

Jullien

ETUDE DE FAISABILITE
SECHOIR SOLAIRE A BOIS
DE POINTE NOIRE - O.N.F. GUADELOUPE

GERDAT/CEEMAT
G.R.E.P.S./U.T.C.

ETUDE DE FAISABILITE
SECHOIR SOLAIRE A BOIS
DE POINTE NOIRE - O.N.F. GUADELOUPE

A. THEMELIN
P. DAVID
M. LE CHAPPELLIER

GERDAT/CEEMAT
G.R.E.P.S./U.T.C.

29 NOVEMBRE 1983

S O M M A I R E

INTRODUCTION

I - IMPLANTATION GENERALE AU SEIN DU HANGAR DE STOCKAGE

- I.1.- Conception de la cellule (étuve à bois) à convection forcée
 - I.1.1.- Dimensionnement de l'étuve
 - I.1.2.- Aménagement de l'étuve
 - I.1.3.- Gamme de débit et pression de service de chaque ventilateur
 - I.1.4.- Conception de la cellule.

- I.2.- Besoins énergétiques de la cellule
 - I.2.1.- Données sur le Mahogani (Swietenia Marcophylla)
 - I.2.2.- Volume de bois et quantités d'eau mis en jeu lors du séchage
 - I.2.3.- Calcul des besoins énergétiques
 - I.2.4.- Bilan total

- I.3.- Première évaluation de la surface de captation nécessaire
 - I.3.1.- Contraintes d'aménagement
 - I.3.2.- Evaluation

- I.4.- Conception de la cellule 2 (autonome)
- I.5.- Approche technologique

II - MODELISATION DES TRANSFERTS REGISSANT LE FONCTIONNEMENT DU SECHOIR

- II.1.- Détermination des courbes d'ensoleillement
- II.2.- Caractéristiques des capteurs
- II.3.- Déperditions surfaciques
- II.4.- Inertie du bâtiment
- II.5.- Courbe de séchage
- II.6.- Résultats
- II.7.- Régulation et conduite du séchoir

III - TECHNOLOGIE DE CONCEPTION ET DE REGULATION DU SECHOIR

- III.1.- Installation aéraulique
- III.2.- Brassage de l'air
- III.3.- Circuits solaires
- III.4.- Renouvellement d'air
- III.5.- Régulation

ETUDE D'UN SECHOIR SOLAIRE A BOIS A POINTE-NOIRE - GUADELOUPE
PROJET D'IMPLANTATION RELATIF A LA CONVENTION D'ASSOCIATION
O.N.F.-G.R.E.P.S.-C.E.E.M.A.T./G.E.R.D.A.T. JANVIER 1983

-O-O-

INTRODUCTION

L'analyse bibliographique des différentes réalisations de séchoirs solaires à bois à travers le monde révèle une concurrence étroite vis à vis du séchage naturel à l'air libre entre l'état vert et le point de saturation des fibres ($\sim 30\%$ d'humidité), impliquant de plus des durées de séchage sans commune mesure avec un séchage artificiel à air chaud d'un bois vert à 10% environ d'humidité finale (1).

Devant le problème posé par la direction régionale de l'O.N.F. de Guadeloupe, nous sommes ainsi attachés aux points principaux suivants :

- séparation dans l'espace de la zone de captation du rayonnement solaire de l'étuve de séchage du bois proprement dite ; les deux phases, génération d'air chaud et séchage des débits de sciage, exigeant chacune des impératifs spécifiques de fonctionnement.

- des deux zones réservées à l'emplacement des étuves, la plus grande sera occupée par une cellule à convection forcée, devant sécher des débits verts de Mahogani de 60 à 12% d'humidité. L'accent est particulièrement mis à ce niveau sur la répartition homogène des flux d'air à l'intérieur de la pile de bois. La seconde réservation sera occupée par une cellule devant assurer un séchage de finition de 30 à 12% d'humidité finale ; le fonctionnement en autonomie désiré par l'O.N.F. est envisagé soit en convection naturelle, soit en convection forcée à l'aide de ventilateurs de reprise alimentés par des panneaux de cellules photovoltaïques.

- enfin, la surface de captation est aménagée à l'aide de capteurs solaires à air, disponibles sur le marché et de performances connues et fiables, dont les débits de ventilation seront compatibles avec l'obtention de rendements thermiques acceptables.

Ces considérations ont abouti à l'élaboration du protocole d'accord régi par la convention d'association entre la direction régionale de l'O.N.F. Guadeloupe, le G.R.E.P.S., et le G.E.R.D.A.T. représenté par le C.E.E.M.A.T.

I - IMPLANTATION GENERALE AU SEIN DU HANGAR DE STOCKAGE

1. Conception de la cellule (étuve à bois) à convection forcée

L'étuve 1, équipée de ventilateurs, peut accueillir à priori deux piles de bois, disposée chacune sur un chariot mobile, de dimensions standard :

$$L = 3,00 \text{ m} \times l = 1,40 \text{ m} \times H = 2,20 \text{ m}$$

Les piles sont constituées de planches jointives de 30 mm d'épaisseur, baguettées avec des épingles de 25 mm x 25 mm de section, espacées de 0,50 m ; soit un total de 7 épingles par longueur de pile, délimitant 6 espaces d'air de 0,025 m x 0,471 m .

Chaque pile repose sur un chariot mobile sur rails de guidage, pouvant ainsi accéder à la zone commune de manutention (implantée entre les deux étuves).

1-1 - Dimensionnement de l'étuve

Comme sur le projet initial, l'étuve n° 1 sera implantée côté Ouest (O) de la partie du hangar réservée à l'implantation des deux étuves (partie séchoir).

La surface au sol disponible (à priori hors tout) à la mise en place de l'étuve proprement dite est délimitée :

- au nord par le couloir surélevé de la chappe béton de la partie HANGAR

- à l'Est au Sud et à l'Ouest par l'emplacement des piliers supportant la charpente (P₁₁, P₁₂, ... P₁₉, P₂₀)

Soit une surface hors-tout de :

$$L = 7,30 \text{ m} \times l = 3,40 \text{ m}$$

La hauteur disponible sous charpente est de 2,70 m.

Des considérations d'ordre technique, notamment visant :

- à un nombre minimal de ventilateurs pouvant assurer une pression de service compatible avec les pertes de charges créés par les circuits d'air (pertes linéiques et singulières dans la pile de bois, couloirs de ventilation)

- une répartition homogène de la vitesse de l'air à l'intérieur de la pile de bois

- une simplification de la régulation de la conduite du séchoir (donc du nombre et du type d'organes à commander) nous incitent à porter notre choix sur l'utilisation de ventilateurs centrifuges (radiaux)*, implantés dans un faux plafond.

La recherche d'un minimum de perturbations du régime d'écoulement entre la zone de divergence de sortie des ventilateurs et le bord d'attaque de la pile de bois nous incitent à prendre une hauteur de plafond égale à la largeur des couloirs (latéraux) de ventilation de l'étuve.**

En principe, les recommandations prescrites quant au dimensionnement des cellules (étuves) ventilées portent à prendre au minimum une largeur de couloir de ventilation égale au 1/3 de la hauteur de la pile ; ou mieux encore, égale à la somme des hauteurs de passage libre entre les planches (2).

Nous affinerons notre calcul en prenant en fait une largeur de couloir de ventilation (donc une hauteur de faux plafond) telle que la section de passage de l'air dans un couloir de ventilation soit égale à la somme des sections de passage de l'air dans la pile de bois, déterminées par les débits de 30 mm et les épingles carrées de 25 mm.

Nous considérons de plus que sur une largeur utile de 2 x 3 m (2 longueurs de pile de 3,00 m), afin de tendre au mieux vers une répartition uniforme de l'air sur toute la longueur et tenant compte de la disposition de la charpente, nous disposerons de 4 ventilateurs centrifuges ; chacun dispose d'une largeur de section ventilée de 1,50 m (sur un étage de 1,50 m de longueur de pile, 3 espaces libres pour le passage de l'air). Il nous faut donc respecter la condition suivante au point de vue hauteur :

$$x \times (0,030 + 0,025) + \frac{3 \times x (0,025 \times 0,471)}{1,5} + 0,08 + 0,5 + 0,20 < 2,70$$

hauteur effective
de la pile de bois

hauteur du faux
plafond

épaisseur hauteur
des tra- du
verses de chariot
support des rails pile et ba-
du faux
plafond

+
épaisseur
de la
toiture de
la cellule

* ou si la pression totale demandée est trop faible des ventilateurs hélicoïdes seront utilisés.

** Si l'encombrement de la charpente le permet.

avec x = nombre d'étage d'empilage d'épaisseur 0,030 m
(épaisseur des planches à sécher) + 0,025 m
(hauteur des épingles)

$$\text{soit } x < \frac{1,92}{0,07855} \quad \text{soit } x < 24,4$$

d'où $x = 24$

Donc dans ce type de configuration la hauteur effective de la pile de bois ne peut donc excéder :
 $24 \times (0,055 \text{ m}) = 1,32 \text{ m}$.

Compte tenu de la différence importante par rapport à la hauteur de pile souhaitée, soit 2,20 m, le plafond de la cellule sera placée au dessus du niveau de l'entrait médian A 23, le plafond à ce niveau contournera l'entrait médian A 23.

En tenant compte d'une épaisseur de panneaux en toiture de 0,12 m et d'un espace libre entre ces derniers et la pile de bois de 0,095 m au niveau de l'entrait médian A 23, la hauteur de la pile sera de 1,925 m, constituée d'un empilage de 35 étages d'épaisseur 55 mm.

D'où une répartition des sections sur le bord d'attaque de la pile.

Longueur utile : 3 m (1 longueur de pile)					
	Section latérale des planches de 0,030m d'épaisseur (1) (en m ²)	Section latérale des épingles de 0,025m d'épaisseur (2) (en m ²)	Section latérale occupée (1) + (2) (en m ²)	Section de passage de l'air (3) (en m ²)	Surface latérale de la pile (1)+(2)+(3)=4 (en m ²)
Sur un étage de 55 mm d'épaisseur	0,09	0,004375	0,094375	0,070625	0,165
Sur l'ensemble de la pile (35 étages) de hauteur : 1,925m	3,15	0,153125	3,303125	2,471875	5,775
Longueur utile : 6 m (2 longueurs de pile)					
Hauteur de pile : 1,925 m	6,30	0,30625	6,60625	4,94375	11,55

d'où un volume théorique des piles de bois de : $6,30 \times 1,4 = 8,82 \text{ m}^3$

En fait, il faut tenir compte d'un coefficient correcteur k du fait que les planches ne sont pas jointives. Ce coefficient varie de 0,85 à 0,95. Nous prendrons $k = 0,9$ pour l'ensemble des deux piles.

Ainsi, le volume réel maximal de bois défini par les deux piles sera de :

$$V = L \times l \times h \times \frac{e}{e + b} \times k$$

$$\text{soit } V = 2 \times 3,00 \times 1,40 \times 1,925 \times \frac{0,03}{0,055} \times 0,9 = (8,82) \times 0,9$$

$$V = 7,938 \text{ m}^3$$

Remarque : pour l'étuve 2, n'accueillant qu'une seule pile, nous prendrons $k = 0,95$.

