

ECOLE INTER-ETATS D'INGENIEURS

## L'EQUIPEMENT RURAL

03 B.P. 7023 OUAGADOUGOU 03  
BURKINA FASO

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

## ANNEE 1995 - 1996

Présenté par :  
*ENDJIKAPOU Alain*

-----

### OPTIMISATION DU SECHOIR COQUILLAGE

|                                                   |
|---------------------------------------------------|
| E. I. E. R.                                       |
| Enregistré à l'Arrivée<br>le 04 JUIL. 1996 283/96 |

MENTION :

Professeur Responsable  
Y. COULIBALY

Bénin - Burkina - Cameroun - Centrafrique - Congo - Côte d'Ivoire - Gabon  
Guinée - Mali - Mauritanie - Niger - Sénégal - Tchad - Togo

## **DEDICACE**

Je dédie ce rapport de mémoire à :

- ma mère, DANGOUNDJI Julienne, pour son éducation, son amour, son soutien moral et matériel durant toutes mes années d'étude.
- mon père, ENDJIKAPOU Michel, pour ses conseils et son soutien moral et financier durant toutes mes années d'étude.
- mes grands parents, NGUEREZA et KOLOMO.
- toutes mes cousines et tantes maternelles.

## **REMERCIEMENTS**

Je les adresse ici à tous ceux qui, de près et de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Je pense particulièrement à :

- Monsieur, Yézouma COULIBALY, pour son appui technique et son entière disponibilité pendant la réalisation de ce mémoire;
- Monsieur, Théophile GARANGO qui, en plus de ses multiples tâches, a bien accepté, avec beaucoup d'enthousiasme de diriger ce mémoire;
- Monsieur, Christian LEGAY, ainsi que tout le personnel d'ABAC - GERES pour la mise en oeuvre de l'expérimentation et toutes les facilités qui m'ont été accordées pour bien mener ce travail;
- Mademoiselle, Gminassé kadidiatou BENASIDE, mon "animatrice" dans la préparation des produits.

Enfin, je tiens à remercier tous les élèves-ingénieurs de la 25 ème promotion qui m'ont souvent réservé leur affection durant nos trois années d'étude.

## **RESUME**

Le séchage solaire des récoltes est une pratique courante dans les pays en développement. Nous savons tous que les méthodes traditionnelles comportent plusieurs désavantages que l'on peut éviter en utilisant l'énergie solaire comme source de chaleur dans un système de séchage amélioré.

Le présent rapport expose les résultats d'une expérimentation qui consiste à étudier le problème de l'apparition des moisissures sur des produits mis à sécher dans le séchoir coquillage en périodes chaudes sans vent, et à optimiser le séchoir à travers des essais qui portent sur ses paramètres géométriques.

Quatre essais ont été effectués:

- Le premier essai a été effectué avec le séchoir témoin à vide.

A ce niveau il faut noter que la température interne moyenne est supérieure à 10°C par rapport à la température ambiante à l'extérieur.

- Le deuxième essai a été effectué avec le séchoir témoin en charge.

Cet essai nous a confirmé l'hypothèse d'une insuffisance de circulation d'air à l'intérieur du séchoir. En conséquence nous avons constaté l'apparition des moisissures sur les produits le lendemain matin. La durée de séchage a été de deux jours et sept heures (2 jours et 7 heures).

- Le troisième essai avec le séchoir N°1 (dont les ouvertures d'entrée de l'air sont plus larges que celles du séchoir témoin) nous a donné les résultats suivants:

- . amélioration de la convection naturelle,
- . vitesse de séchage relativement élevée,
- . disparition des moisissures,
- . durée de séchage plus court (1 jour et 7 heures).

- Le quatrième essai avec le séchoir N°2 qui n'est autre que le séchoir N°1 munie d'une cheminée solaire, nous a donné les résultats suivants:

- . accroissement de la circulation de l'air à l'intérieur du séchoir,
- . vitesse de séchage élevée,
- . disparition des moisissures,
- . durée de séchage assez faible (1 jour et 7 heures).

Notons que cette durée serait beaucoup plus réduite si l'on avait une journée ensoleillée au début du séchage.

Comparativement aux résultats obtenus, le dernier séchoir a été retenu comme séchoir le mieux approprié pour le séchage des produits minimisant les risques du développement des moisissures.

# **SOMMAIRE**

|                                                                                       | <b>Pages</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>INTRODUCTION</b>                                                                   | <b>1</b>     |
| <b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SECHAGE SOLAIRE</b>                                | <b>2</b>     |
| I.1 ) But du séchage                                                                  | 2            |
| I.2 ) Caractéristiques liées au produit                                               | 2            |
| I.3 ) Air humide                                                                      | 3            |
| I.4 ) Description du séchage                                                          | 4            |
| I.5 ) Pratique du séchage des produits alimentaires                                   | 5            |
| I.6 ) Différents types de séchoirs solaires                                           | 6            |
| I.7 ) Comparaison des différents types des séchoirs                                   | 7            |
| <b>CHAPITRE II : ETUDE DE L'OPTIMISATION DU SECHOIR</b>                               | <b>9</b>     |
| II.1 ) Description - Caractéristiques techniques du séchoir coquillage                | 9            |
| II.2 ) Fonctionnement du séchoir                                                      | 9            |
| II.3 ) Bilan thermique du séchoir                                                     | 10           |
| II.4 ) Analyse des données météorologiques                                            | 11           |
| II.5 ) Modification des ouvertures du séchoir<br>et conception d'une cheminée solaire | 15           |
| <b>CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE</b>                                             | <b>17</b>    |
| III.1 ) Protocole expérimental                                                        | 17           |
| III.1.1) Les séchoirs expérimentaux                                                   | 17           |
| III.1.2 ) Méthodologie du travail                                                     | 17           |
| III.2) Essai à vide                                                                   | 19           |
| III.2.1 ) Interprétation des résultats                                                | 24           |
| III.3 ) Essais en charge                                                              | 25           |
| III.3.1 ) Choix du produit expérimental                                               | 25           |
| III.3.2 ) Préparation du produit                                                      | 25           |
| III.3.3 ) Opération de blanchissement                                                 | 25           |
| III.3.4 ) Pesée des claies                                                            | 25           |
| III.3.5 ) Déroulement du séchage                                                      | 26           |
| III.3.6 ) Premier essai en charge                                                     | 26           |
| III.3.6.1 ) Interprétation des résultats                                              | 32           |
| III.3.7 ) Deuxième essai en charge                                                    | 33           |
| III.3.7.1 ) Interprétation des résultats                                              | 38           |
| III.3.8 ) Troisième essai en charge                                                   | 39           |
| III.3.8.1 ) Interprétation des résultats                                              | 45           |
| III.4 ) Conclusion sur les essais                                                     | 45           |
| <b>CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS</b>                                                  | <b>47</b>    |
| <b>BIBLIOGRAPHIE</b>                                                                  | <b>48</b>    |
| <b>ANNEXES</b>                                                                        |              |

## **INTRODUCTION**

Le séchage solaire demeure aujourd'hui la méthode de conservation des produits alimentaires la plus couramment employée dans nos pays. Son but principal est de stabiliser leur qualité pendant une certaine période et d'en permettre la commercialisation durant toute l'année.

Depuis plusieurs années, les séchoirs "coquillage" qui sont des séchoirs agro-alimentaires à utilisation essentiellement domestique, présentent un intérêt croissant auprès des familles, des coopératives et groupements des femmes de certains pays d'Afrique de l'Ouest (Sénégal, Burkina Faso, Mali et Niger) parmi lesquels nous avons :

- Produits séchés de bonne qualité hygiénique et organoleptique;
- Séchoirs générant des revenus monétaires par la commercialisation des produits séchés;
- Commodité d'utilisation, etc.

L'utilisation de ces séchoirs très bien appréciée par les populations relève cependant quelques défaillances techniques : il a été constaté dans certaines régions du Burkina Faso qu'en périodes chaudes sans vent, des moisissures pourraient se développer sur des produits mis à sécher.

Ce qui pourrait être préjudiciable pour la diffusion massive des séchoirs.

En effet, les moisissures sont des champignons microscopiques, non toxiques, qui développent à la surface des produits une sorte de mousse répartie en taches veloutées ou en poches déliquescents.

Ils sont responsables d'altérations du goût et de l'aspect du produit, et le rendent impropre à la consommation.

Ils se développent dans des milieux à forte humidité, maintenus à des températures comprises entre 20°C et 50°C.

Par conséquent, pour faire disparaître ces champignons, nous envisageons, après avoir passé en revue les notions de base sur le séchage solaire, examiner les points suivants :

- Une étude de l'optimisation du séchoir portant sur la description et caractéristiques techniques du séchoir; sur l'analyse du fonctionnement, le bilan thermique et des modifications techniques.
- Une étude expérimentale sur différents séchoirs, basée sur des mesures de températures, humidités, vitesses du vent, teneur en eau, poids et durée de séchage des produits, à l'issue de laquelle un séchoir pourra être désigné comme séchoir optimisé.

Et enfin nous clôturons cette étude par des recommandations et suggestions.

## **CHAPITRE I. GENERALITES SUR LE SECHAGE SOLAIRE.**

### **I.1.) BUT DU SECHAGE :**

Le séchage a pour but de déshydrater un produit de façon à diminuer sa teneur en eau, en dessous d'une certaine valeur afin de permettre sa conservation.

### **I.2.) CARACTERISTIQUES LIEES AU PRODUIT :**

#### **I.2.1 ) Teneur en eau d'un produit.**

Tout produit végétal ou animal humide contient :

- une quantité d'eau de masse  $m_e$ ,
- une matière sèche de masse  $m_s$ .

On définit la teneur en eau ou le degré d'humidité d'un produit (en base sèche) par le rapport entre la masse d'eau ( $m_e$ ) dans le produit et la masse de matière sèche ( $m_s$ ) qu'il contient.

$$\text{On a : } X = \frac{m_e}{m_s}$$

Quelquefois, elle se définit (en base humide) par le rapport entre la masse d'eau dans le produit et la masse totale ( $m$ ) de ce produit, qui est la somme de la masse d'eau et de la masse de matière sèche.

$$\text{On a : } mc = \frac{m_e}{m} = \frac{m_e}{m_e + m_s}$$

Ces deux grandeurs sont liées par les relations suivantes :

$$X = \frac{mc}{1 - mc} \quad \text{et} \quad mc = \frac{X}{1 + X}$$

#### **I.2.2 ) Activité de l'eau dans un produit.**

Elle se définit, pour une température donnée, par le rapport entre la pression de vapeur d'eau du produit  $P_v(\theta)$  et la pression de vapeur d'eau pure  $P_o(\theta)$ .

$$\text{On a : } aw = \frac{P_v(\theta)}{P_o(\theta)}$$

L'activité de l'eau dans un produit est toujours inférieure ou égale à 1.

Lorsqu'elle est voisine de 1, l'eau s'évapore comme de l'eau pure à l'air libre. On dit que le produit contient de l'eau libre.

Par contre lorsqu'elle est inférieure à 1, on dit que le produit contient de l'eau liée. L'évaporation de cette eau est plus difficile et demande plus d'énergie.

L'activité de l'eau varie en fonction de la teneur en eau du produit.

La courbe donnant, pour une température donnée, la variation de l'activité de l'eau  $aw$  en fonction de la teneur en eau du produit est appelée isotherme de sorption de ce produit.

### **I.3.) AIR HUMIDE :**

Un mélange d'air sec et de vapeur d'eau est appelé air humide. Il agit sur le temps et la vitesse de séchage. Toutefois, une diminution de l'humidité de l'air favorise un accroissement de la vitesse de séchage. Ainsi, il est important de connaître l'humidité de l'air afin de prévoir la réhydratation et le croûtage du produit.

#### **I.3.1 ) Grandeurs caractéristiques de l'air humide :**

##### **I.3.1.1 ) Températures :**

La température sèche ( $\theta$ ) est la température mesurée au thermomètre ordinaire ou à l'aide d'un thermographe.

La température humide ( $\theta_h$ ) est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air. Elle est mesurée avec un thermomètre humide.

La température de rosée ( $\theta_r$ ) est la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser. Elle est repérée avec un hygromètre à point de rosée.

##### **I.3.1.2 ) Humidités :**

L'humidité absolue ou la teneur en eau de l'air se définit comme étant la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air par kg d'air sec :

$$\text{On a: } x = \frac{m_v}{m_{as}}$$

où  $m_v$ ,  $m_{as}$  sont des masses de vapeur d'eau et d'air sec contenus dans le même volume d'air humide.

Cependant la quantité de vapeur d'eau que l'air peut contenir est toujours inférieure ou égale à l'humidité absolue. Cette grandeur s'exprime en gramme d'eau par kilogramme d'air sec (g d'eau/Kg.as).

L'humidité relative (HR) ou le degré hygrométrique se définit par le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air à la température  $\theta$  et la pression maximale si l'air était saturé à cette température.

$$\text{On a: } HR(\%) = \frac{P_v(\theta)}{P_o(\theta)} \times 100$$

##### **I.3.1.3 ) Enthalpie :**

C'est la chaleur totale (notée  $i$ ) contenue dans l'air humide. Elle s'exprime en KJ/Kg.

##### **I.3.1.4 ) Pressions :**

Elles sont liées à la température par la loi des gaz parfaits ( $P V = n R T$ ).

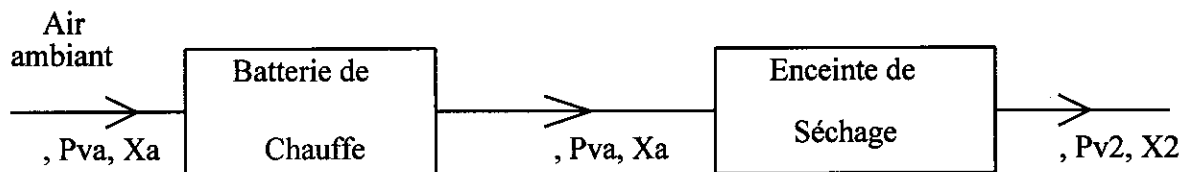
Toutes les grandeurs décrites ci-dessus peuvent être déterminées à l'aide des diagrammes de l'air humide ou à l'aide d'un programme basic utilisé avec des machines à calculer programmables Sharp, PC 1403H, etc.

#### **I.4.) DESCRIPTION DU SECHAGE :**

##### **I.4.1 ) Principe du séchage.**

Pour sécher un produit, il faut un apport d'énergie (dans notre cas c'est l'énergie solaire) et une circulation d'air pour entraîner la vapeur d'eau issue du produit.

Le schéma de principe d'une installation de séchage est le suivant :



avec  $\theta_a < \theta_1$  et  $\theta_1 > \theta_2$ ,  $X_2 > X_a$

$\theta$ ,  $P_v$ ,  $X$  représentent respectivement la température sèche, la pression de vapeur d'eau contenue dans l'air et la teneur en eau de l'air.

