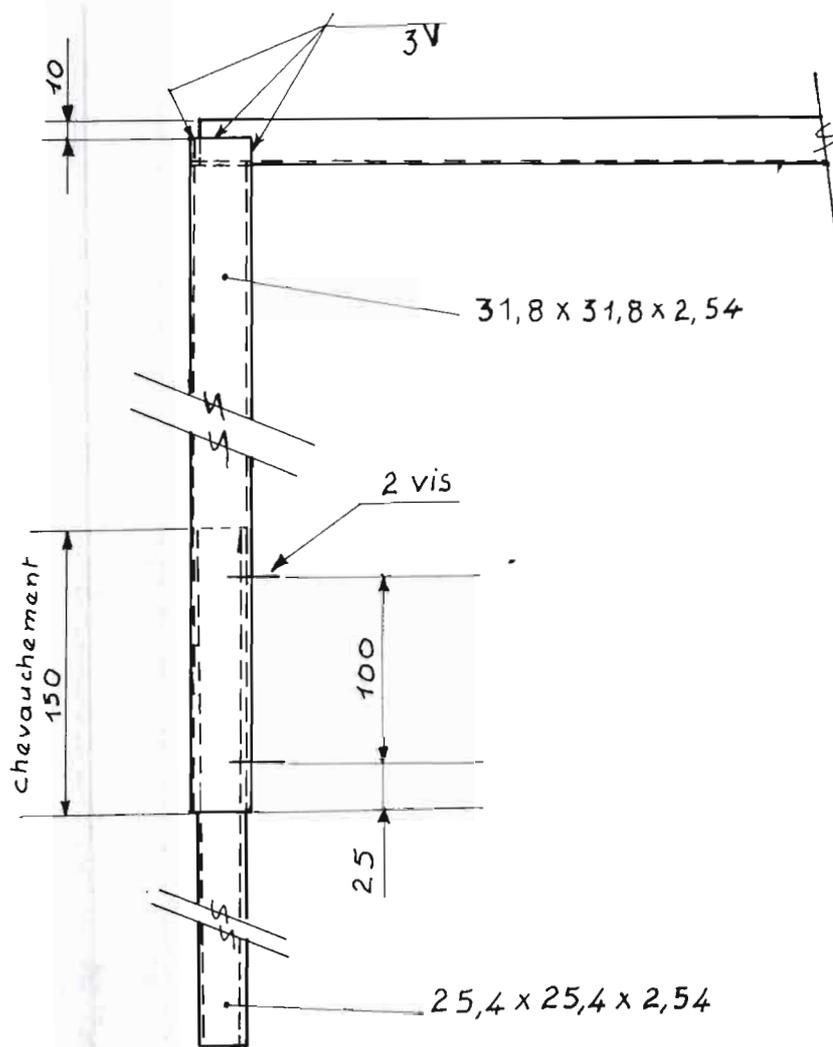


BIBLIOGRAPHIE

- (1) - Solar Energy Thermal Processus
JOHN DUFFIE & WILIAM A. BECKMAN
A Willey - Interscience publication - 1974
- (2) - Le séchage des produits alimentaires
GORDON YACIUK
CRDI - 1981
- (3) - Chauffage sanitaire au solaire
EL OUALID SOW
Projet de fin d'étude - 1980-1981 -
- (4) - Handbook of Steel Construction
CANADIAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION
3e édition - 1981
- (5) - Elément de calcul d'une installation de chauffage
DOMINIQUE WEIGEL & JACQUES GUIBOURT
Edition Eroylles, 8e édition 1975
- (6) - Handbook of Fundamentals
ASHRAE - 1977
- (7) - Handbook & Products Directory
ASHRAE - 1975
- (8) - Conception et réalisation d'un stérilisateur solaire
ELIMANE MBENGUE
Projet de fin d'études 1984
- (9) - Potentiel solaire du Sénégal
ANDRE GAUTHIER & BOCAR SY
CERER - 1983