Le coefficient d'empilage de l'ensemble des deux piles sera donc :

$$\frac{7,938}{11,55 \times 1,4} = 0,464$$

1.2. Aménagement de la cellule

La hauteur du faux plafond ou la largeur des couloirs latéraux de ventilation de chaque ventilateur (pour une longueur de 1,50 m) doit être telle que :

$$l \times 1,5 = 35 \times 3 \times 0,025 \times 0,471 = 1,236375 \text{ m}^2$$

$$l = 0,82 \text{ m}$$

Les côtes intérieures de l'étuve seront donc :

$$L = 6,00 + 0,10 \text{ (réservation face Est)} + 0,50 \text{ (réservation passage face Ouest)} = 6,60 \text{ m}$$

$$l = (2 \times 0,82) + 1,40 = 3,04 \text{ m}$$

La hauteur du faux plafond (face inférieure des panneaux de toiture et face supérieure du déflecteur horizontal parallèle à la pile et espacée de cette dernière de 0,095 m) sera exactement de 0,80 m, afin de rattraper la hauteur de l'entrée des capteurs solaires.

$$H_{\max.} = 0,08 + 0,50 + 1,925 + 0,095 + 0,80 - 0,12 \text{ (isolation sol)}$$

$$H_{\max.} = 3,28 \text{ m}$$

d'où un volume intérieur :

$$V = 6,6 \times \left[(3,04 \times 3,28) - \left(\frac{0,38 \times 0,53}{2} + \frac{0,60 \times 0,57}{2} \right) \right]$$
$$V = 63,89 \text{ m}^3$$

$$\text{d'où un coefficient de remplissage de } \frac{7,938}{63,89} = 0,124$$

Sur une largeur de couloir latéral de ventilation de 0,82 m, il nous faut vérifier que, pour une vitesse d'air de 2 m/s au niveau des planches à sécher, les débits attendus dans les divers espaces libres de la pile de bois soient identiques. C'est-à-dire que les pertes de charges attendues au niveau de ces espaces libres de circulation d'air, sur une longueur de 1,40 m, soient largement supérieures à celles relevées dans le couloir latéral de ventilation, sur une longueur de 1,925 m.

x (Voir Tableau de la page suivante).

Dans un rapport de pertes de charges de 1 à 35., on peut donc s'attendre à une assez bonne répartition des débits d'air dans la pile de bois, c'est-à-dire des vitesses d'air de l'ordre de 2 m/s au niveau de toutes les planches de chaque compartiment.

Le guidage des flux d'air à l'intérieur de la cellule est assuré

- par les divergents après les bouches de sortie des ventilateurs,
- par des déflecteurs métalliques constituant les séparations entre les compartiments propres à chaque ventilateur et des joints lamelles en élastomères pour tous les contacts sur la pile de bois.

Remarque : A l'intérieur de l'étuve pour chacun des 4 ventilateurs l'air circule dans des sections latérales dans un rapport $\frac{\text{largeur}}{\text{profondeur}} = \frac{1,50}{0,82} = 1,83$; donc largement convenable.

Le calcul est réalisé pour une vitesse d'air de 2.m/s dans la pile de bois; valeur retenue pour sécher les débits de 60 à 30 % d'humidité moyenne. Dans le couloir latéral de ventilation, nous considérons de même une vitesse maximale de l'air de 2 m/s sur toute la hauteur du couloir (en réalité, elle ne concerne que l'entrée supérieure du couloir).

	Section en m ²	Diamètre équivalent (à débit équivalent) en mm	Débit Réel (à T = 50°C et P = 1,013 b) en m ³ /s	Coef. de correction de tempé- rature (T: 50°-15°C)	Débit équivalent (T = 15° C) en m ³ /s CE/m	Pertes de charges linéiques en mm CE /m	Pertes de charge sur la longueur considérée mm CE
ESPACE LIBRE DE PASSAGE DE L'AIR ENTRE 2 PLANCHES ET 2 EPINGLES (longueur : 1,40 m)	0,025 x 0,471 " 0,01175	47	0,02355	0,89	0,02096	0,35 (conduit très ru- gueux) *	0,5
COULOIR LATÉRAL DE VENTILATION DE L'AIR SUR UN COMPARTIMENT (longueur : 1,925 m)	0,82 x 1,5 " 1,23	1060	2,46	0,89	2,18	0,008 (conduit rueux) * *	0,016

(Réf. 3)

* rugosité absolue k = 1,5 mm, soit un coefficient de perte de charge $\lambda=0,0$
 * * " " k' = 1,0 mm, soit un coefficient de perte de charge $\lambda=0,0$

1.3. Gamme de débit et Pression de service de chaque ventilateur

Nous considérons que l'air pulsé dans les couloirs latéraux de ventilation est totalement dirigé vers la pile de bois (rôle des déflecteurs métalliques et élastomères non corrodables).

Nous chercherons à maintenir une vitesse d'air de l'ordre de 2 m/s au niveau des planches entre 60 % et 30 % d'humidité moyenne; en dessous du P.S.F., nous limiterons la vitesse de l'air au niveau des débits à 0,5 m/s.

D'où une gamme de débit utile de :

$$v = 2 \text{ m/s} \quad Q = 2 \times 3600 \times \frac{4,94375}{4} = 8900 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$v = 0,5 \text{ m/s} \quad Q = 0,5 \times 3600 \times \frac{4,94375}{4} = 2225 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dans le calcul des pertes de charge (linéiques et singulières) de la cellule uniquement, il existe deux éléments de perte :

1) Celles qui sont dues à la cellule seule, c'est-à-dire celles qui sont produites par les frottements sur les parois du séchoir (faux-plafond, couloirs de ventilation, portes et fond arrière), les tourbillons dans les coins supérieurs et inférieurs.

Sur des cellules à peu près similaires avec ventilation en faux plafond (L = 2 m; H = 3,10 m; l = 3,30 m), ces pertes de charges ont été relevées par expérimentation (2).

Pour un débit de ventilation de 10.000 m³/h, ces pertes s'élèvent à environ 7 mm de C.E. Nous prendrons cette valeur comme référence.

2) Les pertes de charges dues au passage à travers la pile de bois : à partir de notre calcul précédent et en tenant compte des pertes singulières du fait que les planches ne sont pas jointives, nous les considérons de l'ordre de 2 mm de C.E.

Ainsi, pour couvrir les besoins propres de la cellule 1, nous utiliserons 4 ventilateurs centrifuges, de débit unitaire maximum 9.000 m³/h, de pression de service environ 10 mm C.E. (pression dynamique disponible).

1.4. Conception de la cellule

La cellule sera constituée d'un agencement de panneaux moussés laqués intérieur et extérieur. Des tôles nervurés en acier galvanisé, d'épaisseur 63/100 mm prennent en sandwich une mousse de polyuréthane, d'épaisseur 120 mm (panneau ONDATHERM 103).

Sur le sol nu, afin d'éviter d'éventuelles remontées d'humidité, on disposera un film plastique étanche sur toute la surface hors-tout d'emplacement du séchoir. L'isolation du sol des couloirs latéraux peut-être constituée d'un coffrage de copeaux de bois secs sur 12 cm d'épaisseur, coffrage rendu étanche par l'application d'un film bitumeux. Entre les traverses supportant les rails de guidage des chariots, on dispose la même isolation sur 8 cm d'épaisseur.

Sur les côtés SUD des chariots mobiles et à l'arasement de ces derniers, on disposera un muret en planchéage afin de rattraper le niveau des premières planches de la pile : ceci permettra à l'air de se détendre en fin de couloir de ventilation et homogénéiser la pression dans ce dernier.

Nous dressons dans le tableau suivant le calculs des pertes thermiques à travers les parois constitutives de la cellule, pour deux épaisseurs d'isolation : 60 mm pour une isolation classique et 120 mm pour le type de panneaux proposés.

Les calculs tiennent comptent :

- de coefficients de résistance superficielle moyens (intérieur, extérieur) de 0,12 pour les parois verticales, 0,14 pour les parois horizontales et 0,05 pour le sol, dans l'évaluation des déperditions surfaciques.
- des déperditions linéiques : nous les considérons nulles aux liaisons panneau-sol, panneau-panneau à 180 et 90°, en enlevant une largeur de 12 cm sur les extrémités des tôles intérieures intéressées.

Une porte de passage des chariots est aménagée sur la face EST, côté zone de manutention, de dimensions 2,75 m x 1,65 m. Une petite porte latérale d'accès aux couloirs de ventilation est aménagée sur la surface OUEST, afin de contrôler in situ le fonctionnement de l'étuve; la présence de petite porte écarte ainsi les interventions quotidiennes sur la grande porte d'accès à la pile, afin de limiter les pertes thermiques.

	Dimensions en m	Surface en m ²	K pour e = 6 cm en W/m ² °C	Q en W/° C	K pour e = 12cm en W/m ² °C	Q en W/° C
PERTES SURFACIQUES						
FACE SUD	2,90 x 6,6	19,14	0,52	9,95	0,205	3,92
FACE NORD	2,71 x 6,6	17,9	0,52	9,3	0,205	3,67
SOL	{ couloirs latéraux	2,0 x 6,6	0,55	7,26	0,55	7,26
	{ traverse	-	2,51	8,03	2,51	8,03
	{ isolation copeaux de bois	-	0,87	2,78	0,87	2,78
PLAFOND	{ Côté Sud	0,73 x 6,6	0,52	2,51	0,204	0,99
	{ Médian	1,83 x 6,6	0,52	6,28	0,204	2,46
	{ Côté Nord	0,83 x 6,6	0,52	2,85	0,204	1,12
FACE OUEST	-	9,68	0,52	5,03	0,205	1,98
FACE EST	-	9,68	0,52	5,03	0,205	1,98
PERTES LINEIQUES			(W/m °C)		(W/m °C)	
Porte de passage des piles	2x(2,75 + 1,65)	-	1	8,8	1	8,8
Porte d'accès	(2,04 + 0,7) x 2	-	1	5,48	1	5,48
				Q total en W/° C	73,3	48,5

(Réf. 4 et 5)

2. Besoins énergétiques de la cellule

2.1. Données sur le Mahogani (Swietenia macrophylla) (Réf. 2, 6, 7)

"Les premiers bois importés en Europe sous le nom d'Acajou vers le milieu du XVIème siècle, provenaient des Antilles, spécialement de la Jamaïque, puis de Cuba et de Saint-Domingue. Un botaniste devait nommer par la suite l'arbre producteur *Swietenia macrophylla* Jacq. Bien plus tard des acajous furent exploités sur le continent américain. Ils appartenaient à d'autres espèces de *Swietenia*, notamment à *Swietenia macrophylla* King. Quoique plus tendres et plus légers que les acajous des Antilles, ils furent sans conteste admis sous le nom d'acajous par le commerce.

La production des Antilles ayant pratiquement tari, ils restent les seuls acajous d'Amérique commercialisés depuis la 2ème guerre mondiale.