La différence  $(X_2 - X_a)$  correspond à la masse d'eau retirée au produit par Kg d'air sec ayant traversé le séchoir.

##### **I.4.2 ) Température de séchage :**

L'évaporation de l'eau à la surface du produit est due à la différence entre la pression de la vapeur d'eau du produit et celle de l'air ( $P_v - P_{va} > 0$ ).

L'échauffement de l'air ne modifie pas la pression de vapeur d'eau contenue dans l'air.

Pour augmenter la vitesse de séchage, il faut donc, à  $P_{va}$  constant, augmenter  $P_v$ .

En admettant que  $a_w$  varie peu avec la température :

$$a_w = \frac{P_v(\theta_1)}{P_s(\theta_1)} \approx \frac{P_v(\theta_2)}{P_s(\theta_2)} \quad \text{avec } \theta_2 > \theta_1$$

donc  $P_s(\theta_2) > P_s(\theta_1) \Rightarrow P_v(\theta_2) > P_v(\theta_1)$  d'où  $P_v(\theta_2) - P_{va} > P_v(\theta_1) - P_{va}$

La température du produit a donc intérêt à être plus élevée possible pour obtenir une vitesse de séchage importante.

Cependant elle ne doit pas dépasser une certaine valeur  $\theta_{max}$  au delà de laquelle le produit peut être altéré ou détruit.

### **I.4.3 ) Courbes de séchage :**

Dans le cas d'une couche mince de produit à sécher, la vitesse de séchage met en évidence trois phases :

- La première phase (à vitesse croissante) est courte : elle dure le temps d'équilibrer le transfert de vapeur d'eau hors du produit avec le transfert de chaleur vers celui-ci.

- La deuxième phase (à vitesse constante) correspond à l'évaporation de l'eau libre ( $a_w = 1$ ) en surface du produit; elle est sans cesse renouvelée par de l'eau venant de l'intérieur du produit.

Durant cette phase, la surface du produit est à la température humide de l'air et reste constante.

- La troisième phase (à vitesse décroissante) correspond à l'évaporation de l'eau liée: il n'y a plus d'eau libre en surface, et l'eau doit migrer de l'intérieur vers la surface du produit sous forme de vapeur.

Le déplacement de cette vapeur est très lent. Le refroidissement de l'air devient moins important, la température du produit augmente et tend vers la température sèche de l'air.

Cette augmentation de température doit être impérativement contrôlée pour ne pas dépasser la température maximale admissible par le produit, afin d'éviter la dégradation du produit.

## **I.5.) LA PRATIQUE DU SECHAGE DES PRODUITS ALIMENTAIRES:**

### **I.5.1.) La préparation des produits avant le séchage.**

Avant que les produits ne soient mis à sécher, ils doivent subir les opérations suivantes : le triage, le lavage, l'épluchage, le découpage et prétraitement.

- Le triage permet d'écarter les produits en mauvais état et trop mûrs.

- Le lavage avec une eau propre permet d'enlever les souillures et une grande partie des microorganismes superficiels.

- L'épluchage consiste à enlever la peau externe du produit ainsi que les trognons, racines, queues et fils.

Après épluchage, on doit procéder au lavage avant de découper les produits.

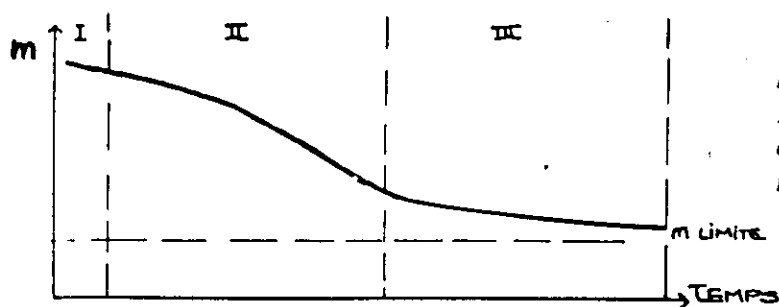
- Le découpage en dés, tranches, lamelles ou filets facilite le séchage.

Après ces opérations, un prétraitement (blanchissement, sulfuration, salage, fumage, trempage dans de l'eau avec un agent conservateur, etc) s'avère nécessaire pour certains produits.

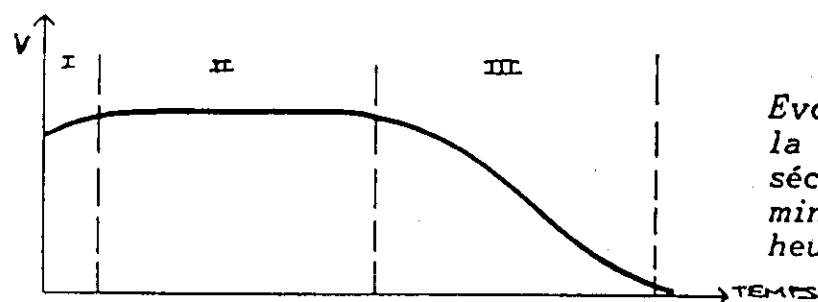
Il a pour but d'améliorer la conservation, le goût, la couleur et le parfum du produit; ce qui permet de l'adapter à la demande.

### **I.5.2.) Le séchage :**

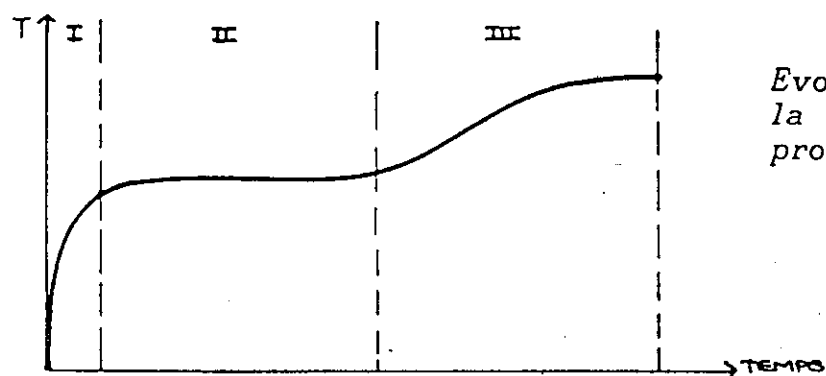
Le séchage consiste, après toutes les opérations mentionnées ci-dessus, à étaler le produit sur les claies de séchage à l'intérieur du séchoir en couche mince et répartie régulièrement.



Evolution dans le temps de la masse d'eau ( $m$ , en kg) contenue dans une couche mince



Evolution dans le temps de la vitesse ou allure de séchage  $V$  d'une couche mince (en kg d'eau par heure)



Evolution dans le temps de la température  $T$  du produit à sécher

#### Phase I

La chaleur de l'air sert surtout à chauffer le produit ( $T$  augmente) L'évaporation augmente progressivement.

#### Phase II

Le produit est chaud et cède son eau libre à vitesse constante. La chaleur de l'air compense cette vaporisation : la température du produit est constante.

#### Phase III

Toute l'eau libre est évaporée. La vitesse de séchage  $x$  ralentit. Le pouvoir évaporatoire de l'air est supérieur à l'eau évaporée. Cette vaporisation ne compense pas la chaleur apportée par l'air : la température du produit augmente.

Les dégradations du produit peuvent se produire lorsque la durée et la température de séchage sont importantes.

Pour une température trop élevée, plus le temps de maintien à température sera important, plus il se produit des phénomènes de brunissement, de croûtage ou même de destruction des vitamines.

Notons que pour chaque produit, il est défini une température maximale admissible qu'il est recommandé de ne pas dépasser (voir annexe).

### **1.5.3.) Le conditionnement et le stockage :**

Les produits séchés doivent être conditionnés dans un bon emballage et bien stockés. Nous savons que les produits séchés absorbent rapidement l'humidité; pour cela, il est nécessaire de les emballer aussitôt après le séchage.

Pour une bonne conservation des produits secs, on doit veiller à ce qu'ils soient stockés dans des bonnes conditions :

- Au niveau de la famille: les produits secs emballés doivent être mis dans un endroit sec, aéré, propre et si possible dans un endroit frais à l'abri de la lumière.
- Au niveau d'un magasin de stockage: l'endroit doit être également sec, aéré, propre, frais et à l'abri de la lumière. Il doit être nettoyé et désinfecté en faisant un vide sanitaire.

## **1.6.) DIFFERENTS TYPES DE SECHOIRS SOLAIRES :**

Suivant la façon d'utilisation du rayonnement solaire, les séchoirs solaires peuvent être classés en cinq catégories :

### **1.6.1 ) Les séchoirs naturels :**

Ils utilisent directement le soleil et le vent. Le produit est reparti sur des claies ou des nattes, dans des cribbs, ou disposé à même le sol. Ces séchoirs sont les plus couramment utilisés en milieu paysan.

Exemples (voir annexe) : - le séchoir à plateau.  
- le séchoir à cage grillage.

### **1.6.2 ) Les séchoirs directs :**

Les rayons du soleil frappent directement les produits disposés dans les séchoirs. Ces séchoirs sont généralement constitués de chassis vitré. La circulation d'air se fait par tirage naturel dû à l'échauffement (effet de cheminée) ou par action du vent sur les ouvertures.

Exemples (voir annexe) : - le séchoir tente.  
- le séchoir direct pour produits en vrac.

### **1.6.3 ) Les séchoirs indirects :**

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte (à l'abri du soleil). Le séchage se fait par passage de l'air dans un capteur à air ou autre préchauffeur.

Le déplacement de l'air peut être produit mécaniquement (Ventilateur) ou par tirage naturel avec une cheminée solaire.

Exemples (voir annexe) : - le séchoir coquillage.  
- le séchoir à stockage thermique.

#### **I.6.4 ) Les séchoirs mixtes :**

Ils utilisent l'action combinée du rayonnement solaire et de l'air préchauffé dans des capteurs.

Exemples (voir annexe) : - le séchoir pour fruits et légumes.  
- le séchoir mixte ventilé.

#### **I.6.5 ) Les séchoirs hybrides :**

Ils utilisent, en plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (biogaz; bois, électricité, fuel, etc) pour augmenter le chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'énergie solaire sert principalement au préchauffage de l'air.

Exemples (voir annexe) : - le séchoir à gaz type armoire CEAS.

### **I.7 ) AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES DIFFERENTS TYPES DE SECHOIRS SOLAIRES:**

| <b>TYPES DE SECHOIRS</b> | <b>AVANTAGES</b>                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>INCONVENIENTS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Séchoirs naturels</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Très bon marché.</li> <li>- Utilisation facile.</li> </ul>                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dégradation des produits par les intempéries, insectes, rats, poussière, etc.</li> <li>- Nécessite une intervention humaine régulière.</li> <li>- Destruction de vitamines A et C.</li> <li>- Pertes de produits mal séchés.</li> <li>- Jaunissement des produits.</li> </ul> |
| <b>Séchoirs directs</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produits protégés contre la poussière, les mouches et autres insectes.</li> <li>- Séchage rapide du fait de l'augmentation de la température du produit à sécher (effet de serre).</li> <li>- Construction simple.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Température élevée en fin de séchage.</li> <li>- Oxydation des vitamines A et C par les rayons UV du soleil.</li> <li>- Jaunissement des plantes aromatiques.</li> <li>- Séchoirs fragiles.</li> <li>- Coûts d'entretien assez élevés.</li> </ul>                             |

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Séchoirs indirects</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produits à l'abri des UV et des nuisibles (insectes, rats, poussière).</li> <li>- Produits gardant leur couleur.</li> <li>- Séchage assez rapide.</li> <li>- Température des produits limitée.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Durée de séchage pouvant être supérieure celle du séchage direct.</li> <li>- Construction coûteuse.</li> <li>- Nécessite dans certains cas des rotations des claies au cours du séchage.</li> </ul> |
| <b>Séchoirs mixtes</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Séchage rapide.</li> <li>- Produits protégés contre toute source de contamination.</li> <li>- Bien adaptés aux régions de faible latitude (ex : U.S.A)</li> </ul>                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Construction coûteuse.</li> <li>- Transferts de chaleur et d'eau complexes et mal connus.</li> </ul>                                                                                                |
| <b>Séchoirs hybrides</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualité et débit des produits indépendants des conditions climatiques.</li> <li>- séchage de grande quantité des produits.</li> </ul>                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Très coûteux.</li> <li>- Fabrication complexe.</li> <li>- difficile à installer en milieu paysan.</li> </ul>                                                                                        |

## CHAPITRE II. ETUDE DE L'OPTIMISATION DU SECHOIR.

### II.1 ) DESCRIPTION - CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU SECHOIR.

Le séchoir coquillage (cf Fig ci- après) est un séchoir indirect non couvert à convection naturelle. Il est réalisé à partir de plaques métalliques peintes en noir mat. Il se compose d'un couvercle et d'une partie inférieure de formes côniques, d'où son apparence et son nom de coquillage.

Le couvercle ou la coquille supérieure, de hauteur 15 cm et de diamètre à la base 1,10m, est muni à son centre d'un trou ( $\phi = 14$  cm) par lequel est évacué l'air humide provenant de l'intérieur du séchoir.

Ce trou est recouvert d'un chapeau mobile empêchant à l'eau de pluie de pénétrer à l'intérieur du séchoir d'une part, et d'autre part il permet le réglage du débit d'air sortant pendant la deuxième phase du séchage.

Le chapeau coulisse grâce à un système à trois pattes pénétrant le couvercle et est maintenu en position ouverte par des goupilles.

Le couvercle est lié à la coquille inférieure par l'intermédiaire d'une ceinture appelée virole. La virole peinte aussi en noir, de hauteur 15 cm et de diamètre 1,10m, possède 3 trous grillagés de  $3 \times (70 \times 2) = 420 \text{ cm}^2$  pour l'entrée d'air.

La coquille inférieure identique à la supérieure, solidaire de la virole, repose sur 3 pieds métalliques de hauteur 50 cm et comporte 3 trous grillagés de  $3 \times 474 = 1442 \text{ cm}^2$  pour l'entrée d'air tout en empêchant le passage aux insectes et rongeurs.

A l'intérieur du séchoir, il y a 3 claies : deux claies principales de surface  $0,9 \text{ m}^2$  chacune et la troisième, plus petite, appelée claie de finition, dont la surface est de  $0,4 \text{ m}^2$ , reçoit les produits presque secs.

Par ailleurs, nous avons :

- deux poignées de transport soudées de part et d'autre de la coquille inférieure.
- deux supports de couvercle pivotant autour des poignées, qui permettent de maintenir le couvercle en position ouverte lors du chargement.

### II.2 ) FONCTIONNEMENT DU SECHOIR.

Les produits à sécher sont disposés sur deux claies internes.