- (10)- Traité de chauffage et de climatisation tome 1
H. RIETSCHER
Edition DUNOD - 1973
- (11)- Guide du moniteur et du technicien en chauffage
RAYMOND MOULY & ROGER GAVELLE
Edition Eroylles 9e édition 1974
- (12)- Génie chimique - transfert de chaleur, transfert de matière
TECHNIQUE DE L'INGENIEUR
ISTRA 3e édition 1967
- (13)- Principles of thermodynamic and heat transfer applied to solar énergy
FRANK KREITH, P.E | JAN F. KREIDER, P.E
Hémisphère Publishing Corp, Washington D.C, 1978
- (14)- Cuisinières "Ban ak suuf"
CERER
- (15)- Agricultural and other low temperature applications of solar energy
T.A LAWAND
Brace Research Institute - Montréal, Québec
- (16)- Notes de cours de géométrie descriptive
DESMARQUEST MAURICE
1981
- (17)- Cours de dessin industriel
R. MACHERET
Dunod 6e édition
- (18)- Notes de cours de conditionnement d'air
Jan Drozd
1985
- (19)- Notes de cours de transfert de chaleur
DINH VO NGOC
1983

- (20)- L'adière pilon
PAUL EASTMAN
CRDI 1982
- (21)- solar grain dryer
VOLUNTEERS IN TECHNICAL ASSISTANCE
Maryland 20822 USA
- (22)- Comment fabriquer un séchoir pour produits agricoles
INSTITUT DE RECHERCHES BRACE
Collège Mac Donald de l'Université Mc-Hill
Ste Anne de Bellevue 800 Québec, Canada
- (23)- Notes de cours de construction métallique
THOMAS AQUIN
1985
- (24)- Source énergétique de remplacement et espoir solaire
Pr. M PERROT
Fondation de la COMPLES
- (25)- Chauffage-froid
TECHNIQUE DE L'INGENIEUR
ISTRA - 1977
- (26)- Récupérateurs et régénérateurs de chaleur
VICTOR V. GHIA
Edition Eroylles 1970
- (27)- Solar Thermal engineering
J. LUNDE PETER
John Wiley & Sons
- (28)- Modern Stoves for All
WACLAW MICUTA
Fondation de Bellerive - 1981.



ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES

détails d'assemblage du support

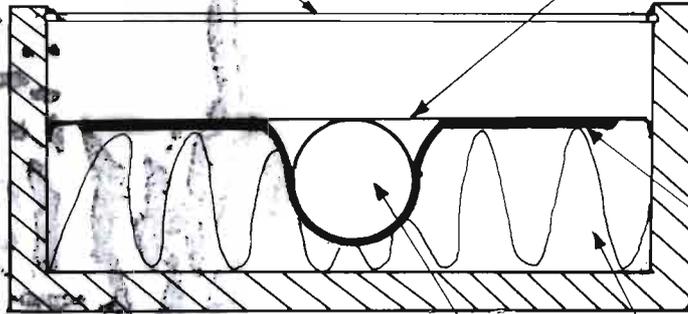
Dessiné par <u>A.E. SAWADOGO</u>	Matricule <u>450</u>
Groupe <u>MECANIQUE</u>	
Date <u>12-05-85</u>	Echelle <u>1/4</u>
N° de TP ou d'examen:	