POSITIONS OFFICIELLES CONCERNANT L'ACAJOU

Devant les nombreuses extensions commerciales de ce nom à des bois rouges utilisables en ébénisterie, la norme française AFNOR B. 50.001 de nomenclature des bois, établie en 1937 a limité l'appellation acajou aux bois des genres *Swietenia* (Amérique, Caraïbes) et *Kaya* (Afrique), en précisant par une provenance ou un qualificatif l'acajou considéré.

Acajou des Antilles : *Swietenia mahogani*

Acajou d'Amérique Centrale : *Swietenia macrophylla*,
Swietenia Sp. Pl.

Acajou d'Afrique : *Kaya ivorensis*

Acajou blanc : *Kaya anthotheca*

Acajou caillédrat : *Kaya senegalensis*".

L'acajou d'Amérique (*Swietenia macrophylla* King et espèces voisines : *Swietenia humilis* Zucc, *Swietenia tessmannii* Harms (méliacées)) a été abondamment planté aux Antilles. Par reboisement, il constitue l'essence de base de la future forêt Guadeloupéenne.

Quelque soit le pays producteur, les noms Caoba en langue espagnole et de Mahogany en langue anglaise, équivalent à Acajou et sont souvent accompagnés du lieu de provenance : Acajou Honduras, Acajou du Pérou (autre nom au Brésil : Araputanga).

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES

Poids en grume à l'état frais : environ 700 kg par m³.

Densité à l'état sec à l'air (15 % en 1966) : 0,50 à 0,60 en moyenne (léger).

Les bois de plantation, surtout à croissance rapide sur terrain riche, sont un peu plus légers que ceux de forêt naturelle.

Les études de l'Université de Yale (U.S.A.) n'ont pas montré de différence sensible de densité et de propriétés selon les pays d'origine.

Le retrait au séchage est très faible sur dosse et sur quartier ; c'est un des plus faibles connus.

Les propriétés mécaniques sont excellentes en proportion de la densité pour les résistances en compression, en flexion statique, au choc et en cohésion transversale.

SECHAGE : Le bois peut-être séché à l'air ou en séchoir rapidement et facilement sans déformation ou fentes appréciables. Cependant, la présence de veines de bois de tensions peut provoquer du gauchissement.

DURABILITE : Les bois en grumes sont sensibles à la piqûre des insectes.
Le bois débité et sec est résistant aux pourritures et aux piqûres, sauf l'aubier. Il ne résiste pas aux tarets et médiocrement aux termites.

Exposé aux intempéries sans revêtement protecteur, il a une excellente tenue. L'imprégnation par des produits de préservation est très difficile.

USAGES : L'acajou d'Amérique est un des bois d'ébénisterie les plus appréciées du monde. Son emploi est en général limité aux types d'ameublement et de décoration les plus coûteux.

BASES DE CALCUL DES BESOINS ENERGETIQUES

Densité à 12 % du Mahoqani = $D_{12} = 0,56$

Retrait volumique pour 1% de variation d'humidité = 0.33 %
(ou coefficient de rétractibilité, C_R)

Humidité initiale des débits : 60 %

Humidité finale désirée : 12 %

Calcul de la densité à 60 % d'humidité (D_{60})

$$D_{60} = \frac{M_{60}}{V_{60}} \quad \text{avec } M_{60} = \text{poids du bois à 60 \% d'humidité occupant un volume de 60.}$$

Puisqu'on se situe au delà du P.S.F., ce volume V_{60} est égal en fait au volume saturé soit

$$V_{60} = V_S \quad \text{avec } M_{60} = M_o \times \frac{100 + 60}{100} = 1,6 M_o \quad \text{avec } M_o = \text{poids anhydre}$$

$$\text{Donc } D_{60} = 1,6 \times \frac{M_o}{V_S} = 1,6 y \quad y = \text{densité basale.}$$

Nous déduisons y par l'intermédiaire de D_{12} ; en effet

$$D_{12} = \frac{M_{12}}{V_{12}} \quad \text{avec } M_{12} = M_o \times \frac{100 + 12}{100} = 1,12 M_o$$

Au vu des données bibliographiques sur l'acajou d'Amérique concernant

- le retrait (ou rétractibilité) volumique total

$$\text{en France B \%} = \frac{V_S - V_o}{V_o} \times 100 \quad (= 10 \text{ à } 12 \%)$$

à l'étranger $R \% = \frac{V_s - V_o}{V_s} \times 100$ avec $V_o =$ Volume du bois anhydre.

- le retrait volumique pour 1 % de variation d'humidité ou coefficient de rétractibilité :

par rapport à V_o , $C_R = \frac{B \%}{H \text{ sat} \%} = 0,37 \%$

par rapport à V_s , $C'_R = \frac{R \%}{H \text{ sat} \%} = 0,33 \%$

nous prendrons $H \text{ sat} = 30 \%$ (P.S.F.)

Puisque nous sommes à 12 % d'humidité, donc en dessous du P.S.F.

$$V_{12} = V_s - (30 - 12) C'_R \times V_s$$

ou $V_{12} = V_s - (12) \times C_R \times V_o = V_s - (12) \times C_R \times \frac{V_s}{1,11}$

Nous prendrons $V_{12} = 0,95 \times V_s$

d'où $D_{12} = \frac{1,12}{0,95} \times \frac{M_o}{V_s} = 1,179 \times Y$

donc $Y = 0,485$

et $D_{60} = 1,6 \times Y = 0,76$

2.2. Volume de bois et quantités d'eau mises en jeu lors du séchage

	PILES DE BOIS DE HAUTEUR 1,925 m
Volume réel initial (en m ³)	7,938
Poids total initial à 60 % d'humidité (en Kg)	6033
Quantité d'eau initiale à 60 % d'humidité (en Kg)	2262
POIDS DE BOIS ANHYDRE (en Kg)	3771
Poids total à 30% d'humidité (en Kg)	4902
Quantité d'eau à 30% d'humidité (en Kg)	1131
Quantité d'eau à éliminer pour sécher de 60 à 30% (en Kg)	1131
Poids total à 12% d'humidité (en Kg)	4224
Quantité d'eau à 12% d'humidité (en Kg)	453
Quantité d'eau à éliminer pour sécher de 30 à 12% (en Kg)	678
Quantité totale d'eau à éliminer pour sécher de 60 à 12% (en Kg)	1809

2.3. Calcul des besoins énergétiques

Les calculs suivants relatifs aux différents besoins en énergie de la cellule ont été établis en fonction d'une table de séchage pour séchoir à air chaud et humide indiquée par le C.T.B. (2) pour l'Acajou d'Amérique. Nous avons choisi cette table parmi d'autres (8) dans la mesure où elle correspondait le mieux aux niveaux de température qu'il est possible d'obtenir à partir de capteurs solaires.

Table de séchage N° 4 F

Épaisseur de bois : ≤ 34 mm

Humidité réelle du bois %	Période de préchauffage						Période de séchage						Période d'équilibrage						
	T _a °C	T _h °C	ΔT°	H _r %	H _e %	G	T _a °C	T _h °C	ΔT°	H _r %	H _e %	G	T _a °C	T _h °C	ΔT°	H _r %	H _e %	G	
> 50	50	48	2	30	19		55	52	3	85	16								
50 à 40	50	48	2	30	19		55	51	4	82	14								
40 à 30	50	48	2	30	19		55	48,5	5,5	75	12	2,6							
30 à 27	55	53	2	30	18		60	53,5	6,5	72	11	2,4							
27 à 24	55	53	2	30	18		60	53,5	7,5	68	10	2,6							
24 à 21	55	53	2	30	18		60	51	9	63	9	2,6							
21 à 18							63	52	11	56	8	2,6							
18 à 15							63	49,5	13,5	49	7	2,6	58	55	3	87	15	1,1	
15 à 12							63	47,5	15,5	43	6	2,6	58	52,5	5,5	75	12	1,1	
12 à 8							63	43,5	19,5	33	5	2,6	58	47	11	55	8	1,1	

Remarque : - Préchauffage : la durée de cette première période est toujours très courte ; elle est variable suivant l'essence, l'épaisseur et l'humidité du bois. Pour un bois comme l'Acajou on préconise pour une épaisseur de 30 mm et une humidité initiale de 60%, une durée de 3 h; ce temps s'entend à partir du moment où la température de l'air intérieur du séchoir a atteint elle même la valeur préconisée pour l'opération (50° C).

- Equilibrage : on fait subir au chargement une humidification, afin d'équilibrer l'humidité résiduelle dans toute l'épaisseur des débits ; en séchoir à air chaud et humide on chauffe tout en injectant de la vapeur, de façon à obtenir les conditions suivantes : T = 58° C et H.R. = 75% pendant 10 à 15 heures.

2.3.1. Energie_necessaire_au_rechauffage_des_parois_de_la_cellule

Nous prenons ici en compte des panneaux moussés, de 120 mm d'épaisseur de mousse polyuréthane injectée entre des tôles en acier galvanisé de 63/100 mm d'épaisseur.

Le revêtement du sol intérieur est composé d'un assemblage de coffres réalisés avec du plancheiage de 30 mm d'épaisseur recouvrant de compartiments de copeaux de bois.

Nous considérons que nous devons élever :

- la température des tôles intérieures à la température de l'air intérieur ; c'est à dire d'une température moyenne extérieure de 25°C à une température intérieure maximum de 63°C, soit d'un écart de température de 38°C.

- la température de la mousse injectée et de l'isolation du sol d'une température moyenne de $\frac{63 + 25}{2} = 44^\circ\text{C}$; soit d'un écart de température de 19°C.

D'où la répartition suivante des besoins de réchauffage des parois.

	Dimensions (en m)	Surface (en m ²)	Volume (en m ³)	Masse volumique (en kg / m ³)	Capacité thermique massique (en kJ/kg°k)	Energie de chauffage (en kJ)
MOUSSE POLYURETHANE INJECTEE	2,83 x 6,84 3,02 x 6,84 0,84 x 6,84 0,94 x 6,84 + 2 x (9,68) + 1,83 x 6,84 + 2 x (1,776)	52,19 +	10,5	45 (polyuréthane ex- pansé au fréon)	1,38	12.405
TOLES EN ACIER GALVANISE	2,71 x 6,6 2,90 x 6,6 0,73 x 6,6 0,83 x 6,6 + 2 x (9,68) + 1,83 x 6,6 + 2 x (2,17)	47,32 +	0,052	8.000	0,5	7.905
PLANCHEIAGE COPEAUX BOIS		13,2 + 3,2 (3 cm) 3,2 (6cm) 13,2 (9cm) 3,2 (3cm)	0,684 1,284	600 50	2,5 1,2	20.960
TOTAL						41.270

2.3.2. Energie nécessaire au réchauffage des diverses parties métalliques du séchoir

On considère ici l'ensemble des déflecteurs, le chariot de la pile, les rails de guidage, les ventilateurs et leurs supports, que l'on devra porter à une température maximale de 63°C soit un écart de température de 38°C.

Les déflecteurs métalliques séparant le volume intérieur de la pile en quatre compartiments occuperont un volume V de

$$V = [9,68 - (2,47 \times 1,4)] \times 0,001 \approx 0,025 \text{ m}^3$$

soit un poids total de 200 kg.