La coquille supérieure capte les rayons du soleil, s'échauffe et ensuite émet sur les produits un rayonnement d'énergie :  $E = \varepsilon_p \times \sigma \times T_p^4$

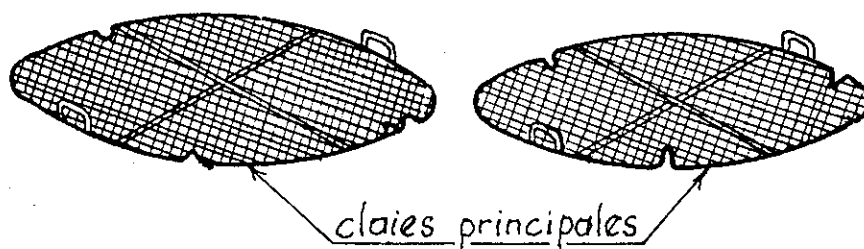
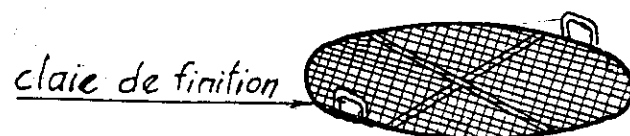
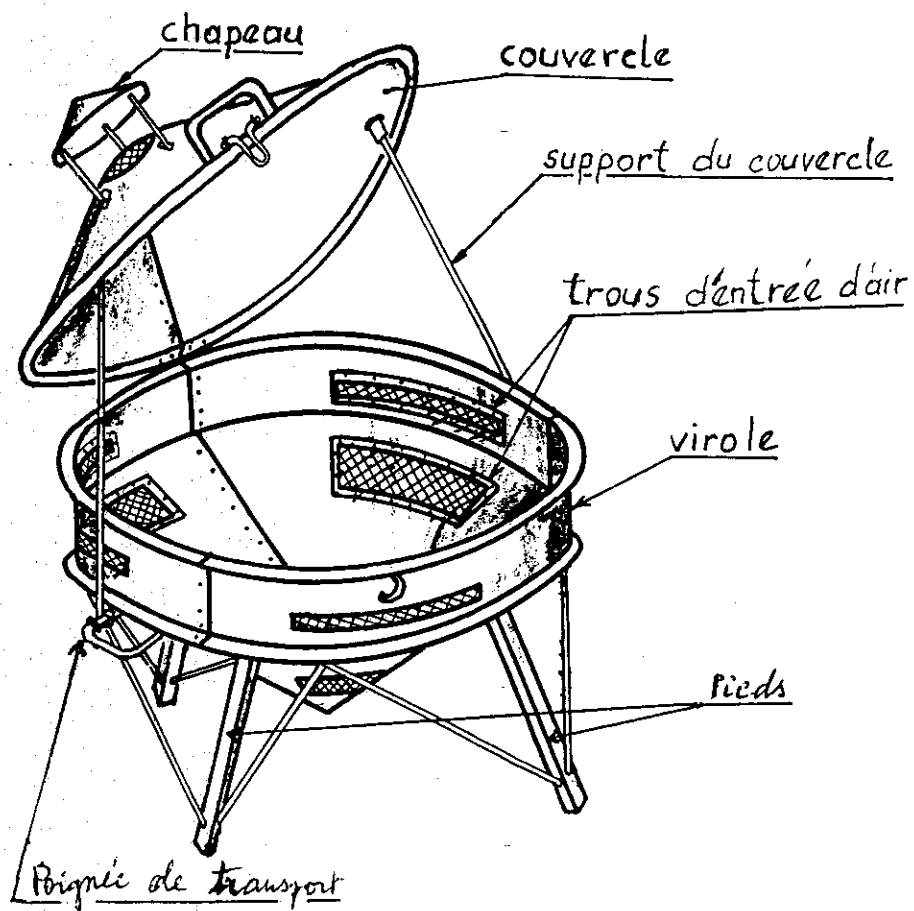
où :  $\varepsilon_p$  est l'émissivité de paroi de la coquille supérieure.

$\sigma$  est la constante de Stephan - Boltzmann =  $5,675.10^8 \text{ W/m}^2.\text{K}^4$

$T_p$  est la température moyenne de paroi de la coquille supérieure.

L'air extérieur entre dans le séchoir à travers les ouvertures de la coquille inférieure et de la virole. Il passe sur les produits, enlève la vapeur d'eau du produit, s'humidifie et monte pour être évacuer par l'orifice de la coquille supérieure.

En effet, ce tirage d'air est créé par la différence de pression entre l'air situé en bas et en haut de la cheminée.



Cette différence de pression est donnée par la relation :

$$\Delta mc = (\rho_1 - \rho_2) \times g \times h \quad (\text{en Pa}).$$

où :  $\rho_1$  est la masse volumique de l'air en bas de la cheminée, ( $\text{Kg/m}^3$ )

$\rho_2$  est la masse volumique de l'air en haut de la cheminée, ( $\text{Kg/m}^3$ )

$h$  est la hauteur de la cheminée, (m)

$g$  est l'accélération de la pesanteur. ( $\approx 10\text{m/s}^2$ )

Le séchage du produit peut se décomposer en deux phases:

- la phase 1 est la phase initiale. Elle correspond à une répartition uniforme de l'eau dans le produit. Cette phase se termine lorsque la surface est sèche. Pour accélérer cette phase, le courant d'air doit avoir une vitesse la plus élevée possible.

- la phase 2 lui succède: le processus est de permettre que l'eau puisse migrer à l'intérieur du produit: cette phase exige que la température du produit soit la plus élevée possible. Cette température étant obtenue par le rayonnement de la coquille, on a donc intérêt à surchauffer cette surface donc à limiter la circulation de l'air qui a tendance à la refroidir.

### **II.3 ) BILAN THERMIQUE DU SECHOIR.**

La performance du séchoir est décrite par le bilan de l'énergie des différents éléments qui le constituent :

#### **\* La coquille supérieure.**

Elle s'échauffe sous l'action du rayonnement solaire.

L'énergie reçue ( $E = \varepsilon \times \sigma \times T^4$ ) est compensée par:

- l'échange convectif externe dû à l'action du vent local,
- l'échange convectif interne dû à l'action du flux d'air interne provoqué par la convection naturelle,
- le rayonnement vers l'extérieur,
- le rayonnement interne vers les produits qui sèchent sur les claies. C'est d'ailleurs ce seul apport qui va servir à élever la température de ces produits.

#### **\* La virole et la coquille inférieure.**

Au cours de la journée, quand le soleil suit sa trajectoire, une grande partie de ces éléments se trouve sous l'ombre de la coquille supérieure; ils s'échauffent sous l'effet de la chaleur émise par cette dernière et du rayonnement solaire.

Ils participent également à la surchauffe de l'air interne.

Notons que ces éléments ne subissent pas de variations thermiques notables.

#### **\* L'air de séchage.**

- L'air s'échauffe au contact de la face interne de la coquille supérieure;
- Il se réchauffe au contact des produits;
- Il évacue l'eau du produit.

#### **\* Les produits.**

- les produits reçoivent l'énergie rayonnée par le couvercle.
- ils sont refroidis par l'air qui entre dans le séchoir, à la température ambiante.

- leur humidité interne est évacuée par l'air.

Avant de procéder à l'optimisation du séchoir, nous avons d'abord cherché les causes du développement des moisissures en analysant les données météorologiques; ensuite par des observations relatives à la circulation d'air dans le séchoir.

#### **II.4 ) ANALYSE DES DONNEES METEOROLOGIQUES :**

A partir des données météorologiques (Températures sèches, Vitesses du vent et humidités relatives) du mois d'Avril et Mai (période dans laquelle il a été constaté l'apparition des moisissures sur les produits mis à sécher), nous avons tracé les variations de ces différents paramètres, d'où il en ressort les résultats suivants :

- Pour les températures, on constate qu'en Avril la température moyenne maximale se situe entre 36°C et 38°C, et ceci entre 12 à 18 heures.

Par contre en Mai, on remarque qu'il y ait une baisse progressive de celle-ci depuis le 1er décade au dernier, mais elle reste entre 33°C et 38°C pour les mêmes heures que ci dessus.

Pour ces deux mois, on constate que la température moyenne minimale est autour de 25°C et ceci à partir de 6 heures.

- Pour les vitesses, on constate que la plus part des vitesses faibles sont enregistrées à 6 heures et à 21 heures.

La vitesse moyenne minimale est de 1,5 m/s pour les deux mois.

- Pour les humidités, on voit que l'humidité relative moyenne minimale pour le mois d'Avril est de 20%; alors qu'en Mai elle est de 30%.

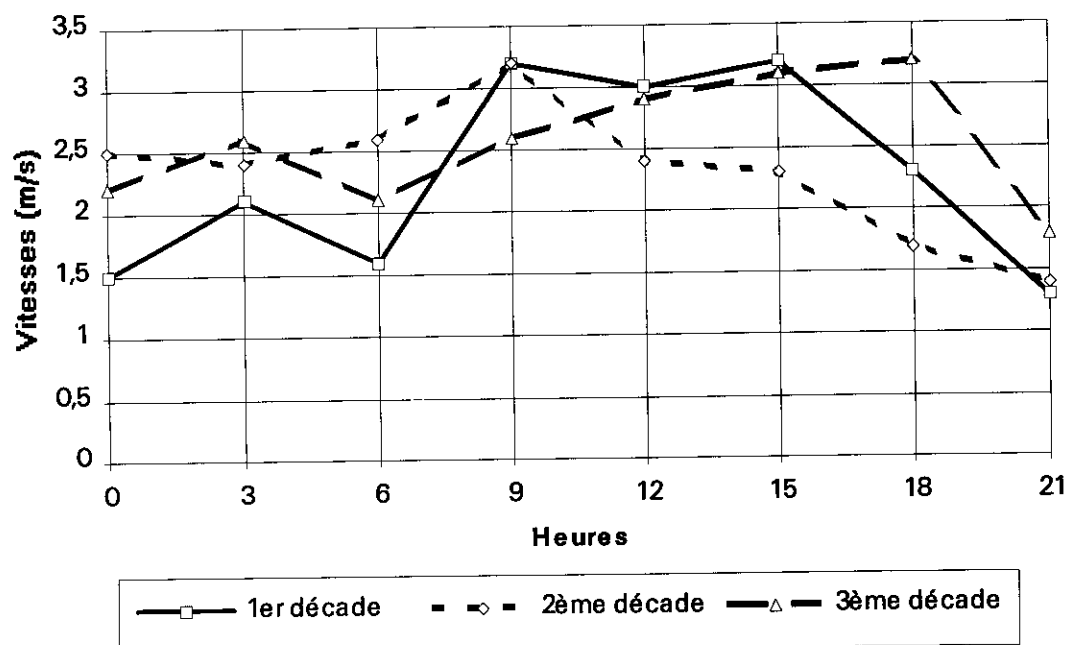
De même on constate que l'humidité relative moyenne maximale en Avril est de 60%; par contre en Mai elle est de 75%.

L'interprétation de ces résultats est la suivante :

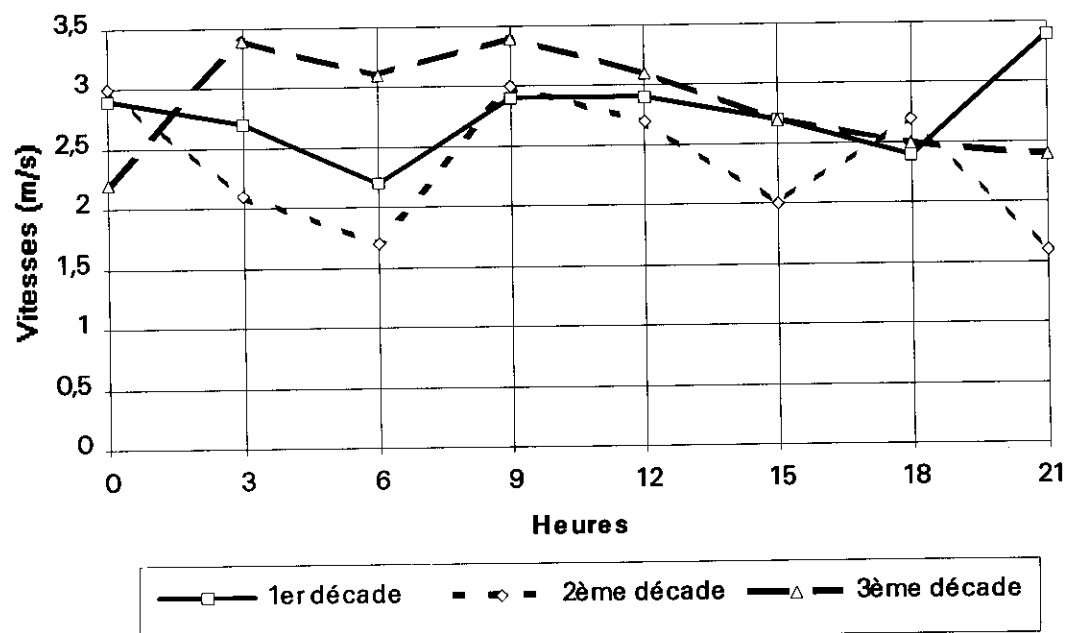
La vitesse et la température moyenne minimale de l'air ambiant étant respectivement égale à 1,5 m/s et 25°C, ce qui est suffisant pour une opération de séchage. Nous pouvons donc dire que le développement des moisissures n'est pas dû à ces deux paramètres.

Par contre, nous avons constaté que l'humidité relative a augmenté en Mai, ce qui pourrait rendre la difficulté à sécher les produits à forte humidité tels que la tomate et la mangue. D'où en cette période, on peut constater des moisissures sur les produits à sécher.