2

2

plexiglas

absorbeur



ailette

conduit de fumée

laine de verre

contre-plaque



1

1

ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES

Dessiné par A. E. SAWADOGO

Matricule 450

détails de montage de l'absorbeur

Groupe MECANIQUE



Date 12-05-1985

Echelle

N° de TP ou d'examen

B



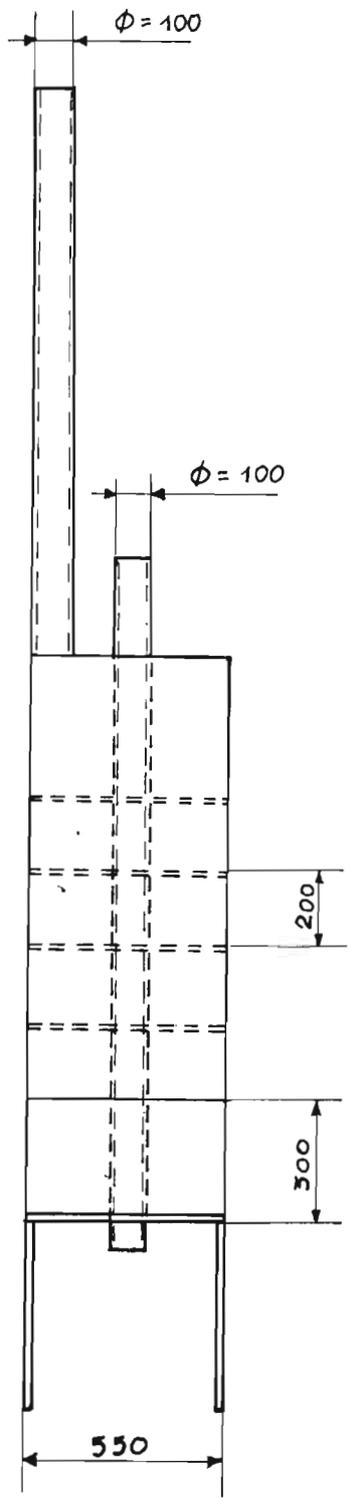
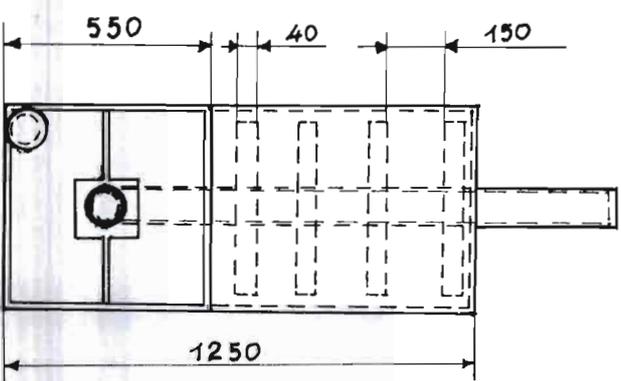
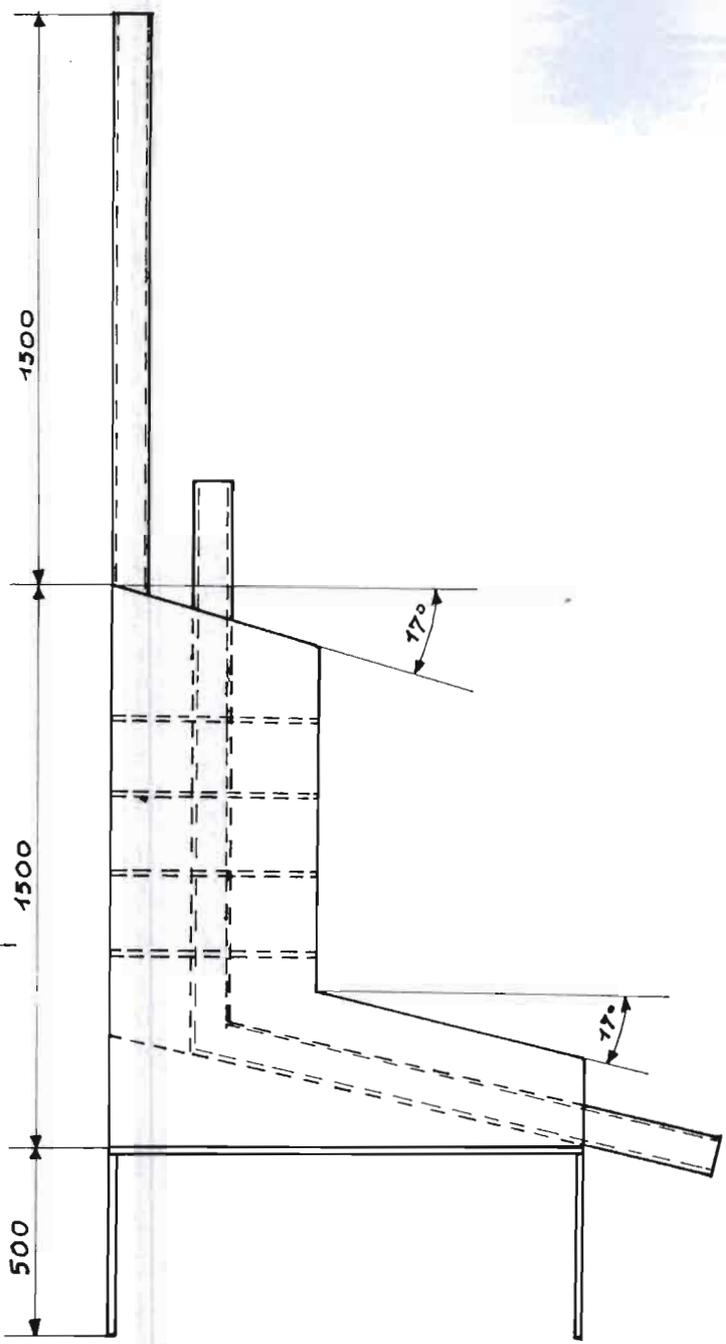
A