Pour l'ensemble de ces éléments métalliques, nous prendrons une valeur approximative de 1500 Kg.

D'où un apport énergétique de $1500 \times 0,5 \times 38 = 28500 \text{ kJ}$

Remarque : le réchauffage du volume d'air intérieur de la cellule n'est pas pris en compte du fait de la quantité insignifiante de l'air intéressé.

2.3.3. Energie nécessaire au préchauffage du bois et de l'eau qu'il contient

En début de séchage, nous considérons les débits à une température de 25° C, que nous devons monter en première phase (préchauffage) à 55° C.

Les données bibliographiques (4 et 5) indiquent pour des bois secs (12% d'humidité), aussi bien en long qu'en travers (par rapport aux fibres du bois) les ordres de grandeur suivants quant à la capacité thermique massique à 300° K

Chêne : 2,385 à 2,4 kJ/Kg° K

Pin : 1,21 à 2,72 kJ/Kg° K

Sapin : 2,72 kJ/kg° K

Nous prendrons une valeur de 2,5 kJ/kg°k pour l'Acajou d'Amérique soit un apport énergétique de réchauffage des débits verts à 60% d'humidité de

$$30 \times [(4.224 \times 2,5) + (1.809 \times 4,18)] = 543.650 \text{ kJ}$$

Remarque : volume des épingles correspondant : $0,30625 \times 1,4 = 0,429 \text{ m}^3$
En prenant une densité de 0,6 à 20% d'humidité, l'apport énergétique au réchauffage de ces épingles sera approximativement :
 $30 \times 0,429 \times 600 \times 2,5 \approx 19.300 \text{ kJ}$.

2.3.4. Energie nécessaire à l'élimination de l'eau contenue dans le bois

A) En tenant compte que nous devons éliminer 1.809 kg d'eau pour sécher les débits de 60 à 12% et de la chaleur latente d'évaporation de l'eau de 2400 kJ/kg entre 50 et 60° C, l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau sera de $2400 \times 1809 = 4.341.600 \text{ kJ}$.

B) Lorsque le bois a une humidité inférieure à l'humidité de saturation (P.S.F.), il faut vaincre les forces d'attraction entre l'eau (liée) et les macromolécules de cellulose de la structure du bois.

Cet apport énergétique a été évalué par VILLIERE, d'après KOLLMANN (Réf.9)

$$Q = \frac{A \times H_1}{B + H_1} - \frac{A \times H_2}{B + H_2} \quad \text{où } Q \text{ est exprimé en kcal/kg de bois anhydre}$$

A est un coefficient égal à 22

B est un coefficient égal à 0,07

H₁ humidité initiale (valeur décimale)

donc correspondante au P.S.F.

H₂ humidité finale (valeur décimale)

$$\text{Nous avons donc } QT = 3.771 \times 4,18 \times \left[\left(\frac{22 \times 0,3}{0,07 + 0,3} \right) - \left(\frac{22 \times 0,12}{0,07 + 0,12} \right) \right]$$

$$\text{soit } QT = 62.150 \text{ kJ}$$

C) Enfin, il faut tenir compte des échanges réalisés avec l'air extérieur au cours du séchage, afin d'évacuer la vapeur d'eau extirpée du bois, suivant les conditions intérieures fixées par les tables de séchage.

Nous devons donc faire intervenir l'input énergétique dû au chauffage du volume total d'air extérieur entrant correspondant au volume total d'air sortant nécessaire à l'évacuation de la vapeur d'eau.

Nous considérons une situation "moyenne" de l'air extérieur fixée à $T = 25^\circ \text{ C}$ et $H.R. = 80\%$; d'où un rapport de mélange de 16g/kg d'air sec et une enthalpie spécifique de 66 kJ/kg d'air sec.

• Avant le P.S.F., nous considérons la situation "moyenne" suivante au sein de l'étuve : l'air est à 55° C et à 80% d'H.R. ; d'où un rapport de mélange de 89 g/kg d'air sec et une enthalpie spécifique de 288 kJ/kg.

Nous allons donc travailler avec un échange avec l'extérieur de

$$\Delta W = 89 - 16 = 73 \text{ g/kg d'air sec.}$$

Lors de cette première phase, nous devons réchauffer l'air rentrant de 25 à 55° C ; cet air aura alors les caractéristiques suivants : T = 55° C ; W : 16 g/kg d'air sec soit H.R. = 16,5% et H = 97 kJ/kg d'air sec.

La quantité d'air échangé avec l'extérieur sera de

$$\frac{1131}{0,073} = 15.500 \text{ kg d'air sec.}$$

D'où une énergie nécessaire au réchauffage de cet air entrant de : $15.500 \times (97 - 66) = 480.500 \text{ kJ.}$

• Après le P.S.F., nous considérons la situation "moyenne" suivante au sein de l'étuve : l'air est à 63° C et à 55% H.R. ; d'où un rapport de mélange de 88 g/kg d'air sec et une enthalpie spécifique de 294 kJ/kg d'air sec.

Nous travaillons donc avec un échange avec l'air extérieur de $\Delta W = 88 - 16 = 72 \text{ g/kg d'air sec.}$

La quantité d'air échangé avec l'air extérieur sera de

$$\frac{678}{0,072} = 9.420 \text{ kg d'air sec}$$

Lors de cette dernière phase, nous devons échauffer l'air entrant de 25 à 63° C ; cet air aura alors les caractéristiques suivantes : T = 63° C, W = 16 g/kg d'air sec soit H.R. = 11% et H = 106 kJ/kg d'air sec.

D'où une énergie nécessaire au réchauffage de cet air entrant de :

$$9.420 (106 - 66) = 376.800 \text{ kJ}$$

soit au total : 857.300 kJ.

2.3.5. Energie perdue par les parois

De même que précédemment, nous considérons les besoins dans les deux situations suivantes:

- une première phase (séchage du bois vert à 30%) : où on considère une température intérieure moyenne de l'air à 55°C, pour un air extérieur de 25°C. La durée de cette première phase est fixée à 7 jours.

- une deuxième phase (séchage de 30 à 12%) : où on considère une température moyenne de l'air à 63°C, toujours avec un air extérieur de 25°C.

La durée de cette deuxième phase est fixée à 14 jours.

D'après le tableau du § I.1.4., nous devons donc couvrir les pertes suivantes à travers les parois de la cellule, en fonction de l'épaisseur de l'isolation :

	Epaisseur de l'isolation des panneaux sandwich = 6 cm	Epaisseur de l'isolation des panneaux sandwich = 12 cm
PERTES A TRAVERS LES PAROIS (1ère phase de 7j) (en kJ)	1.329.960	879.980
PERTES A TRAVERS LES PAROIS (2ème phase de 14j) (en kJ)	3.369.220	2.229.290
PERTES TOTALES (en kJ)	4.699.180	3.109.270

2.4. Bilan total

En récapitulant les différents postes détaillés dans le § 2.3., le bilan s'établit donc comme suit:

POSTES	BESOINS ENERGETIQUES (EN KJ)
Réchauffage des parois de la cellule	41.270
Réchauffage des diverses pièce métalliques.	28.500
Réchauffage du bois vert	562.950
Evaporation de l'eau	4.341.600
Rupture des forces d'attraction bois et eau liée.	62.150
Renouvellement d'air	857.300
Pertes par les parois (isolation : 6cm) (1)	4.699.180
Pertes par les parois (isolation : 12cm) (2)	3.109.270
(1)	10.593.000
TOTAL	
(2)	9.003.000

On comprend ainsi aisément l'intérêt de réaliser dès le départ une surisolation de la cellule au regard du niveau de température souhaité et en tenant compte de la nécessité de maintenir ce niveau de température lors des périodes d'insolation déficiente ou de nuit.

Ainsi, une isolation de 12 cm d'épaisseur de mousse polyuréthane diminue la part des pertes thermiques à travers les parois de 108 à 71% par rapport à la chaleur latente d'évaporation de l'eau sur l'ensemble d'un cycle de séchage de 21 jours, voire de 44,5% à 34,5% sur le bilan global.

De plus, il est certain que cette surisolation sera d'autant plus importante que l'on se trouvera en période d'insolation faible (période d'hivernage par exemple) afin de se garantir un niveau de température maximum, notamment lors de la deuxième phase qu'exige des températures au delà de 60°C pendant une et demie à deux décades.

3. Première évaluation de la surface de captation nécessaire

3.1. Contraintes d'aménagement

Sur la toiture recouvrant la zone d'implantation des séchoirs nous disposons en face Sud sur une pente à 59 % soit inclinée à $30,5^\circ$:

- de 4,85 m hors tout entre faitage et bord extérieur
- de 17,05 m entre arbalétriers extrêmes.

Au vu de la disposition des panneaux constitutifs de la cellule et de l'emplacement des gaines de liaison capteurs - cellule permettant un fonctionnement et un arrêt de la ventilation des capteurs sans modifier le débit propre de ventilation de la cellule, (voir plan de coupe), le plan de pose des capteurs doit être surélevé par rapport au plan incliné actuel de la toiture ; afin de rattraper une inclinaison de 22° sur l'horizontale, permettant le passage des gaines.

Cette disposition permet de se rapprocher d'une inclinaison optimale (sur l'année) des capteurs vis à vis de l'incidence du rayonnement solaire direct, que l'on fixe en règle générale aux alentours de la latitude du lieu d'implantation, soit ici $16^\circ 15'$. Ainsi, ceci nous assure de pouvoir obtenir des rendements quotidiens d'inclinaison supérieurs à 80 % à 22° d'inclinaison au lieu de 70 % à $30,5^\circ$ d'inclinaison sur l'horizontale (rendements obtenus à partir de l'énergie quotidienne maximale, transmise par une surface vitrée, orientée Sud et d'inclinaison optimale déterminée sur une demi-décade - situation de ciel clair - en tenant compte de la distribution du rayonnement solaire global sur la durée d'ensoleillement - exploitation du modèle développé par VARICHON (Réf. 10).

Nous disposons alors sur une même longueur de 17,05 m d'une largeur hors tout de 5,00 m entre faitage et bord extérieur Sud ; soit une surface disponible hors tout de $85,25 \text{ m}^2$.

3.2. Evaluation

L'évaluation de la surface de captation nécessaire pour couvrir les besoins énergétiques calculés précédemment doit tenir compte bien évidemment des éléments suivants :

- des conditions météorologiques relevées sur le site d'implantation, ou sur un lieu proche, aussi significatif que le site de POINTE-NOIRE quant au micro-climat spécifique de la côte sous le vent ;

- des performances connues du matériel de captation et de transformation du rayonnement solaire disponible en chaleur ;

- de la durée du cycle de séchage désirée.

Les données climatologiques utilisées ont été relevées sur la station fruitière de l'I.R.F.A. (Institut de Recherches sur les Fruits et Agrumes) du G.E.R.D.A.T, à Vieux-Habitants ; elles se composent de moyennes décennales sur les années 1979, 1980, 1981 et 1982 et d'enregistrements hebdomadaires sur des périodes "type" (carême, hivernage et périodes transitoires).