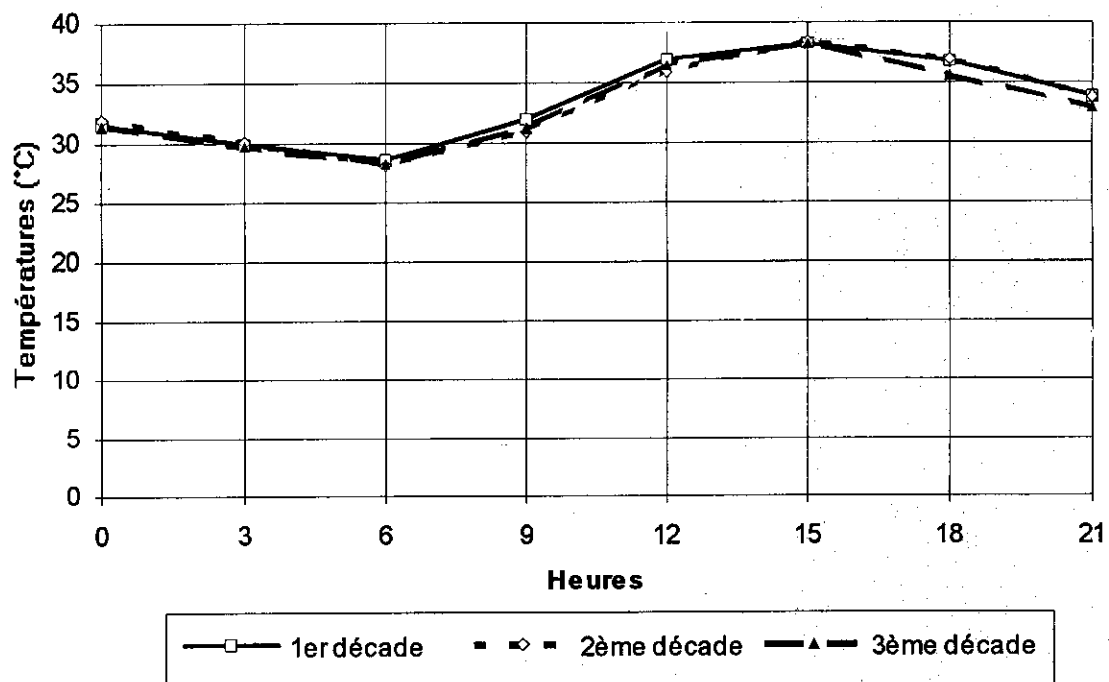
Variation tri-horaire de la vitesse du vent (Avril 1995)



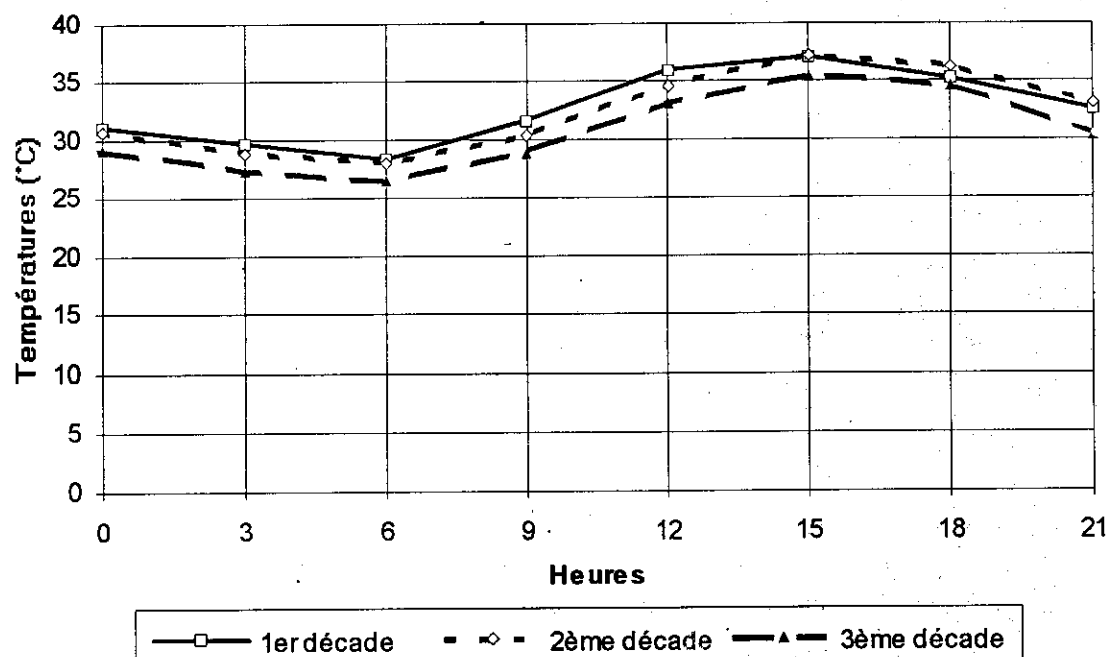
Variation tri-horaire de la vitesse du vent (Mai 1995)



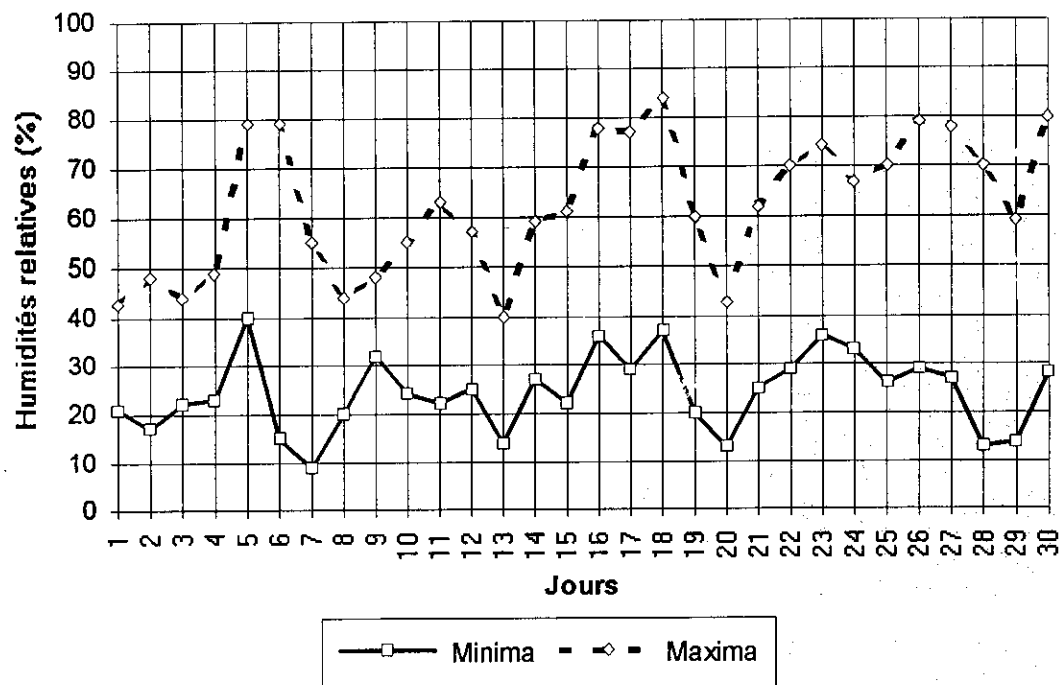
**Variation tri-horaire de la température sèche (Avril 1995)**



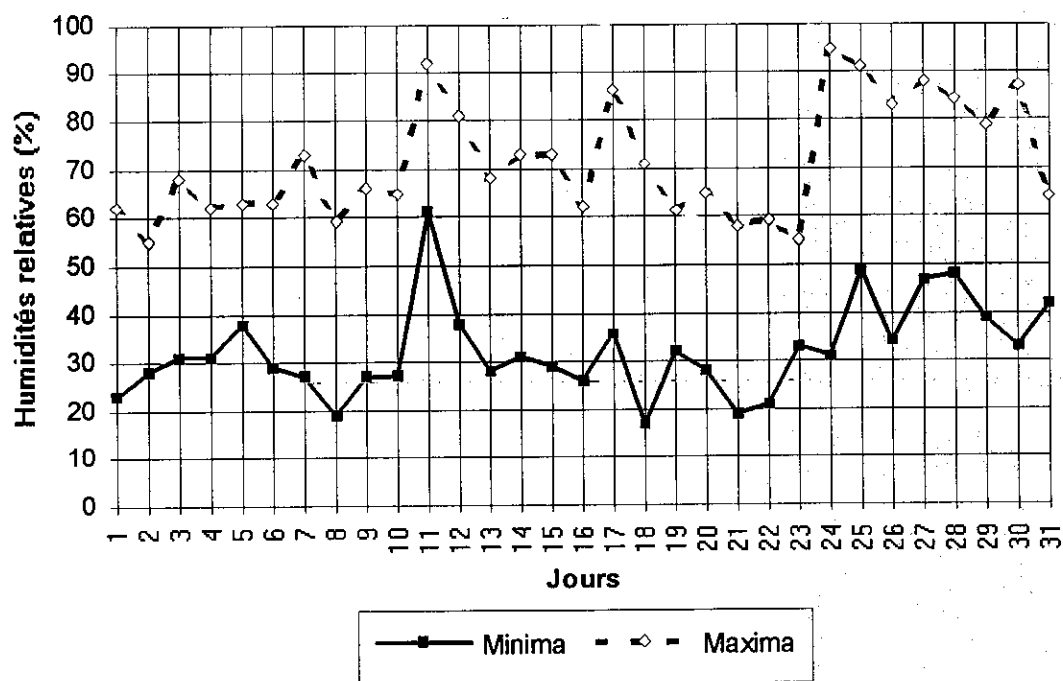
**Variation tri-horaire de la température sèche (Mai 1995)**



Variation journalière de l'humidité relative (Avril 1995)



Variation journalière de l'humidité relative (Mai 1995)



Des observations relatives à la circulation d'air dans le séchoir nous ont amené à émettre l'hypothèse d'une insuffisance de circulation d'air à l'intérieur du séchoir (cela aurait pour conséquence l'allongement de la première phase du séchage, donc difficulté d'évacuation de l'eau du produit et dans ces conditions le développement des moisissures est plus probables).

Ainsi nous sommes amenés à l'étude suivante :

## **II.5 ) LA MODIFICATION DES OUVERTURES DU SECHOIR ET LA CONCEPTION D'UNE CHEMINEE SOLAIRE.**

### **II.5.1 ) La modification des ouvertures du séchoir :**

Sur le séchoir témoin, les trois entrées d'air sur la coquille inférieure sont conçues comme des portions de couronnes dont chaque surface est donnée par la relation :

$$S = \frac{\alpha}{2} \times (R^2 - r^2)$$

où  $\alpha$  est l'arc AcB, égal à  $\frac{a}{R} = \frac{b}{r}$  avec a et b les longueurs des arcs AcB et CeD, respectivement égal à 44 cm et 29 cm. (cf Fig ci-après)

$R$  est le rayon extérieur = 38 cm.

$r$  est le rayon intérieur = 25 cm.

Soit chaque ouverture a une surface égale à :  $\frac{44}{38 \times 2} \times (38^2 - 25^2) = 474 \text{ cm}^2$

Dans la présente modification, nous prévoyons un agrandissement de chaque ouverture de  $\frac{44}{38 \times 2} \times (38^2 - 19^2) = 627 \text{ cm}^2$ , soit un agrandissement de 32%.

Pour les autres ouvertures, notamment les trois entrées d'air sur la virole et la sortie d'air sur la coquille supérieure, nous avons jugé qu'ils sont suffisamment larges pour jouer leur rôle. A cet effet, aucune modification n'a été apportée.

Les mesures ultérieures des paramètres tels que la température dans le séchoir, l'humidité relative à la sortie, la durée de séchage, nous permettront de vérifier si ces modifications favorisent la convection naturelle dans le séchoir.

Une comparaison sera faite entre le séchoir témoin et le nouveau de même dimension.

Notons que les modifications sur les ouvertures ont été faites de manière aléatoire en jouant sur le rayon intérieur (r), mais sans compromettre la rigidité du séchoir.

Si dans les séchoirs à convection forcée le débit d'air à l'entrée peut être facilement évalué; il n'en est pas de même pour les séchoirs à convection naturelle. En effet, cette circulation d'air est en partie liée à la météorologie du lieu.

### **II.5.2 ) La conception de la cheminée solaire :**

Sur le même séchoir témoin, nous avons constaté que la hauteur qui sépare l'entrée d'air de la sortie n'est pas suffisante pour créer un bon tirage d'air. Elle est moins d'un mètre.

Cependant nous prévoyons une cheminée solaire peinte en noir dont le rôle est d'accroître la circulation de l'air à cause de la colonne d'air chaud qu'elle produit (par rapport à l'air ambiant à l'extérieur de la cheminée).

Les caractéristiques de cette cheminée sont déterminées par la relation :

$H \geq 10 D$  où  $H$  est la hauteur de la cheminée.

$D$  est son diamètre = diamètre de l'orifice situé au centre de la coquille supérieure.

Nous avons  $D = 13,5$  cm et  $H \geq 1,35$  m , nous avons pris  $H = 1,35$  m.

Notons que ce dimensionnement a été fait selon la relation donnée dans la littérature (Dossier N°8: le point sur le séchage solaire des produits alimentaires).

Les essais ultérieurs nous permettront de vérifier si cette cheminée apporte un changement considérable.

## **CHAPITRE III. ETUDE EXPERIMENTALE.**

### **III.1.) PROTOCOLE EXPERIMENTAL.**

Ce protocole repose sur la détermination des paramètres physiques au cours du séchage.

#### **III.1.1.) Les séchoirs expérimentaux :**

Les séchoirs expérimentaux sont au nombre de deux :

- le séchoir témoin (décrit en II.1);
- Et le nouveau séchoir.

Ces deux séchoirs ont les mêmes dimensions, mais la seule différence est que, lors des essais, le nouveau séchoir se présentera sous deux formes :

\* Le nouveau avec les ouvertures plus larges que le séchoir témoin.  
On le dénomme nouveau séchoir N°1.

\* Le nouveau avec les nouvelles ouvertures et la cheminée.  
On le dénomme nouveau séchoir N°2.

#### **III.1.2.) Méthodologie du travail :**

##### **III.1.2.1.) Matériels.**

Nous disposons des matériels suivants:

- deux séchoirs type coquillage;
- La centrale de mesures SAM 60A - SN 5510 ( à l'E.I.E.R).
- un hygromètre;
- des thermocouples;
- un solarimètre;
- une balance de sensibilité 0,1gramme;
- trois récipients d'eau;
- un couteau (inoxydable);
- le poudre de métabisulfite de sodium;
- le produit expérimental (la tomate).

##### **III.1.2.2 ) Paramètres à mesurer.**

Pour les différents essais ( à vide et en charge), nous avons procédé par de relevés des paramètres physiques suivants :

- Températures en différents points du séchoir :
  - . coquille supérieure;
  - . coquille inférieure;
  - . intérieur du séchoir.
- Températures de l'air à l'entrée et à la sortie;
- Ensoleillement;
- Variations de la teneur en eau et de poids du produit au cours du séchage.

Pour les essais en charge, nous avons jugé nécessaire de déterminer la teneur en eau initiale de la tomate ainsi que le pourcentage de matière sèche qu'elle contient.

### III.1.2.6.) Détermination de la teneur en eau initiale et du pourcentage de matière sèche de la tomate .

#### a ) Appareillage :

- deux creusets de 100 ml - étuve réglable à 105°C
- dessiccateur contenant du gel de silice - balance analytique 10<sup>-2</sup> g.