2

B

A

2



1

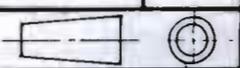
ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES

Dessiné par A. E. SAWADOGO

Matricule 450

PROJET : étude d'un séchoir solaire
dimensions

Groupe MECANIQUE



Date 12-05-85

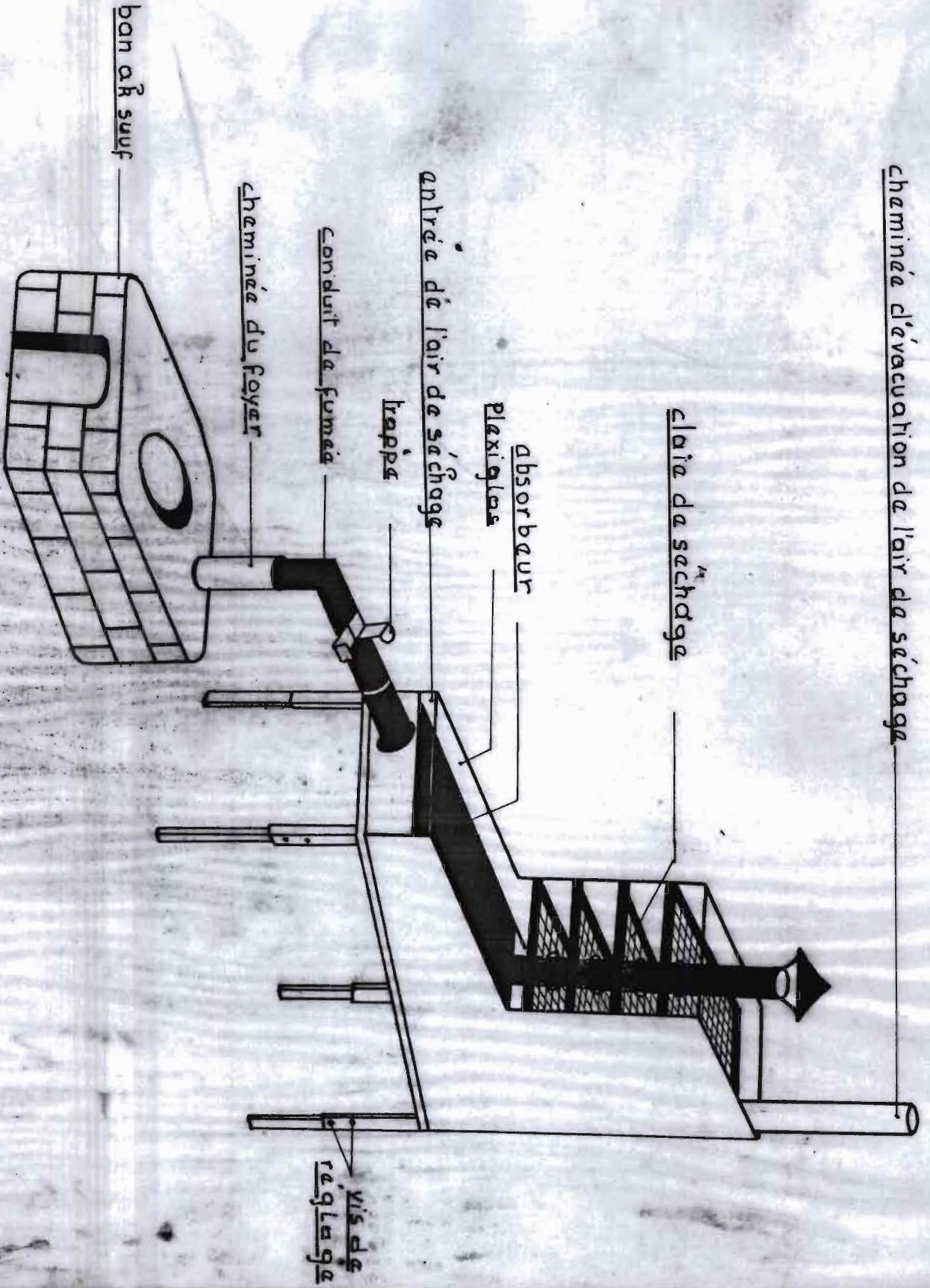
Echelle 1/10

N° de TP ou d'examen :

B



A



ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES

Dessiné par A. E. SAWADOGO

Matricule 450

PROJET : étude d'un séchoir solaire
vue d'ensemble

Groupe MECANIQUE



Date 12-05-05

Echelle