Les capteurs solaires à air retenus sont des PANAIRSUN T4, distribués par le GREPS et dont les performances sont établies à partir de résultats d'essais obtenus par un laboratoire de l'Université de LEUVEN (BELGIQUE).

Enfin, la durée du cycle de séchage a été fixée en premier lieu à 20 jours par l'O.N.F. au regard des résultats obtenus à PORTO-RICO sur un séchoir solaire type serre aménagée.

Les expérimentations menées à PORTO-RICO par Maldonado, d'après l'expérience de PECK à Madison (Réf. 1) font état de résultats obtenus sur des débits de différentes épaisseurs de Mahogany, sur un séchoir-serre comprenant une surface collectrice aménagée à l'intérieur de la cellule. La charge prise comme référence est constituée d'une pile de 4,7 m³ de débits de 3,17 cm d'épaisseur (5/4 inch) de Mahogany ; avec un rapport spécifique $\frac{\text{surface d'absorbeur}}{\text{capacité du séchoir}} = \frac{10}{4,7} = 2,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ et dans les conditions météorologiques suivantes en saison humide :

: Moyennes mensuelles' : : établies entre 1900 : : et 1964 :	: OCTOBRE :	: NOVEMBRE :
: Température (°C) :	: 26, 8 :	: 25, 9 :
: Humidité relative (%) :	: 78 :	: 77 :
: Précipitations (mm) :	: 133, 0 :	: 153, 5 :
: Rayonnement global : : reçu au sol kWh/m ² j :	: 4, 76 :	: 4, 35 :

La charge référencée a été ramenée de 50 à 12 % en 25 jours (du 26/10/61 au 19/11/61) avec un fonctionnement diurne des ventilateurs sur une durée effective de 9 heures par jour.

Dans les conditions météorologiques de la Guadeloupe relevées entre 1979 et 1982, en tenant compte de rendements thermiques décennaires des capteurs solaires à air de 40 % et d'une durée de cycle de séchage de deux décades, la surface utile de captation du rayonnement global (reçu au sol) est comprise entre 49 et 76 m² suivant les saisons.

Au regard des contraintes d'aménagement et de la disposition dissymétrique de la cellule par rapport à l'ensemble de la toiture, nous retiendrons une surface utile de 55 m². Le calcul sera affiné dans les paragraphes suivants en considérant :

- la répartition du rayonnement solaire global, pour la latitude donnée, sur des journées types ;

- l'évolution des températures internes à l'étuve et des rendements instantanés des capteurs dans les conditions précisées auparavant, en fonction de l'inertie thermique de la pile de bois et des pertes à travers les parois de la cellule, pour un fonctionnement effectif des capteurs sur 6 à 8 heures d'ensoleillement par jour ;

- un affinement de l'évaluation des durées de cycle de séchage, au regard des phénomènes de transfert de chaleur et de masse internes à l'étuve. A ce titre, l'expérience portoricaine ne peut nous apporter qu'un ordre de grandeur de 20 à 30 jours pour un cycle complet, dans la mesure où nous ne connaissons pas les conditions exactes d'environnement du séchoir sur la période considérée. A priori, ces conditions extérieures ont dû se révéler clémentes au vu de la faible surface de captation improvisée, l'isolation très légère du séchoir et le fonctionnement discontinu des ventilateurs, écartant un pré-séchage à l'air ambiant.

4. Conception de la cellule 2 (autonome)

Nous retenons dans l'idée de la conception de la cellule 2 (et dans l'éventualité d'un aménagement en deux étuves indépendantes de la cellule 1) la possibilité de comparaison, sur des critères technico-économiques, de trois modes de conduites d'un séchoir à bois utilisant l'énergie solaire :

- séchage en convection forcée de débits verts (60 % dans le cas du Mahogani) à 12 % d'humidité finale.

- ressuyage à l'air libre jusqu'à 30 %, puis séchage de finition en convection forcée jusqu'à 12 % d'humidité finale, soit

- + par alimentation électrique du réseau
- + par alimentation électrique de panneaux photovoltaïques, avec stockage en batteries

En dessous du point de saturation des fibres, nous savons que la vitesse de l'air au niveau des débits de bois n'est plus un facteur déterminant sur les phénomènes d'élimination de l'eau du bois. Nous essayerons ainsi de la maintenir autour de 0,5 m/s, afin de limiter l'importance des gradients de température de l'air au sein de l'étuve et favoriser un séchage homogène de finition dans la pile de bois.

Dans la partie du hangar réservée à cet effet (SUD-EST), nous disposons d'une surface utile au sol de 3,40 m x 3,40 m (entre les bases des piliers P22, P23 ... P29). Nous garderons le même type de conformation de pile de bois et de cellule proprement dite que dans le cas précédent, à savoir :

- une pile de bois de hauteur 1,925 m (empilage de 35 étages d'épaisseur 55 mm), de largeur 1,40 m et de longueur 3 m, placée sur un chariot mobile. Soit, en tenant compte d'un coefficient correcteur $k = 0,95$, un volume réel maximal de bois de :

$$V = L \times l \times h \times \frac{e}{e + b} \times k = 3 \times 1,4 \times 1,925 \times \frac{0,03}{0,055} \times 0,95$$

$$V = 4,19 \text{ m}^3$$

d'où un coefficient d'empilage de la pile ainsi considérée de

$$\frac{4,19}{3 \times 1,4 \times 1,925} = 0,518$$

- une profondeur de couloir de ventilation égale à 0,82 m afin de respecter les mêmes conditions que dans le cas 1, notamment quant au rapport des pertes de charges attendues dans la pile et dans les couloirs latéraux, pour une vitesse d'air de 0,5 m/s.

La hauteur du faux plafond sera fonction des dimensions de la platine support des deux ventilateurs de brassage proposés (voir complément d'ingénierie). Elle sera inférieure ou égale à 0,80 m ; d'où une hauteur intérieure maximale de la cellule de 3,28 m (hors isolation du sol).

De même, nous disposons d'une largeur intérieure de 3,04 m et d'une longueur utile de : 3 m + 0,1 m (réservation face EST) + 0,1 m (réservation face OUEST) = 3,20 m

soit un volume intérieur maximum de : 31 m³

et un coefficient de remplissage minimum de : $\frac{4,19}{31} = 0,135$

Sur chacun des deux compartiments disposant d'une largeur de couloir de ventilation de 1,50 m, les ventilateurs doivent assurer un débit unitaire de 2200 à 2300 m³/h, sous une pression de service inférieure à 5 mm de C.E

Sur la face EST, deux petites portes (2,04 m x 0,7 m) d'accès aux couloirs latéraux sont aménagées. Sur la face OUEST, une grande porte (2,75 m x 1,65 m) permet le chargement et le déchargement de l'étuve, en glissant le chariot mobile sur les rails de guidage de la zone de manutention.

Le calcul des pertes thermiques à travers les parois (ONDATHERM 103) est présenté dans le tableau suivant :

	Dimensions en m	Surface en m ²	K (c = 12cm) en W/m ² .°C	Q en W/°C
PERTES SURFACIQUES				
FACE SUD	2,90 x 3,2	9,28	0,205	1,90
FACE NORD	2,71 x 3,2	8,67	0,205	1,78
SOL	couloirs latéraux	2,0 x 3,2	0,55	3,52
	traverse	—	2,51	3,89
	isolation copeaux de bois	—	0,87	1,35
PLAFOND	côté sud	0,73 x 3,2	0,204	0,48
	médian	1,83 x 3,2	0,204	1,19
	côté nord	0,83 x 3,2	0,204	0,54
FACE OUEST	—	9,68	0,205	1,98
FACE EST	—	9,68	0,205	1,98
PERTES LINEIQUES			W/m.°C	18,61
Porte de passage de la pile	2 x (2,75 + 1,65)	—	1	8,8
Portes d'accès	4 x (2,04 + 0,7)	—	1	10,96
Q total en W/°C				38,37

POSTES	BESOINS ENERGETIQUES (en k J)
Réchauffage des parois de la cellule	22.080
Réchauffage des diverses pièces métalliques	15.200
Réchauffage du bois vert	300.900
Evaporation de l'eau	876.000
Rupture des forces d'attraction bois-eau liée	33.530
Renouveaulement d'air	202.780
Pertes par les parois (sur 14 jours)	1.763.670
TOTAL	3.214.160

En tenant compte des mêmes caractéristiques retenues dans le cas de la cellule 1 à propos des capteurs, la surface utile de captation est comprise entre 17,5 m² et 27 m².

Afin d'utiliser au maximum la surface disponible restante de la toiture surélevée, soit 30 m², il faut trouver un compromis entre :

- la surface occupée par les capteurs solaires à air, pour la génération d'air chaud

- la surface occupée par les panneaux de cellules photovoltaïques, susceptibles d'alimenter, par batteries interposées, les deux ventilateurs de brassage de l'air dans l'étuve (2 x 2.200 m³/h sous 5 mm maximum de C.E) et le (s) ventilateur (s) de circulation d'air dans les capteurs (1.050 à 1.620 m³/h sous 15 mm de C.E).

I.5.- Approche technologique

Les considérations précédentes nous amènent à considérer un schéma de principe analogue à la cellule en convection forcée avec les différences suivantes :

- 1) Le débit de brassage et le débit dans les capteurs sont réduits d'un facteur 3 à 4 ce qui permet de réduire les pertes de charge d'un facteur théorique 9 - 16.
- 2) La force motrice nécessaire est alors 10 fois plus faible et permet l'emploi de cellules photovoltaïques.

Cependant l'utilisation de panneaux photovoltaïques impose :

- soit l'emploi de ventilateurs en courant continu, mais il n'y a pas de fabrication courante de ventilateurs en continu résistant à la température de 60°C/80°C et à l'humidité.
- soit l'emploi d'un onduleur pour transformer le courant continu en alternatif. Cette deuxième solution nous paraît préférable.

Par ailleurs, si l'on désire avoir un brassage d'air pendant la nuit pour homogénéiser, il convient d'utiliser un ensemble de batteries.

Ventilateurs

1.a - Solaire 1400 m³/h 8 mm H²O
ventilateur type BZ 35 - 6 pales Solyventventec
Puissance absorbée : 65 W

1.b - Brassage
2 ventilateurs
Type Solyventventec BZ 40 - 6 pales
10 mm H²O - 2500 m³/h
Puissance absorbée : 140 W

	Sans accumulation	Avec 3 heures accumulées
1 - Ventilateur solaire	65 W	
2 - Ventilateur brassage	280 W	
3 - Total puissance nécessaire	345 W	
4 - Rendement onduleur	0.85	
5 - Puissance sortie panneau photovoltaïque	405 W	
6 - Puissance crête requise	900 W	
7 - Energie pour 3 h de ventilateur	405 Wh x 3	1215 Wh
8 - Capacité des batteries (cycle à 50%)		101 Ah sous 24 V
9 - Energie nécessaire pour la charge (rendement 0.65)		1870 Wh
10 - Puissance nécessaire pour une charge en 4 h		467 W
11 - Puissance crête totale requise (405 + 467)/0.7		1072 W

Le prix pour un système complet (batterie, onduleur, régulateur, panneaux) est de l'ordre de 100 F (H.T.) le watt crête ; soit un coût total d'environ 107 200 F H.T.