#### b ) Mode opératoire :

- Nous avons placé les deux creusets à l'étuve à 105°C pendant 2 heures. Après étuvage, ils sont placés au dessiccateur pendant 30 minutes.
- Une fois qu'ils sont refroidis, on les pèse et on note leurs masses, soient  $M_0$  et  $M'_0$ .
- Nous avons ensuite remplis les creusets avec des échantillons de la tomate qu'on pèse et qu'on note leurs masses, soient  $M_1$  et  $M'_1$ .
- Après on passe à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.
- Après étuvage, on les refroidit au dessiccateur pendant 30 minutes. On les pèse et on note leurs masses, soient  $M_2$  et  $M'_2$ .

#### c ) Calculs et résultats:

$$MS(\%) = 100 \times \frac{(M_2 - M_0)}{(M_1 - M_0)} \quad MS'(\%) = 100 \times \frac{(M'_2 - M'_0)}{(M'_1 - M'_0)}$$

$$W(\%) = 100 - MS(\%) \quad W'(\%) = 100 - MS'(\%)$$

MS, MS' = matières sèches.

W, W' = teneurs en eau.

$M_0, M'_0$  = masses des creusets à vide (g).

$M_1, M'_1$  = masses des creusets et des prises d'essai (g).

$M_2, M'_2$  = masses des creusets et des matières sèches (g).

Les valeurs obtenues lors de l'essai sont les suivantes :

-  $M_0 = 81,64$  g     $M_1 = 186,47$  g     $M_2 = 86,36$  g.

-  $M'_0 = 94,73$  g     $M'_1 = 179,55$  g     $M'_2 = 99,40$  g.

$$\text{On a donc : } MS = \frac{(86,36 - 81,64)}{(186,47 - 81,64)} = 4,5\% \quad W = 100 - 4,5 = 95,5\%$$

$$MS' = \frac{(99,40 - 94,73)}{(179,55 - 94,73)} = 5,5\% \quad W' = 100 - 5,5 = 94,5\%$$

En faisant la moyenne des teneurs en eau, on obtient la teneur en eau initiale de la

$$\text{tomate : } Wi = \frac{(W + W')}{2} = \frac{(95,5 + 94,5)}{2} = 95\% \quad \mathbf{Wi = 95\% \text{ (en base humide)}}$$

On en déduit que la matière sèche représente **5%** de la masse totale.

### **III.2.) ESSAI A VIDE.**

Cet essai nous permet d'apprécier le comportement thermique du séchoir témoin. Après qu'on ait installé les thermocouples en plusieurs endroits du séchoir; sur la centrale de mesures, nous avons programmé les voies, la mise à l'échelle du solarimètre, la minuterie (Min 1), le mode de fonctionnement des voies, l'horloge des heures, minutes et secondes (Horloge 1) et l'horloge des jours, mois et années (Horloge 2).

Après la programmation, la scrutation du groupe des voies se fait en appuyant sur le bouton "cycle".

Les mesures des humidités relatives et vitesses du vent n'ont pas pu être effectuées par manque d'anémomètres et par cause des fausses valeurs qu'affichent notre hygromètre.

Les résultats de mesures sont présentés dans le tableau ci-joint pour la journée du 04 Mai 1996, ainsi que sur le graphes suivants:

- Variations de températures à l'intérieur du séchoir.
- Ecart entre différentes températures.

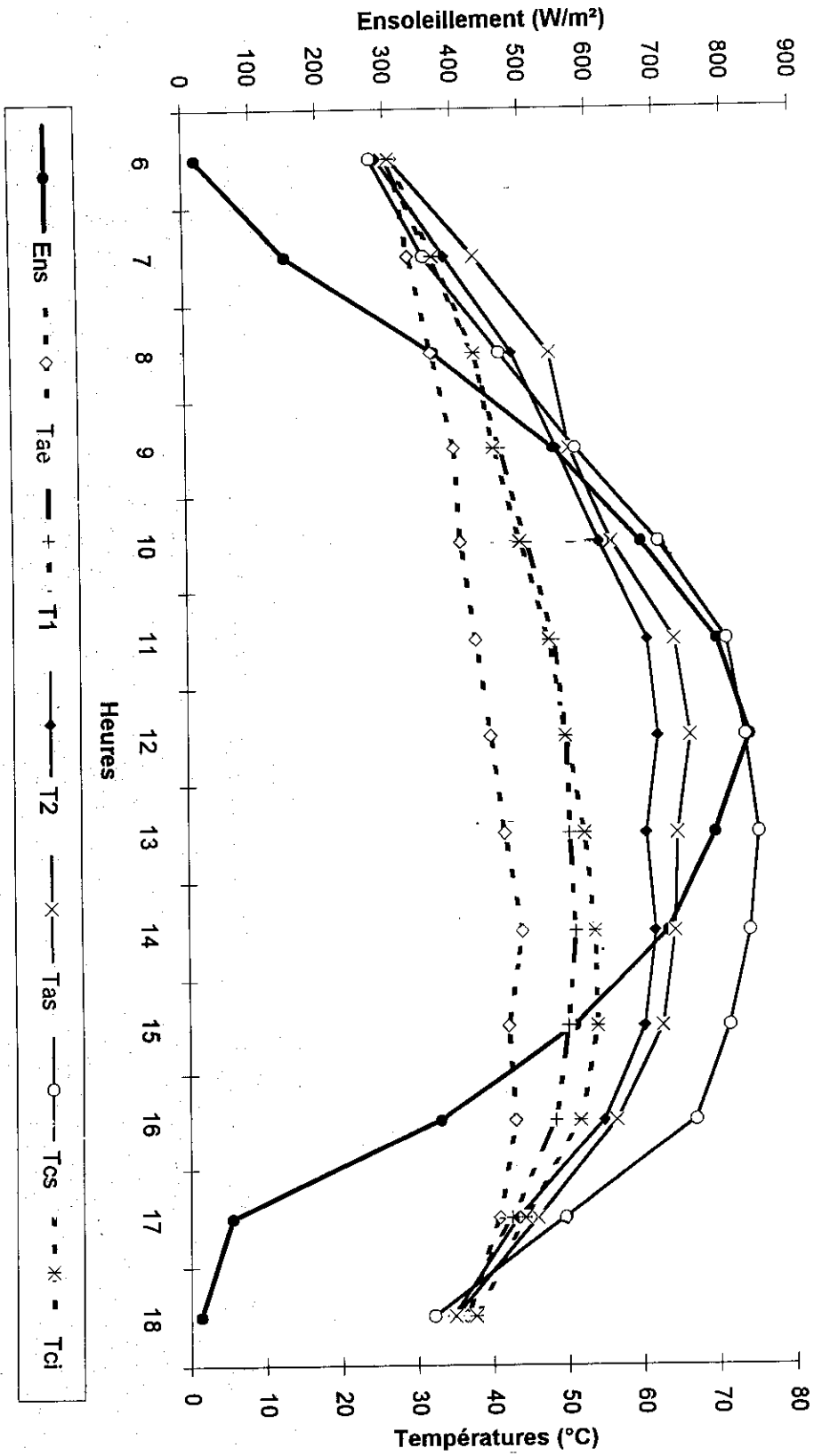
## MESURES DU 04 MAI 1996

| Temps (h) | Ens (W/m²) | T.ae (°C) | T1 (°C) | T2 (°C) | T.as (°C) | T.cs (°C) | T.ci (°C) | T1 - T.ae | T2 - T.ae | T.as - T.ae | T.cs - T.ae | T.ci - T.ae | Observations   |
|-----------|------------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| 6         | 19         | 27,6      | 26,6    | 25,6    | 27,3      | 24,7      | 27,3      | -1        | -2        | -0,3        | -2,9        | -0,3        | Présence ombre |
| 7         | 150        | 29,6      | 32,4    | 34,4    | 38,3      | 31,6      | 32,9      | 2,8       | 4,8       | 8,7         | 2           | 3,3         |                |
| 8         | 368        | 32,5      | 38      | 43,1    | 48,1      | 41,5      | 38,2      | 5,5       | 10,6      | 15,6        | 9           | 5,7         |                |
| 9         | 545        | 35,4      | 41,4    | 48,9    | 50,6      | 51,4      | 40,6      | 6         | 13,5      | 15,2        | 16          | 5,2         |                |
| 10        | 674        | 36,1      | 44,8    | 54,4    | 56,1      | 62,2      | 44        | 8,7       | 18,3      | 20          | 26,1        | 7,9         |                |
| 11        | 786        | 38,1      | 48,4    | 60,7    | 64,3      | 71,1      | 47,7      | 10,3      | 22,6      | 26,2        | 33          | 9,6         |                |
| 12        | 834        | 40        | 50      | 62,1    | 66,3      | 73,5      | 49,9      | 10        | 22,1      | 26,3        | 33,5        | 9,9         |                |
| 13        | 782        | 41,7      | 50,3    | 60,5    | 64,6      | 75,2      | 52,3      | 8,6       | 18,8      | 22,9        | 33,5        | 10,6        |                |
| 14        | 712        | 44        | 51,1    | 61,6    | 64,2      | 74        | 53,6      | 7,1       | 17,6      | 20,2        | 30          | 9,6         |                |
| 15        | 572        | 42,1      | 50      | 60,1    | 62,5      | 71,3      | 53,9      | 7,9       | 18        | 20,4        | 29,2        | 11,8        |                |
| 16        | 372        | 43        | 48,3    | 54,7    | 56,4      | 66,8      | 51,6      | 5,3       | 11,7      | 13,4        | 23,8        | 8,6         |                |
| 17        | 62         | 40,8      | 42,5    | 43,3    | 45,9      | 49,5      | 44,2      | 1,7       | 2,5       | 5,1         | 8,7         | 3,4         | Présence ombre |
| 18        | 15         | 36,4      | 35,1    | 34,6    | 34,9      | 32,1      | 37,6      | -1,3      | -1,8      | -1,5        | -4,3        | 1,2         | Présence ombre |

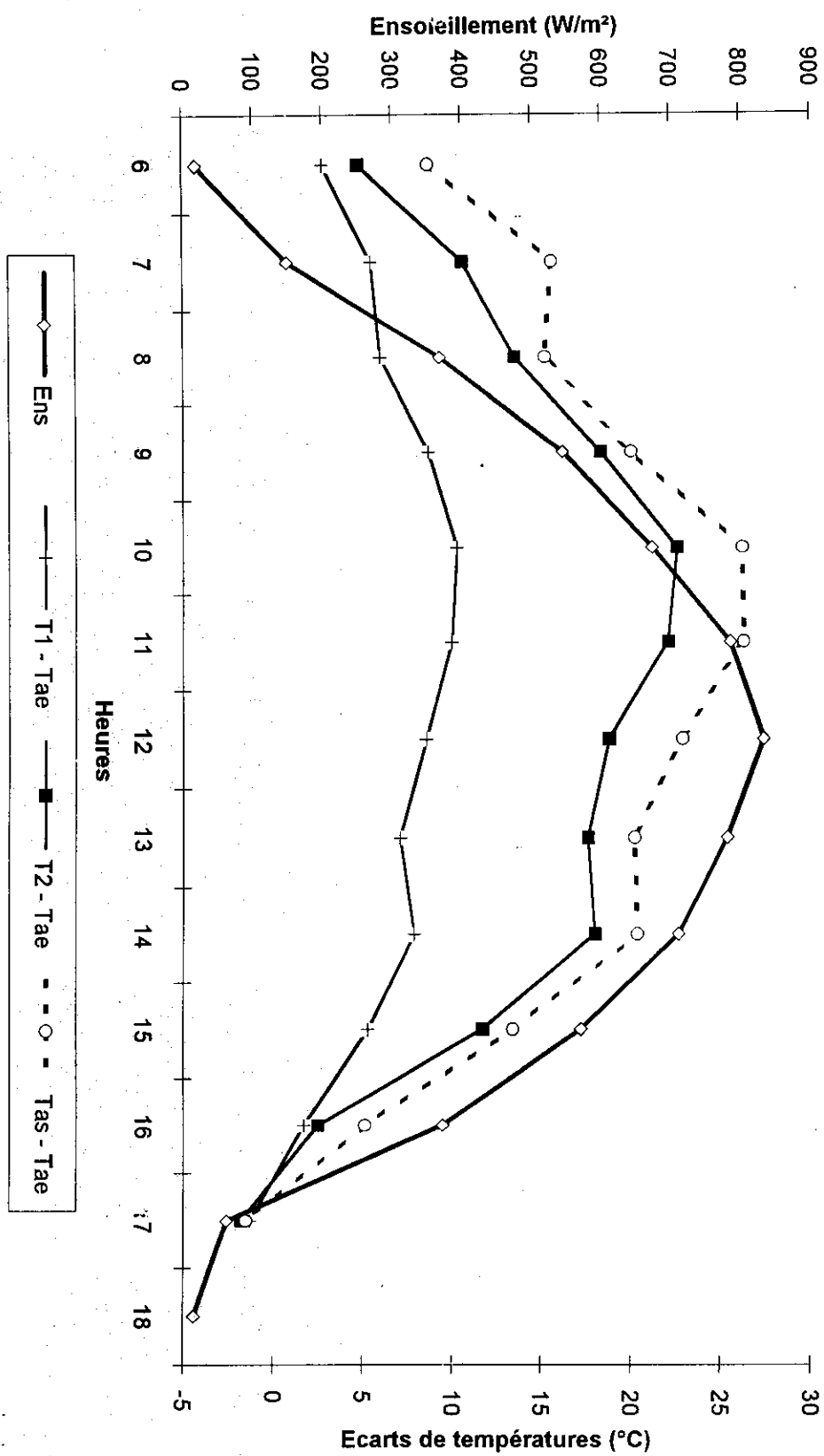
**LEGENDE DU TABLEAU :**

- $E_{ns}$  ( $W/m^2$ ) : ensoleillement ou flux solaire.
- $T_{ae}$  ( $^{\circ}C$ ) : température de l'air à l'entrée du séchoir.
- $T_1$  ( $^{\circ}C$ ) : température de l'air en dessous de la claie principale inférieure.
- $T_2$  ( $^{\circ}C$ ) : température de l'air au dessus de la claie principale supérieure.
- $T_{as}$  ( $^{\circ}C$ ) : température de l'air à la sortie du séchoir.
- $T_{cs}$  ( $^{\circ}C$ ) : température tôle coquille supérieure.
- $T_{ci}$  ( $^{\circ}C$ ) : température tôle coquille inférieure.

Variation de températures à l'intérieur du séchoir témoin à vide



# Ecart par rapport à T<sub>ae</sub>



### **III.2.1 ).Interprétation des résultats.**

Les variations de températures à l'intérieur du séchoir constituent l'essentiel de notre préoccupation.

Au cours de la journée, l'air se réchauffe à l'intérieur du séchoir. L'écart de température de l'air qui entre et l'air au niveau des claies principales ( inf et sup) varie respectivement de  $-1^{\circ}\text{C}$  à  $10,3^{\circ}\text{C}$  avec une moyenne de  $5,5^{\circ}\text{C}$  et de  $-2^{\circ}\text{C}$  à  $26,6^{\circ}\text{C}$  avec une moyenne de  $12^{\circ}\text{C}$ .

Cependant la différence de température de l'air à l'entrée et l'air à la sortie du séchoir varie de  $-0,3^{\circ}\text{C}$  et  $26,3^{\circ}\text{C}$  avec une moyenne de  $14,8^{\circ}\text{C}$ .

Ces valeurs ont été obtenues pour un flux solaire variant entre  $15\text{ W/m}^2$  et  $834\text{ W/m}^2$  et ceci entre 6 heures et 18 heures.

On constate donc que le gain en température est plus élevé au niveau de la claie supérieure ( $12^{\circ}\text{C}$ ) qu'au niveau de la claie inférieure ( $5,5^{\circ}\text{C}$ ).

Par ailleurs on remarque aussi que la température interne devient plus faible que la température ambiante externe en l'absence des rayonnements solaires.

Nous soulignons au passage que nos mesures de températures comportent des incertitudes. En effet ces mesures sont perturbées par l'effet du rayonnement des parois du séchoir sur les thermocouples.

### **III.3.) ESSAIS EN CHARGE.**

Ces essais nous permettent de mieux comprendre le fonctionnement thermique des séchoirs d'une part et d'autre part de bien cerner le problème qu'est celui de l'apparition des moisissures sur les produits à sécher.

#### **III.3.1 ) Choix du produit.**

Pour ces expériences, nous avons choisi la tomate comme produit expérimental à cause de sa teneur en eau élevée, de sa disponibilité sur le marché local à coût abordable et de sa durée de séchage assez faible (2 à 3 jours maximum).

C'est un produit qui est très susceptible de présenter des moisissures au cours du séchage au cas où le séchoir ne serait pas performant.

#### **III.3.2.) Préparation du produit .**

Les tomates (mûres et fermes) sont triées, lavées, divisées en quatre parties pour permettre l'extraction des graines, et découpées en tranches de 7 à 10 mm d'épaisseur ou en deux morceaux pour les plus petites.

Après ces opérations on passe au blanchissement au métabisulfite de sodium.

#### **III.3.3.) Opération de blanchissement:**

Le métabisulfite de sodium est dissous dans l'eau tiède dans la proportion suivante: 3 grammes de métabisulfite pour 1 litre d'eau et pour 1 kilo de tomate.

Les tomates découpées sont trempées dans la solution préparée pendant 30 minutes. Elles sont ensuite essorées avant d'être placées dans le séchoir.

Pour mieux suivre la variation des poids du produit en cours de séchage, il est nécessaire de peser les claies.

#### **III.3.4.) Pesées des claies.**

Les claies numérotées sont pesées avant et après l'étalage du produit; ce qui permet de déterminer la masse réelle du produit chargée:

$$M_{P1} = M_1 - M_{CV1}$$

$$M_{P2} = M_2 - M_{CV2}$$

avec  $M_{P1}, M_{P2}$  = masses réelles du produit chargé (g).

$M_1, M_2$  = masses des claies vides et du produit (g).

$M_{CV1}, M_{CV2}$  = masses des claies vides (g).

Les masses des claies vides pour les deux séchoirs sont les suivantes:

- Pour le séchoir témoin, on a :

$$M_{CV1} = 1949 \text{ g (claire bleue)}$$

$$M_{CV2} = 1957 \text{ g (claire verte)}$$

- Pour le nouveau séchoir, on a:

$$M_{CV1} = 2570 \text{ g (claire bleue)}$$

$$M_{CV2} = 2580 \text{ g (claire bleue-verte)}$$

Aussitôt après le chargement, on commence le séchage et à chaque 2 ou 3 heures de temps, on pèse les claies de manière suivre la variation de la teneur en eau et la perte de poids du produit.

### **III.3.5 ) Déroulement du séchage:**

En début de séchage, le chapeau sur le couvercle est mis en position ouverte pour faciliter la circulation d'air. Vers la fin du séchage (en générale au milieu de la 2<sup>ème</sup> journée), on le ferme afin de ralentir la circulation d'air et augmenter la température interne du séchoir. Ainsi le produit sèche plus vite et devient plus sec.

A la tombée de la nuit, pour éviter la condensation nocturne plus ou moins importante, on ouvre le couvercle et on sort la première claie en la posant sur le bord de la virole. De cette façon, le séchage continue grâce à la circulation nocturne de l'air.

### **III.3.6 ) Premier essai en charge:**

Pour cet essai, nous avons utilisé le séchoir témoin (le séchoir à optimiser).

A ce niveau, nous avons étalé au total 7466 grammes de tomates, réparties sur les deux claies principales de la manière suivante:

- la claie supérieure prend 3785 grammes; cette masse est notée M1,
- la claie inférieure prend 3681 grammes; cette masse est notée M2.

Nous avons commencé l'essai à 10 heure pour la simple raison que la préparation des produits et le blanchissement ont démarré un peu tard ( à 7 h 00) et ont duré presque trois heures de temps.

Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau ci-joint pour la journée du 09 au 11 Mai 1996, ainsi que sur les graphes suivants:

- Variations de températures,
- Ecart entre différentes températures,
- Perte de poids de la tomate au cours du séchage,
- Variations de la teneur en eau.

## RELEVÉ DE MESURES DU 09 AU 11 MAI 1996

| Temps (h) | Ens (W/m²) | Tae (°C) | T1 (°C) | T2 (°C) | Tas (°C) | Tcs (°C) | Tcl (°C) | T1 - Tae | T2 - Tae | Tas - Tae | M1 (g) | M2 (g) | W1 (%) | W2 (%) | Observations      |
|-----------|------------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| 10        | 642        | 37       | 31,3    | 36,6    | 51,7     | 56,7     | 39,2     | -5,7     | -0,4     | 14,7      | 3785   | 3681   | 95     | 95     |                   |
| 11        | 743        | 37,7     | 35,9    | 41,4    | 54,1     | 63,6     | 41,2     | -1,8     | 3,7      | 16,4      |        |        |        |        |                   |
| 12        | 803        | 38,4     | 37,9    | 43,9    | 54,4     | 69,7     | 43,3     | -0,5     | 5,5      | 16        | 3278   | 3264   | 94,227 | 94,361 |                   |
| 13        | 754        | 41,4     | 38      | 44,7    | 57,7     | 68,2     | 44,5     | -3,4     | 3,3      | 16,3      |        |        |        |        |                   |
| 14        | 629        | 42,1     | 39,4    | 45,2    | 57,5     | 66,9     | 46,4     | -2,7     | 3,1      | 15,4      | 2756   | 2854   | 93,133 | 93,551 |                   |
| 15        | 518        | 41,5     | 37,9    | 43,3    | 52,5     | 61,8     | 45,6     | -3,6     | 1,8      | 11        |        |        |        |        |                   |
| 16        | 268        | 40,3     | 36,8    | 40,9    | 47,9     | 53,1     | 43,6     | -3,5     | 0,6      | 7,6       | 2361   | 2561   | 91,984 | 92,813 |                   |
| 17        | 102        | 38,8     | 34,8    | 37,2    | 41,2     | 43       | 39,4     | -4       | -1,6     | 2,4       |        |        |        |        |                   |
| 18        | 10         | 36,3     | 32,1    | 31,6    | 33       | 32,6     | 35,2     | -4,2     | -4,7     | -3,3      | 2160   | 2361   | 91,238 | 92,205 |                   |
| 30        | 15         | 26,3     | 24,7    | 24,7    | 24,8     | 24,9     | 26,1     | -1,6     | -1,6     | -1,5      | 952    | 1192   | 80,121 | 84,56  | Moississures      |
| 31        | 82         | 27,8     | 26,6    | 28,1    | 29,3     | 29,5     | 28,5     | -1,2     | 0,3      | 1,5       |        |        |        |        |                   |
| 32        | 149        | 30,2     | 29,2    | 30,7    | 32,4     | 33,7     | 30,8     | -1       | 0,5      | 2,2       | 896    | 1119   | 78,878 | 83,552 | Ciel très nuageux |
| 33        | 287        | 31,8     | 32,3    | 35,7    | 40,1     | 42,1     | 34,5     | 0,5      | 3,9      | 8,3       |        |        |        |        |                   |
| 34        | 640        | 34,1     | 36,5    | 42,1    | 47,5     | 54,3     | 38,7     | 2,4      | 8        | 13,4      | 781    | 875    | 75,768 | 78,966 |                   |
| 35        | 763        | 34,9     | 37,6    | 42,7    | 45,1     | 57,3     | 39,4     | 2,7      | 7,8      | 10,2      |        |        |        |        |                   |
| 36        | 835        | 36,3     | 38,9    | 45      | 57,7     | 60,5     | 40,5     | 2,6      | 8,7      | 21,4      | 606    | 672    | 68,771 | 72,612 |                   |
| 37        | 463        | 33,5     | 36,8    | 41,2    | 47,2     | 48,9     | 38,3     | 3,3      | 7,7      | 13,7      |        |        |        |        |                   |
| 38        | 312        | 32,1     | 34,6    | 37,3    | 41,8     | 43,4     | 36,2     | 2,5      | 5,2      | 9,7       | 481    | 510    | 60,655 | 63,912 |                   |
| 39        | 314        | 33,1     | 36,8    | 40,4    | 43,5     | 48,1     | 38,2     | 3,7      | 7,3      | 10,4      |        |        |        |        |                   |
| 40        | 141        | 33       | 34      | 35,4    | 37,7     | 38,1     | 35,3     | 1        | 2,4      | 4,7       | 422    | 436    | 55,154 | 57,787 |                   |
| 41        | 83         | 32,5     | 32,6    | 33,2    | 34,1     | 35,2     | 34       | 0,1      | 0,7      | 1,6       |        |        |        |        |                   |
| 42        | 16         | 31,8     | 30,4    | 29,5    | 29,9     | 29,2     | 31,8     | -1,4     | -2,3     | -1,9      | 385    | 384    | 50,844 | 52,07  |                   |
| 54        | 18         | 26,8     | 26,3    | 25,9    | 26       | 25,3     | 26,9     | -0,5     | -0,9     | -0,8      | 299    | 310    | 36,706 | 40,629 | Ciel peu nuageux  |
| 55        | 128        | 27,6     | 27,9    | 28,5    | 29,5     | 28,8     | 29,2     | 0,3      | 0,9      | 1,9       |        |        |        |        |                   |
| 56        | 340        | 29,9     | 32,9    | 35,3    | 36,8     | 36,2     | 33,1     | 3        | 5,4      | 6,9       | 273    | 275    | 30,678 | 33,073 |                   |
| 57        | 577        | 31,6     | 38,9    | 44,1    | 50,1     | 49,2     | 37,7     | 7,3      | 12,5     | 18,5      |        |        |        |        |                   |
| 58        | 870        | 34,4     | 40,2    | 45,7    | 51,2     | 51,6     | 39,5     | 5,8      | 11,3     | 16,8      | 235    | 235    | 19,468 | 21,681 |                   |
| 59        | 772        | 35,6     | 44      | 49,8    | 56,1     | 60,4     | 42,5     | 8,4      | 14,2     | 20,5      |        |        |        |        |                   |
| 60        | 629        | 36,4     | 48,2    | 55,5    | 63,4     | 64,4     | 45,8     | 11,8     | 19,1     | 27        | 215    | 215    | 11,977 | 14,395 |                   |
| 62        | 415        | 35,5     | 45,6    | 50,3    | 58       | 62,1     | 43,8     | 10,1     | 14,8     | 22,5      | 204    | 208    | 7,2304 | 11,514 |                   |

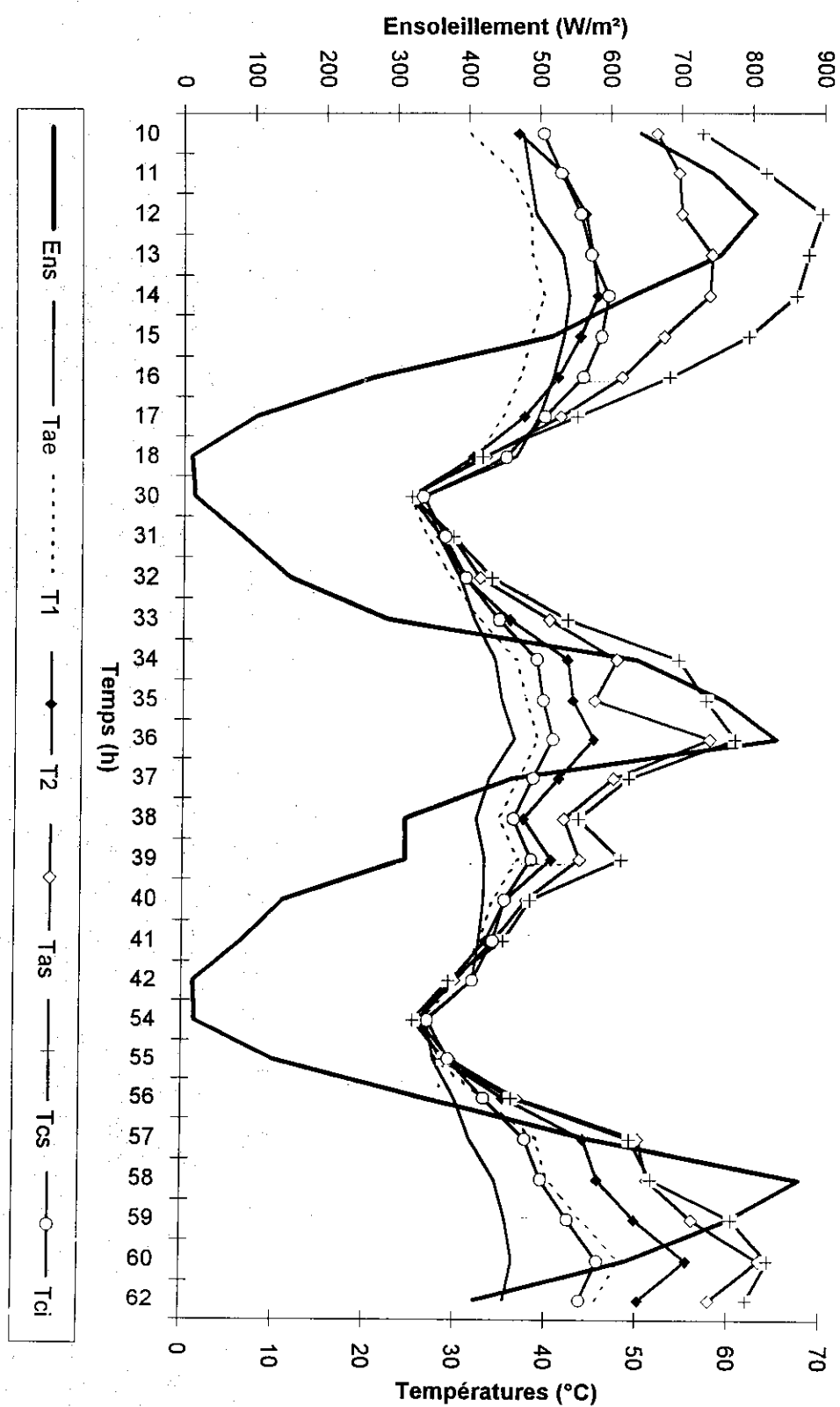
### LEGENDE DU TABLEAU :