RECAPITULATIF DES COÛTS

Panneaux isolants	21 000 F
Isolation sol	2 000 F
Portes entrée bois	3 500 F
Porte piétons	1 800 F
25 m ² de capteurs	22 500 F
Réseau de gaines	21 000 F

Ventilation

2 ventilateurs de brassage	7 800 F
1 ventilateur solaire	7 500 F
1 groupe air neuf avec récupérateur	9 000 F
Eclairage intérieur	3 000 F
Régulation	20 600 F
Armoire électrique	35 000 F
Système photovoltaïque	107 200 F
	<hr/>
	261 900 F

Il ressort de cette étude que le prix du système photovoltaïque représente plus de 40% du coût total pour une étuve destinée à sécher le bois de 30% à 12% d'humidité car les débits de brassage ne suffisent pas pour le séchage de 60 à 30%.

CONCLUSION

A partir du moment où le bois est empilé dans une étuve qui est portée à une certaine température, il n'est plus possible d'utiliser la ventilation à l'air libre.

La question du brassage de l'air nécessaire pour assurer une bonne homogénéité d'un séchage plus rapide qu'à l'air libre devient alors le problème principal.

Contrairement à de nombreuses idées reçues, il n'existe pas de solution en convection naturelle qui résolve ce problème de manière satisfaisante.

La seule solution à l'heure actuelle est d'assurer un brassage mécanique.

Pour assurer la fourniture de la force motrice, il est possible d'utiliser l'effet photovoltaïque mais cette solution est coûteuse.

A titre expérimental on pourrait envisager d'utiliser la convection naturelle pour les capteurs solaires ce qui réduirait de 19% l'installation photovoltaïque, et supprimerait le ventilateur solaire.

Indépendamment de l'intérêt scientifique et technologique, on peut s'interroger sur le marché potentiel de ce type d'installation qui seront concurrencés par les étuves solaires utilisant le réseau électrique pour le brassage, par les étuves classiques et le séchage à l'air libre.

II - MODELISATION DES TRANSFERTS REGISSANT LE FONCTIONNEMENT DU SECHOIR

Afin d'évaluer plus précisément les performances du séchoir solaire à bois, un programme informatique a été élaboré, permettant de simuler heure par heure les échanges thermiques et massiques au sein du séchoir, tenant compte des conditions météorologiques type. La difficulté principale était d'évaluer les mécanismes d'évaporation de l'eau à la surface du bois. Nous avons écarté dès le départ toute interprétation physique du phénomène qui est, au vu des recherches entreprises à ce sujet, très complexe, pour nous limiter à la transcription mathématique de l'expérience pratique. De plus, un séchoir muni de capteurs solaires présente la particularité d'être soumis à un apport énergétique variable au cours de la journée et nul durant la nuit, ce qui permet au bois de ressuer. Ce ressuage n'a pas été pris en compte dans le programme faute d'expérience.

Il est important de souligner les limitations d'un tel modèle, mais il était impossible dans le temps imparti, et dans le cadre de cette étude d'approfondir davantage.

II.1.- Détermination des courbes d'ensoleillement (réf. 11)

Préalablement à l'étude physique du séchoir, nous devons reconstituer des courbes d'ensoleillement type du site de telle façon à évaluer l'apport solaire heure par heure au cours de la journée.

A partir des relevés climatologiques de la station IRFA/GERDAT de Vieux Habitants, sur quatre années (79 - 82), nous avons relevé les deux mois durant lesquels le rayonnement global sur une surface horizontale était respectivement le plus fort et plus faible.

	<u>Rayonnement global (MJ/m²)</u>		<u>Temp. moyenne</u>	<u>H. R.</u>
	<u>TOTAL</u>	<u>MOYENNE/JOUR</u>	<u>(°C)</u>	
DECEMBRE 1981	441.1	14.23	26.05	82
OCTOBRE 1982	699.3	22.56	26.4	88

Nous avons considéré les données météorologiques mensuelles sachant que la durée d'un cycle de séchage est de cet ordre de grandeur.

Sur base de ces données, nous avons reconstitué des courbes d'ensoleillement horaire sur une surface horizontale, puis sur une surface inclinée. Enfin, nous avons obtenu les répartitions journalières de l'ensoleillement incident sur l'absorbeur des capteurs solaires inclinés à 22° sur l'horizontale avec un angle azimuthal nul.

HEURE T.S.V.	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
OCTOBRE	42	220	430	621	771	857	857	771	621	430	220	42	
DECEMBRE		120	264	404	513	572	572	513	404	264	120		

ENSOLEILLEMENT INCIDENT SUR L'ABSORBEUR DES CAPTEURS SOLAIRES (W/m²)

II.2.- Caractéristiques des capteurs

L'énergie solaire récupérée par les capteurs est exprimée par :

$$ES = AC \times FR \times (S - UL (TI - TE))$$

où AC : surface (m²)

FR : Coefficient d'ailette

S : Ensoleillement incident sur l'absorbeur (W/m²)

UL : Coefficient de déperditions surfaciques (W/m² K)

TI : Température à l'intérieur du séchoir (°C)

TE : Température extérieure (°C)

Nous avons pris en compte les caractéristiques du capteur PANAIRSUN qui a été testé à l'Université de LIEGE.

II.3.- Déperditions surfaciques

Les résultats ont été obtenus pour les deux cas décrits en première partie.

Isolation classique	KS = 73.3 W/K
Isolation renforcée	KS = 48.5 W/K

II.4.- Inertie du bâtiment

Mousse polyuréthane injectée (sur 4 cm)	inertie (kJ/K)
87.61 x .04 x 45 x 1.38	218
Tôle d'acier galvanisée	
83.10 x .00063 x 8000 x 0.5	209
Planchéiage panneaux bois (sur 3 cm)	
36 x .03 x 600 x 2.5	1620
Parties métalliques intérieures au séchoir	
1500 x 0.5	750
Epingles	
$(0.25)^2 \times 1.4 \times 7 \times 35 \times 600 \times 2.5$	322
TOTAL	3119 kJ/K

L'inertie de la pile de bois varie en fonction de sa teneur en eau.

$$\text{INERB} = \text{CP bois} \times \text{M bois} (12\%) \neq \text{CP eau} \times \text{M eau}$$

II.5.- Courbe de séchage

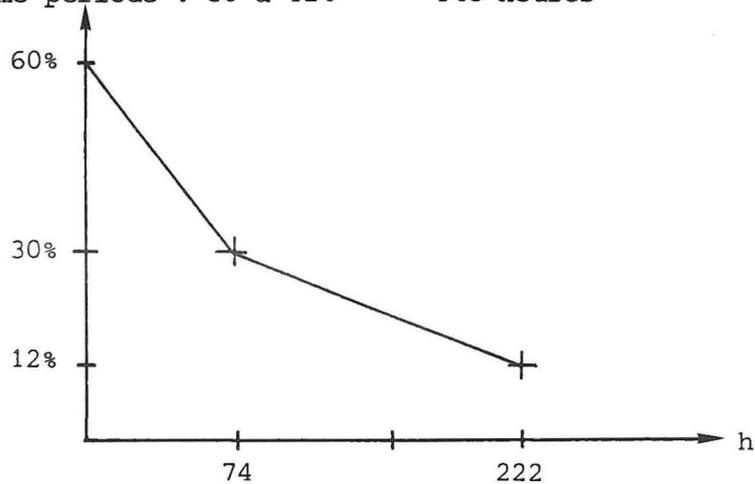
Il faut à peu près dix jours pour sécher du bois de 60 à 12%, à l'aide d'un séchoir classique, en comptant 10 à 15 heures d'équilibrage et 3 heures de préchauffage.

10 jours : 240 heures
rééquilibrage : 15 heures
préchauffage : 3 heures

Nombre d'heure de séchage : 222 heures

Sachant qu'il faut deux fois plus de temps pour sécher le bois de 30 à 12% que pour sécher le bois de 60 à 30% :

1ère période : 60 à 30% 74 heures
2ème période : 30 à 12% 148 heures



Cette courbe de séchage est obtenue avec un système de séchage classique fonctionnant en continu en respectant les tables de séchage. Un système solaire présente l'inconvénient de ne fournir de l'énergie que durant la journée. Toute l'énergie solaire apportée ne peut cependant être utilisée pour évaporer l'eau, car en fonction de l'humidité relative du bois, seule une quantité maximum d'eau pourra être évaporée.

La quantité maximum d'eau évaporée peut être obtenue grossièrement à partir des résultats de séchage classique.

Tout d'abord, nous avons lissé la courbe ci-dessus par un polynome du second degré

$$\text{HRB} = at^2 + bt + c$$

$$\text{avec } a = 1.2783 \times 10^{-3}$$

$$b = - .5$$

$$c = 60$$

$$\frac{d\text{HRB}}{dt} = 2 at + b$$

$$= \sqrt{b^2 - 4 ac + 4 a \text{ HRB}}$$

$$= \sqrt{\alpha 1 + \alpha 2 \times \text{HRB}}$$

$$\text{où } \alpha 1 = b^2 - 4 ac$$

$$= - 5.679 \times 10^{-2}$$

$$\alpha 2 = 4 a$$

$$= 5.113 \times 10^{-3}$$

En introduisant la masse de bois anhydre, nous obtenons une expression analytique de la masse d'eau maximum qu'il est possible d'évaporer en une heure, en fonction de l'humidité relative du bois.

$$\frac{d\text{MBE}}{dt} = \frac{\text{MBO}}{100} \times \frac{d\text{HRB}}{dt} = \frac{\text{MBO}}{100} \sqrt{\alpha 1 + \alpha 2 \times \text{HRB}}$$

HRB	$\frac{d\text{MBE}}{dt}$ kg/h	MBO = 3771 kg
60	18.86	
45	15.70	
30	11.72	
20	8.04	
12	2.55	

Parallèlement, l'apport énergétique solaire doit être suffisant pour évaporer la masse d'eau maximum durant une heure. Lorsque l'humidité relative du bois est au dessous du point de saturation des fibres, il faut tenir compte également dans le bilan de l'énergie de liaison.

II.6.- Résultats

Déperditions (W/k)	48.5	73.3
Décembre 1981	47 j	>60 j
Octobre 1982	25 j	27 j

DUREE DE SECHAGE EN FONCTION DU COEFFICIENT DE DEPERDITION

A partir de ces résultats, nous constatons que les durées de séchage sont peu différentes lorsque l'ensoleillement est fort, pour une étuve fortement isolée et une étuve isolée normalement. Par contre la différence de durée est importante lorsque l'ensoleillement est faible.