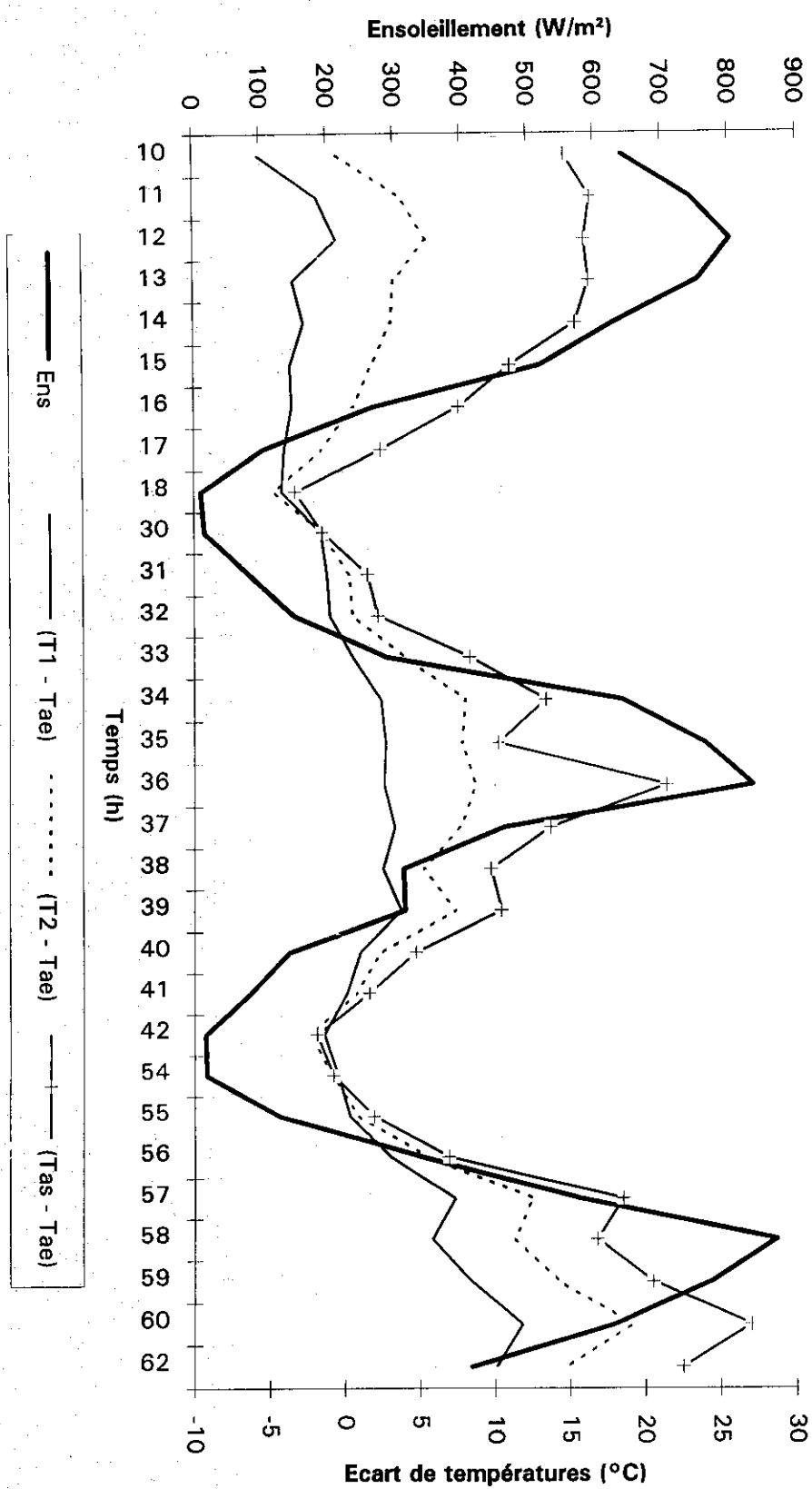
- Ens (W/m<sup>2</sup>) : ensoleillement ou flux solaire.
- Tae (°C) : température de l'air à l'entrée du séchoir.
- T<sub>1</sub>(°C) : température de l'air en dessous de la claie principale inférieure.
- T<sub>2</sub> (°C) : température de l'air au dessus de la claie principale supérieure.
- Tas (°C) : température de l'air à la sortie du séchoir.
- Tcs (°C) : température tôle coquille supérieure.
- Tci (°C) : température tôle coquille inférieure.
- M1 (g) : masse réelle de produit chargée sur la claie supérieure.
- M2 (g) : masse réelle de produit chargée sur la claie inférieure.
- W1 (%) : teneur en eau du produit sur la claie supérieure.
- W2 (%) : teneur en eau du produit sur la claie inférieure.
- t : temps.

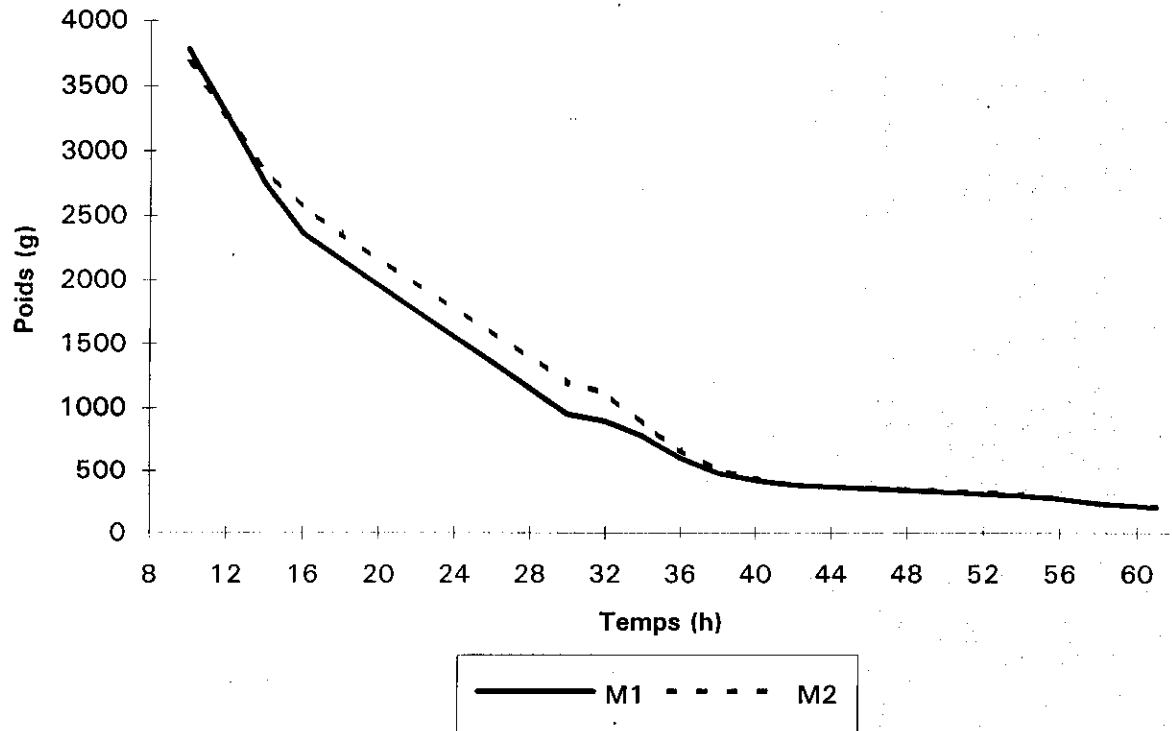
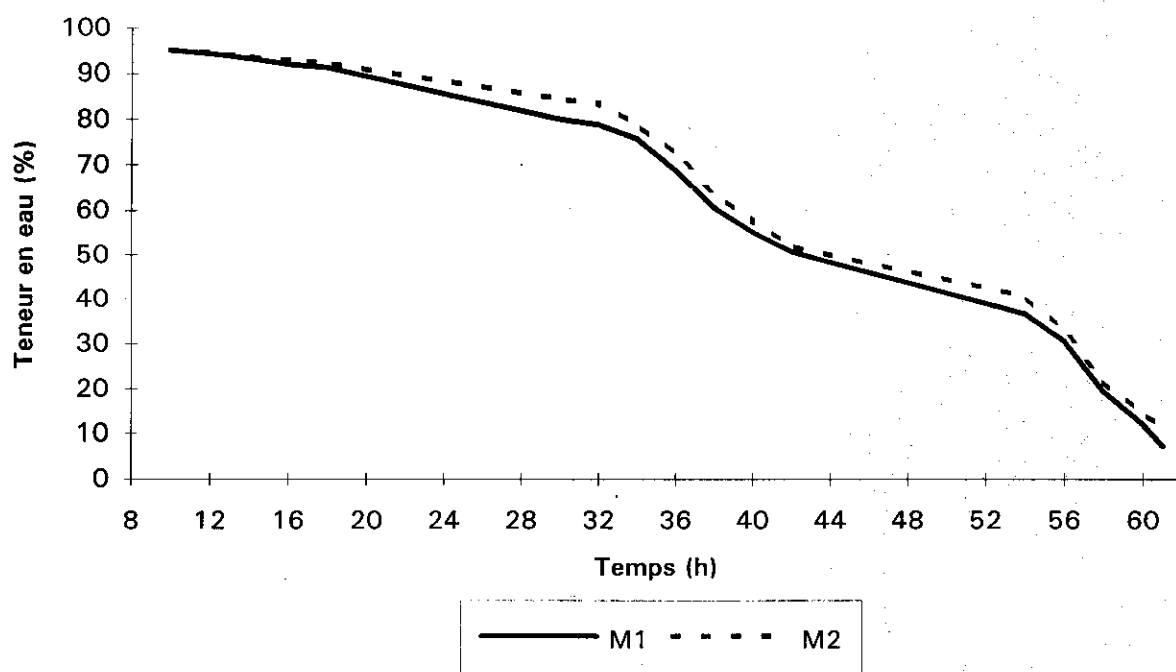
$$W_1(t) = \frac{M_1(t) - MS_1}{M_1(t)} \times 100 \quad \text{avec } MS_1 = 0,05 \times 3785 = 189,25 \text{ g.}$$

$$W_2(t) = \frac{M_2(t) - MS_2}{M_2(t)} \times 100 \quad \text{avec } MS_2 = 0,05 \times 3681 = 184,05 \text{ g}$$

## Variations de températures



Ecart par rapport à  $T_{ae}$ 

**Perte de poids de la tomate****Variations de la teneur en eau**

### **III.3.6.1 ) Interprétation des résultats:**

Durant la première journée, on a constaté que la température au niveau des produits situés sur la claie inférieure diminue , puis augmente à la sortie de la claie supérieure.

Cela est dû au fait que l'air ambiant extérieur, une fois en contact avec les produits humides se charge de leur eau et leur cède de sa chaleur.

Au niveau des produits situés sur la claie supérieure, on constate que le gain en température par rapport à l'extérieur est de l'ordre de 0,6°C à 5,5°C de 11 heure à 16 heure pour un ensoleillement variant entre 268 W/m<sup>2</sup> et 803 W/m<sup>2</sup>.

On peut donc considérer comme très faible cet apport par rayonnement de la coquille supérieure.

Ce phénomène étant très long, on a donc constaté que l'évacuation de l'eau du produit est difficile et que jusqu'en fin de la journée, le produit contient encore plus de 90% d'eau. Ceci s'explique par le fait que le débit d'air entrant dans le séchoir est insuffisant pour évacuer une grande quantité d'eau.

Pendant la nuit, lorsqu'on a exposé les claies à l'air libre; on a remarqué le lendemain matin que la teneur en eau a diminué de 10% pour la claie supérieure et 8% pour la claie inférieure.

Par ailleurs on a également constaté la présence des moisissures sur produits.

L'explication à ce phénomène est que l'activité de l'eau dans les produits n'a pas été abaissée en dessous d'un certain seuil pendant la journée; seuil en deçà duquel ils peuvent être à l'abri des moisissures.

Pendant la deuxième journée, nous avons poursuivi le séchage; le gain en température au niveau des produits par rapport à l'extérieur a augmenté; il est de l'ordre de 0,7°C à 8°C de 6 heure à 18 heure avec un maximum d'ensoleillement de 835 W/m<sup>2</sup>.

A la fin de cette journée, les produits contiennent encore plus de 50% d'eau.

Le séchage continue pendant la deuxième nuit et on a constaté le lendemain matin que les produits placés sur la première claie contiennent 36,7% d'eau et 40,6% pour la deuxième.

Pendant la troisième journée, on a constaté une hausse des températures internes entraînant un gain en températures allant jusqu'à 19°C.

Nous avons arrêté le séchage lorsqu'on a remarqué que les produits sont secs.

Nous avons obtenu en fin de séchage une teneur en eau finale de 7% pour les produits situés sur la claie supérieure et 11,5% pour ceux placés sur la claie inférieure.

Ces valeurs peuvent être acceptables puisqu'on est proche de la valeur recommandée (7%) pour la tomate, donnée par "la fiche produit".

La durée moyenne du séchage est de 2 jours et 4 heures.

### **III.3.7 ) Deuxième essai en charge:**

Pour cet essai, nous avons utilisé un séchoir qui a des ouvertures d'entrée de l'air plus larges que celles du séchoir témoin.

Nous avons chargé ce séchoir avec une quantité de 6089 grammes de tomates dont 3230 grammes sont étalés sur la claie supérieure et 2859 grammes sur la claie inférieure.