(EN HEURES	(OCTOBRE 1982 KS = 48.5	(OCTOBRE 1982 KS = 73.3	(DECEMBRE 1981 KS = 48.5
(Préséchage	(6	(7	(30
(60 - 45	(120	(122	(216
(45 - 30	(124	(164	(218
(30 - 12	(358	(398	(647

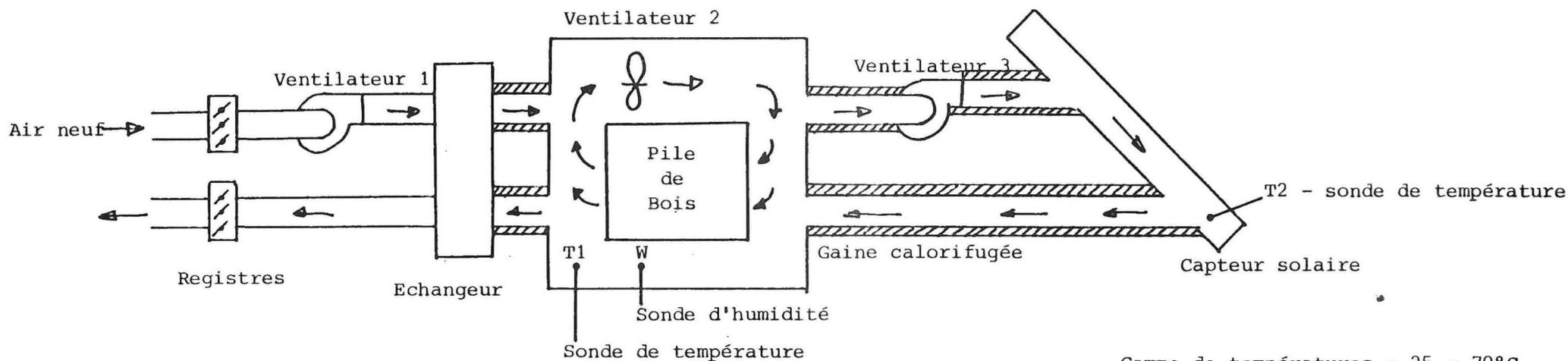
Ainsi le choix d'une étuve à isolation forte se justifie principalement pour les périodes d'ensoleillement moyen ou faible. De plus, de par le caractère expérimental de l'étuve, et la nécessité d'élaborer de nouvelles tables de séchage compatibles avec l'apport énergétique diurne, il est indispensable de s'assurer des meilleures caractéristiques thermiques de l'enceinte.

II.7.- Régulation et conduite du séchoir

La conduite du séchoir comprend trois systèmes :

- la boucle solaire
- le brassage
- l'admission d'air neuf

A l'intérieur de l'étuve deux sondes mesurent la température et l'humidité relative. La comparaison des valeurs lues et des valeurs de consigne va permettre de commander l'arrêt ou la mise en marche des ventilateurs.



Gamme de températures : 25 - 70°C

Humidité : 30 - 90%

AFFICHAGE Température maximum dans l'étuve T max
 Humidité minimum dans l'étuve W mini

LECTURE Température de l'étuve T1
 Humidité de l'étuve W
 Température de sortie capteur T2

COMMANDE SOLAIRE

Comparaison des températures T2 et T1 pour évaluer la disponibilité de l'énergie solaire.

1.- si $T_{\text{étuve}} < T_{\text{max}} - 1$ Démarrage du ventilateur V3 (si disponible par la commande de la boucle solaire)

 si $T_{\text{étuve}} \geq T_{\text{max}}$ Arrêt

2.- si $W > W_{\text{min}}$ Insufflation d'air neuf - démarrage du ventilateur V1

 si $W \leq W_{\text{min}}$ Arrêt

Commande manuelle pour le ventilateur V2

III - TECHNOLOGIE DE CONCEPTION ET DE REGULATION DU SECHOIR

III.1.- Installation aéraulique

Le système comporte 3 circuits aérauliques :

- a) Brassage de l'air dans l'étuve
- b) Ventilation des capteurs
- c) Renouvellement

L'ensemble du schéma de principe est représenté en figure 1.

III.2.- Brassage de l'air

Le brassage de l'air dans la pile de bois est assuré au moyen de 4 groupes de ventilateurs :

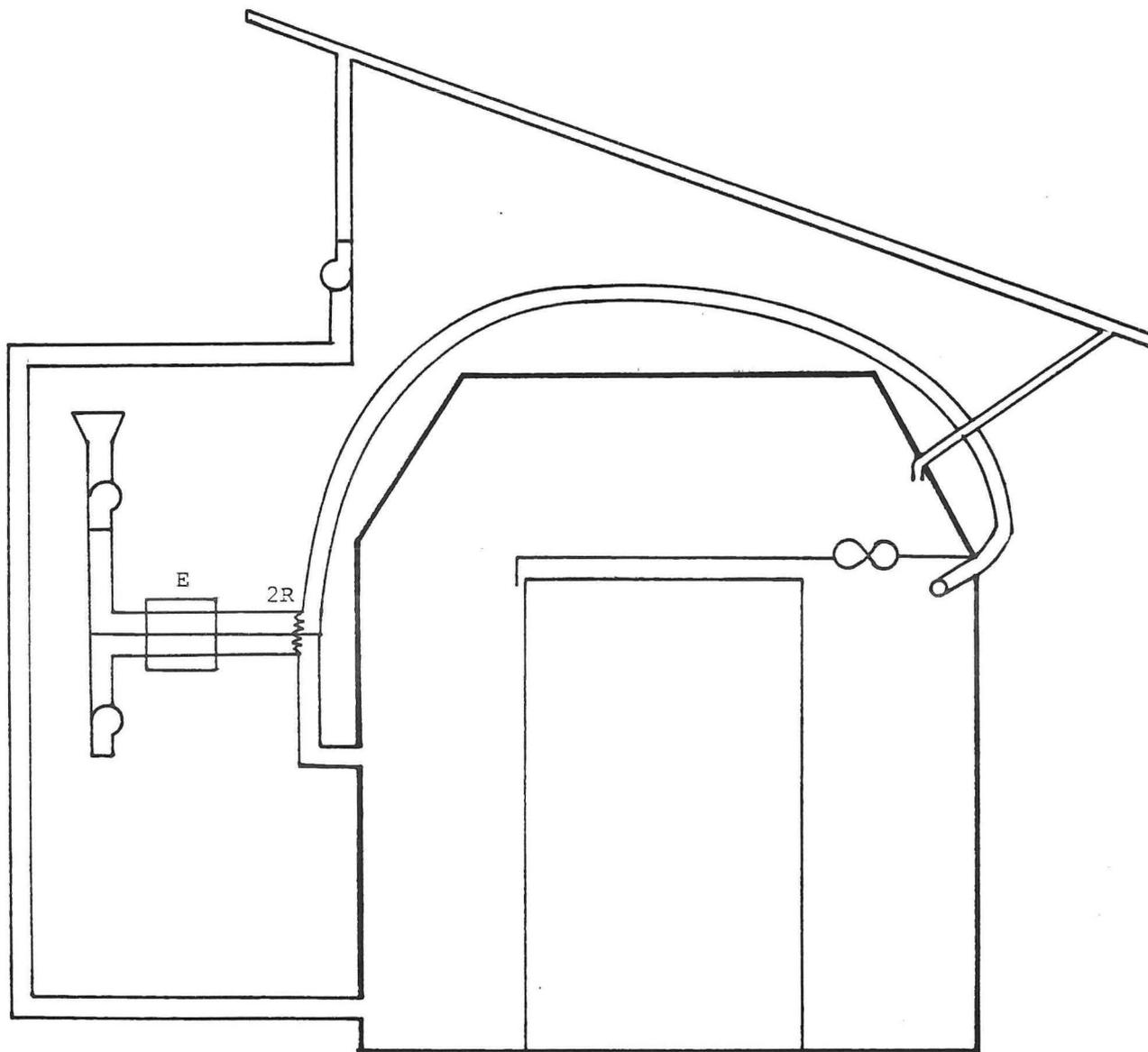
- Ventilateur hélicoïde type CIAT PL 65, 900 t/mn donnant un débit à 20°C de 10200 m³/h avec 5 mn de pression disponible.

Ces ventilateurs sont montés sur platine de 865 mm au carré ; la section de passage d'air étant d'un diamètre 665.

Les platines sont incorporées dans un faux plafond situé au-dessus du niveau de la pile de bois. Chaque partie du faux plafond porte deux ventilateurs.

Chaque faux plafond dans lequel sont incorporées deux platines sert de séparation entre les zones aval et amont des ventilateurs et recouvre complètement la pile de bois laissant libre l'espace situé entre la pile de bois et la cloison de l'étuve du côté opposé au ventilateur.

Deux rideaux en plastique semi-rigide entre le faux plafond et la pile de bois complètent la séparation amont - aval.



- enceinte isolée
- E échangeur
- 2R registre couplé

FIGURE 1

SCHEMA DE PRINCIPE

III.3.- Circuits solaires

Le circuit des capteurs solaires est composé de :

- 4 prises d'air placées en paroi verticale de l'étuve du côté opposé au ventilateur de brassage (côté hangar) à 0,5 m du sol.
- Chaque prise d'air est raccordée à un ventilateur CIAT BP 28 - 750 m³/h avec 17 mn de perte de charge disponible.
- Les gaines type LAMINOIRS DE STRASBOURG HELISTRA calorifugées en 50 mm
 - . de la prise d'air au ventilateur \emptyset int. 250 ; \emptyset ext. 355
 - . de chaque ventilateur aux collecteurs capteurs supérieurs \emptyset int. 250 ; \emptyset ext. 355 puis raccordées à 2 gaines \emptyset int. 200 ; \emptyset ext. 300.
 - . du collecteur capteur inférieur à l'étuve.
 - 8 départs en \emptyset int. 200, \emptyset ext. 300 raccordées à 4 gaines \emptyset int. 250, \emptyset ext. 355 elles-mêmes raccordées sur l'étuve en partie verticale du côté ventilateur à 1.5 m du sol.

Côté intérieur de l'étuve, la gaine de retour de l'air des capteurs est complétée par un coude à 90°. Les retours d'air dans l'étuve sont placés en dessus des ventilateurs de brassage.

Les capteurs solaires sont du type G.R.E.P.S. type 4 : 55 m². Ils sont placés en toiture sur une charpente spéciale et fixés sur des lisses parallèles au sol. La charpente spéciale doit permettre le relèvement du niveau bas des capteurs (voir coupe transversale de l'étuve).

III.4.- Renouvellement d'air

Du fait de la possibilité de couper l'étuve en deux parties, on prévoit deux groupes d'extraction identiques ; chaque groupe est composé de :

- 1.- Une prise d'air en carré de 100 à 1,4 m du sol

- 2.- Une gaine en carré de 100, type HELISTRA, calorifugée 50 mm jusqu'à l'échangeur.
- 3.- Un échangeur 150 m³/h, type SOFRACLIM, en tube de verre.
- 4.- Option : si le hangar où se trouve l'échangeur est fermé, une sortie d'air en toiture (Ø 150 non isolée).
- 5.- Une prise d'air neuf raccordée à l'échangeur en gaine Ø 150, non isolée.
- 6.- Un raccord échangeur séchoir en gaine, type HELISTRA, calorifugée.
- 7.- Deux orifices d'insufflation en aval des ventilateurs de brassage.
- 8.- Un ventilateur 150 m³/h en insufflation avant l'échangeur.
- 9.- Deux registres à étanchéité améliorée couplés en carré de 100 x 100 intérieur, type CRG HELISTRA.
- 10.- Un servo-moteur, type AUH 20 SCS.

Variante : un kit double flux, type ALDES, raccordé aux orifices 1 et 7 avec les registres 9 et le servo-moteur 10.

III.5.- Régulation

La régulation des trois sous-circuits est la suivante :

a) Brassage : commande manuelle

b) Capteur solaire :

Soit T max. la température maximale admissible au temps t dans l'étuve.

Les ventilateurs fonctionnent de la manière suivante :

Démarrage si $T \text{ étuve} < T \text{ max.} - 1^\circ\text{C}$

Arrêt si $T \text{ étuve} \geq T \text{ max.}$

Régulateur solaire type JAEGER ou DANFOSS

c) Renouvellement d'air :

L'humidité minimale W min. est donnée manuellement en même temps que T max.

Soit W l'humidité mesurée, la commande est :

$W > W_{\min}$. extraction et soufflage d'air insuffisant

$W \leq W_{\min}$. arrêt

Matériel type SCS

- Sonde pour l'humidité relative FK-HM 100/P1

- Régulateurs RPR 9

- Convertisseur de mesures YM-PO/100

- Potentiomètre de réglage digital YP 0/100

Le régulateur commande simultanément les deux fois deux registres (couplés) et les ventilateurs d'extraction.

NOTA BENE

Dans la version de base, il est prévu deux groupes d'extraction/insufflation avec échangeur mais une seule régulation commandant ces deux groupes.

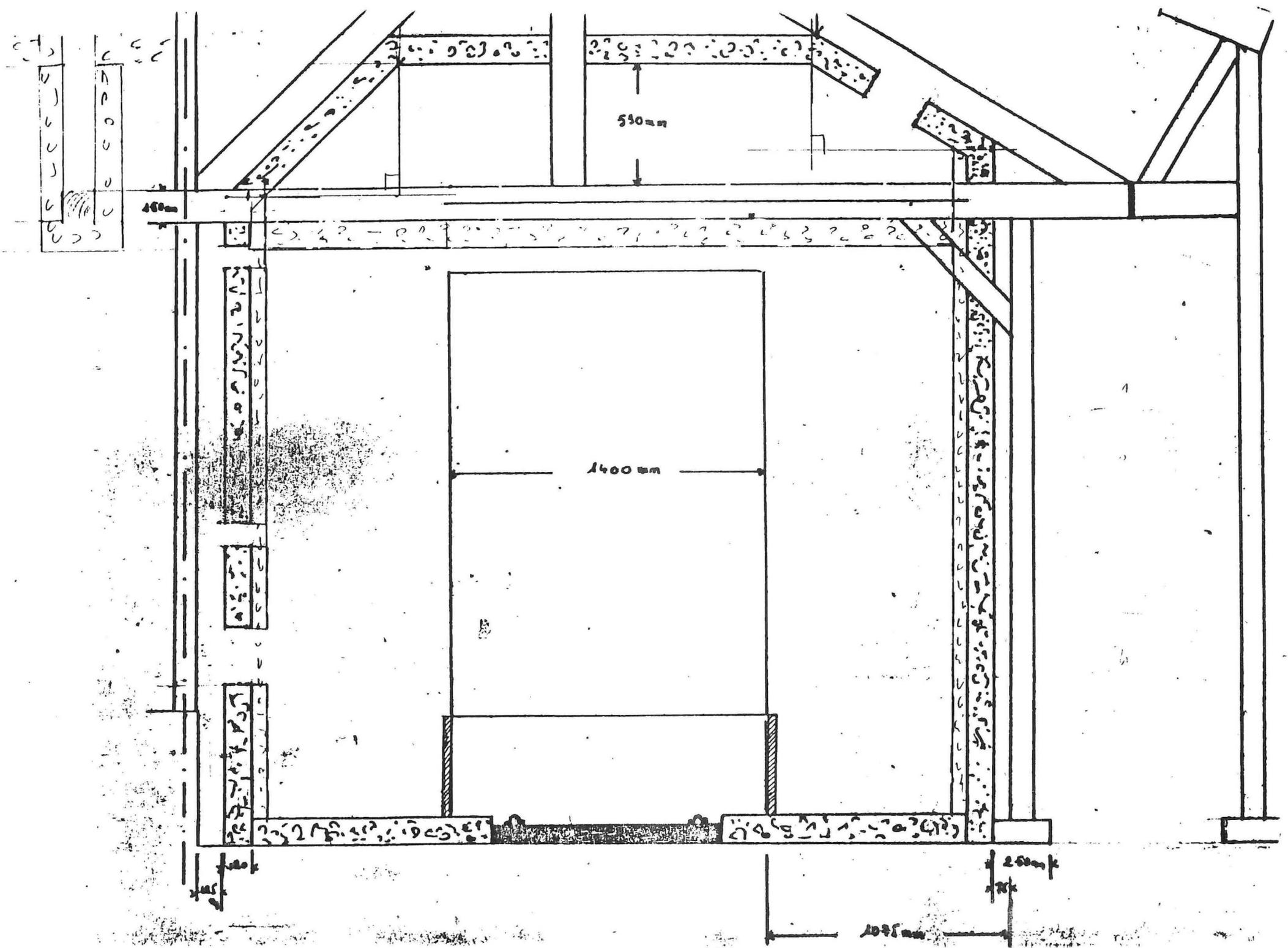
En effet, il est possible qu'une autre régulation soit installée ultérieurement afin de permettre des tests comparatifs si l'étuve est coupée en deux.

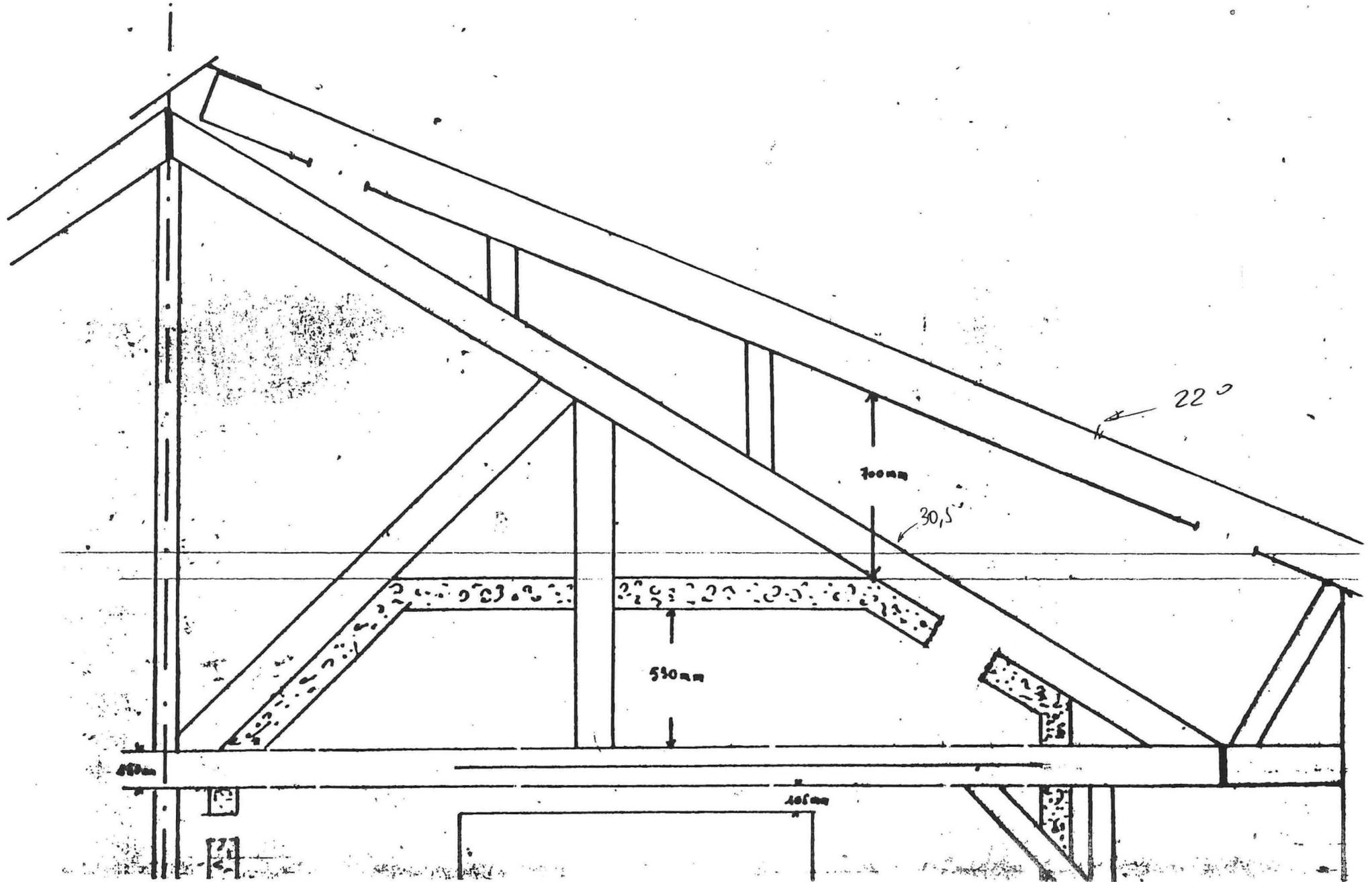
III.6.-Evaluation économique

Après consultation d'un bureau d'ingénierie, le prix de l'étuve en convection forcée rendue en kit au port du Havre s'élève à

H.T. 302 375 F

La rentabilité économique ne peut être évaluée qu'avec la connaissance du séchage qui sera déterminé par un suivi expérimental.





REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 - THEMELIN (A)
"Séchage solaire du bois. Etude bibliographique"
Publication CEEMAT sur financement AFME. Août 1982
- 2 - JOLY (P) et MORE-CHEVALIER (F)
"Théorie pratique et économie du séchage des bois"
Editions H. Vial - 204 p. 1980
- 3 - BOUSSICAUD (A)
"Le calcul des pertes de charge"
Numéro spécial de la revue CHAUD-FROID-PLOMBERIE
Editions EDIPA - 232 p. 1980
- 4 - GOSSE (L)
"Guide Technique de Thermique"
Editions DUNOD - 246 p. 1981
- 5 - "Aide mémoire du Thermicien A³ E² Th"
Edition E.E.T.I., 1982
- 6 - Quel bois peut-on appeler ACAJOU ?
Information Technique n° 212 du C.T.F.T. Juillet 1965
- 7 - ACAJOU D'AMERIQUE
Information Technique n° 239 du C.T.F.T. Octobre 1966
- 8 - VILLIERE (A)
"Conseils pratiques pour le séchage des bois"
cahier n° 56 du Centre Technique du Bois - C.T.B. 48 p.
Réédition 1977
- 9 - VILLIERE (A)
"Séchage du Bois"
Editions DUNOD, 1966
- 10 - VARICHON (B), PUIGGALI (J.R.)
"Détermination d'une orientation optimale de capteur :
relation entre rendement quotidien de captation et d'inclinaison
Revue Générale de Thermique, 1981
- 11 - DUFFIE & BECKMAN
Solar engineering of thermal processes
WILEY - 1980