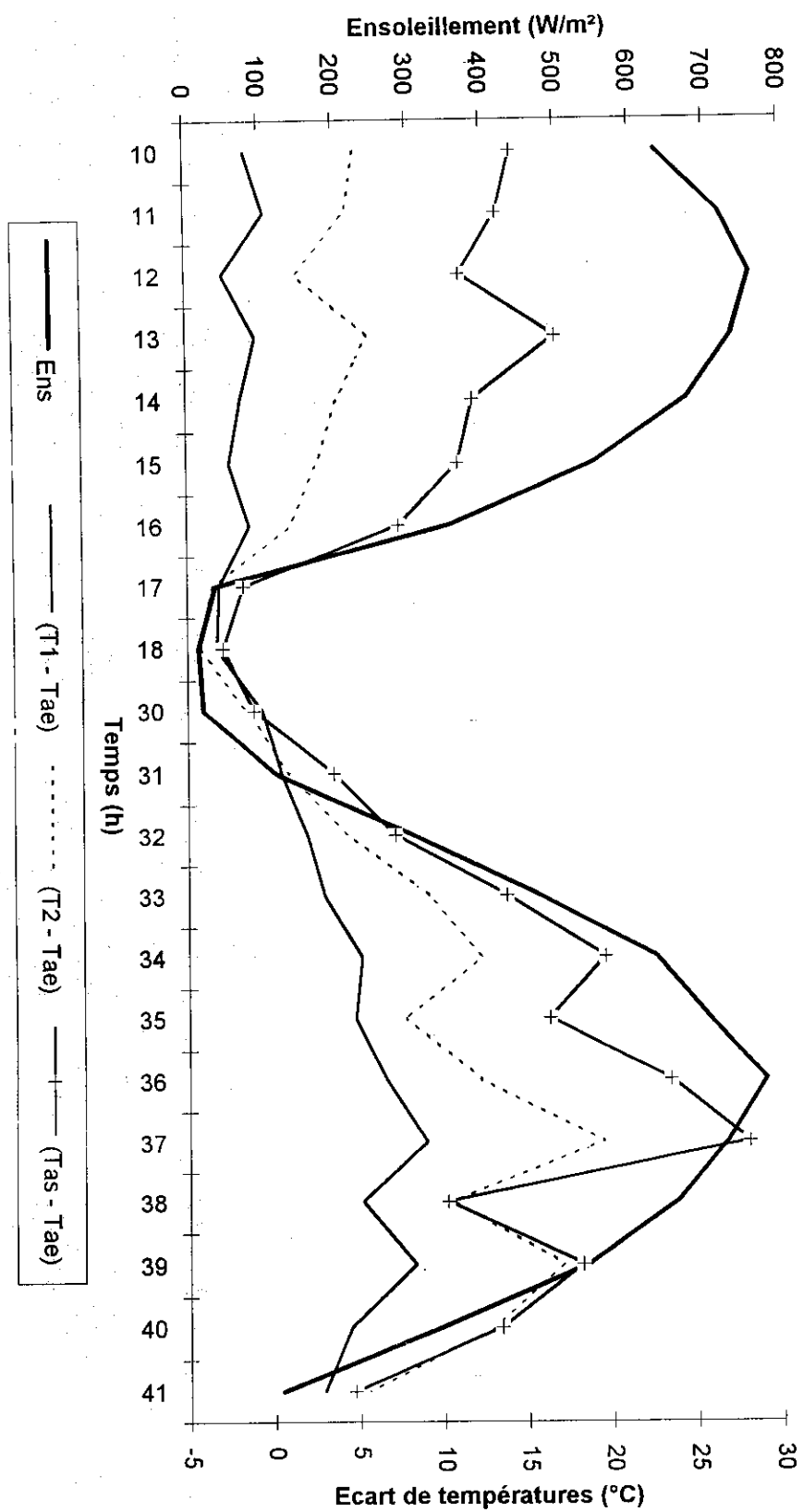
Après la préparation des produits et le traitement au métabisulfite, nous avons démarré le séchage à 10 h 00.

Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau ci-joint pour la période du 12 au 13 Mai 1996, ainsi que sur les graphes suivants:

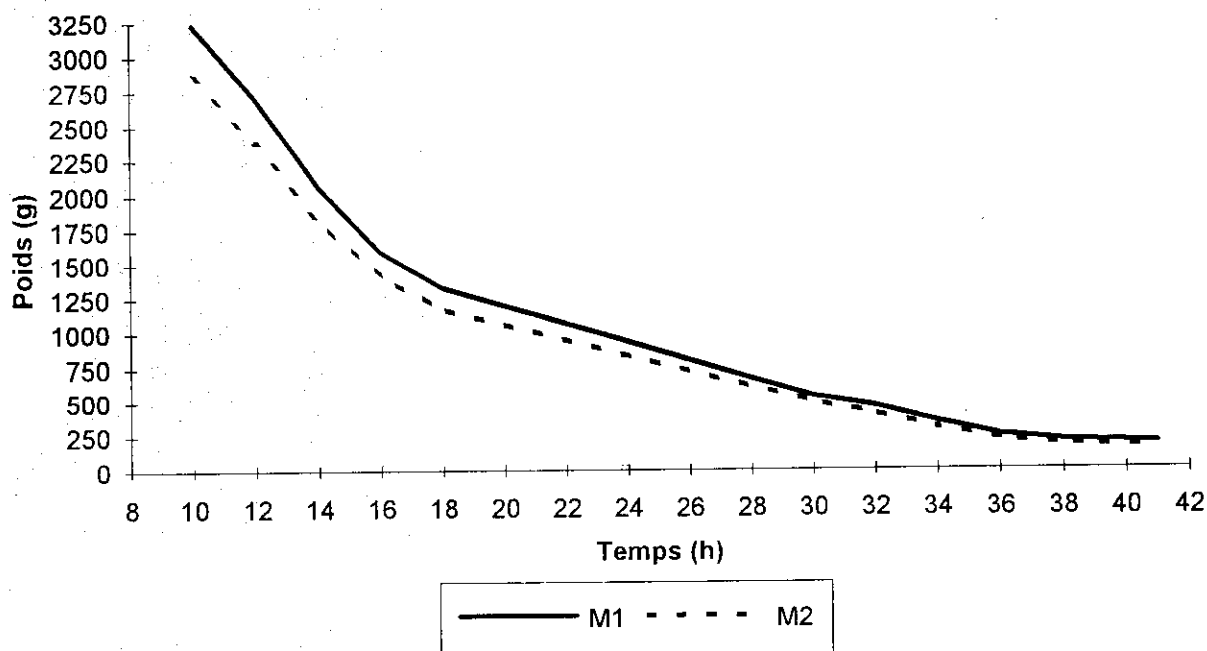
- Variations de températures,
- Ecart entre différentes températures,
- Perte de poids de la tomate au cours du séchage,
- Variations de la teneur en eau.

## RELEVÉ DE MESURES DU 12 AU 13 MAI 1996

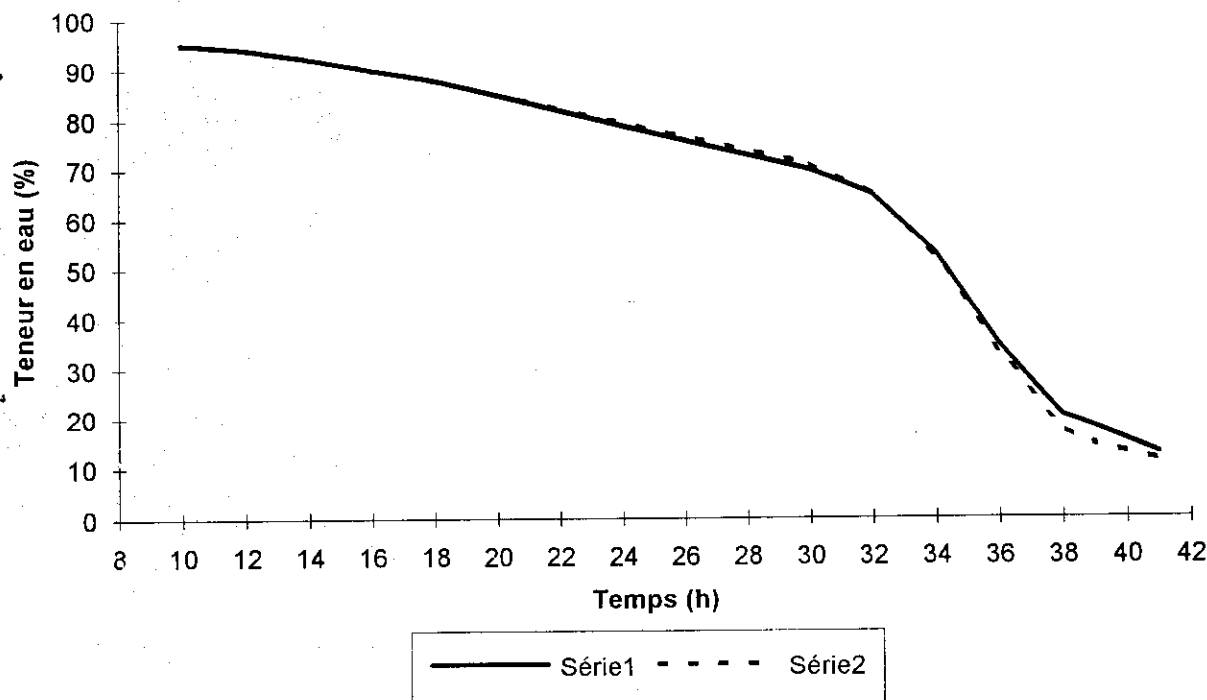
| Temps (h) | Ens (W/m²) | Tae (°C) | T1 (°C) | T2 (°C) | Tas (°C) | Tcs (°C) | Tci (°C) | T1 - Tae | T2 - Tae | Tas - Tae | M1 (g) | M2 (g) | W1 (%) | W2 (%) | Observations |
|-----------|------------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| 10        | 636        | 37,1     | 35,7    | 42,2    | 51,4     | 57,7     | 41,2     | -1,4     | 5,1      | 14,3      | 3230   | 2859   | 95     | 95     |              |
| 11        | 720        | 38,1     | 37,8    | 42,6    | 51,5     | 63,1     | 41,7     | -0,3     | 4,5      | 13,4      |        |        |        |        |              |
| 12        | 760        | 41,8     | 39      | 43,3    | 53       | 68,9     | 43,3     | -2,8     | 1,5      | 11,2      | 2704   | 2383   | 94,027 | 94,001 |              |
| 13        | 735        | 41,2     | 40,3    | 46,9    | 58       | 74,1     | 46,9     | -0,9     | 5,7      | 16,8      |        |        |        |        |              |
| 14        | 675        | 43,1     | 41,3    | 47      | 55       | 73       | 47       | -1,8     | 3,9      | 11,9      | 2063   | 1832   | 92,172 | 92,197 |              |
| 15        | 550        | 42,1     | 39,6    | 44,8    | 53,1     | 67,5     | 47       | -2,5     | 2,7      | 11        |        |        |        |        |              |
| 16        | 355        | 41,9     | 40,6    | 43      | 49,4     | 56,7     | 44,4     | -1,3     | 1,1      | 7,5       | 1592   | 1420   | 89,856 | 89,933 |              |
| 17        | 38         | 39,1     | 36      | 35,6    | 37,4     | 37,7     | 38,3     | -3,1     | -3,5     | -1,7      |        |        |        |        |              |
| 18        | 15         | 36       | 32,7    | 31,7    | 33,1     | 32,7     | 34,4     | -3,3     | -4,3     | -2,9      | 1327   | 1170   | 87,83  | 87,782 | Ciel nuageux |
| 30        | 21         | 30,2     | 29,6    | 28,7    | 29,1     | 28,3     | 29,7     | -0,6     | -1,5     | -1,1      | 534    | 491    | 69,757 | 70,886 |              |
| 31        | 118        | 31,4     | 31,9    | 32,3    | 35       | 33       | 33,1     | 0,5      | 0,9      | 3,6       |        |        |        |        |              |
| 32        | 302        | 33,5     | 35,5    | 37,9    | 40,7     | 37,8     | 37,2     | 2        | 4,4      | 7,2       | 459    | 407    | 64,815 | 64,877 |              |
| 33        | 473        | 36,8     | 39,8    | 45,9    | 50,6     | 53,1     | 41,4     | 3        | 9,1      | 13,8      |        |        |        |        |              |
| 34        | 630        | 36,9     | 42,1    | 49,2    | 56,5     | 62,3     | 44,2     | 5,2      | 12,3     | 19,6      | 344    | 300    | 53,052 | 52,35  |              |
| 35        | 701        | 40,5     | 45,3    | 48,3    | 56,8     | 68,6     | 46,6     | 4,8      | 7,8      | 16,3      |        |        |        |        |              |
| 36        | 777        | 41,1     | 47,7    | 53,3    | 64,5     | 76,7     | 50       | 6,6      | 12,2     | 23,4      | 247    | 214    | 34,615 | 33,201 |              |
| 37        | 725        | 41,4     | 50,4    | 60,8    | 69,4     | 77,6     | 52,3     | 9        | 19,4     | 28        |        |        |        |        |              |
| 38        | 659        | 39,5     | 44,7    | 50      | 49,7     | 62,3     | 47,6     | 5,2      | 10,5     | 10,2      | 203    | 173    | 20,443 | 17,37  |              |
| 39        | 539        | 42,3     | 50,6    | 59,3    | 60,5     | 73       | 52,2     | 8,3      | 17       | 18,2      | 197    | 167    | 18,02  | 14,401 |              |
| 40        | 340        | 41,9     | 46,4    | 54,9    | 55,3     | 65,3     | 50,9     | 4,5      | 13       | 13,4      |        |        |        |        |              |
| 41        | 125        | 39,7     | 42,6    | 45,3    | 44,4     | 47,3     | 44,1     | 2,9      | 5,6      | 4,7       | 185    | 161    | 12,703 | 11,211 |              |

Ecart par rapport à  $T_{ae}$ 

### Perte de poids de la tomate



### Variations de la teneur en eau



### III.3.7.1 ) Interprétation des résultats

Pendant la première journée, on constate que l'évacuation de l'eau du produit est plus accélérée avec ce séchoir qu'avec le séchoir témoin.

En fin de la journée, les produits contiennent 88% d'eau contre 92% dans le cas du séchoir témoin. Soit une baisse par rapport au premier de 4% d'eau; ce qui est déjà un bon résultat.

Cette teneur pourrait être considérablement réduite si on avait commencé le séchage en début de la matinée.

L'examen des variations de températures internes montre que celles-ci ont augmenté alors qu'elles devraient être moins élevées que celles du séchoir témoin (effet d'amélioration de la convection avec agrandissement des ouvertures).

Cette augmentation des températures s'explique par le fait que l'essai s'est déroulé au cours d'une journée bien ensoleillée.

Pour ce jour, l'ensoleillement maximal mesuré est de  $760 \text{ W/m}^2$  à 12 heure avec une température ambiante maximale de  $43,1^\circ\text{C}$ .

On remarque aussi que la claie supérieure sèche plus vite que la claie inférieure.

Ceci se traduit par un décalage sur les allures de courbes de la teneur en eau.

Ce qui signifie que l'apport interne par rayonnement de la coquille supérieure vers les produits situés sur cette claie est plus élevé que sur ceux placés sur la claie inférieure.

Le lendemain matin, on a constaté aucune trace des moisissures.

Ceci peut s'expliquer que les produits ont atteint une humidité à partir de laquelle ils sont à l'abri des moisissures.

On remarque aussi que la teneur en eau est descendue jusqu'à 70%. C'est à dire qu'on a évacué 18% pendant la nuit.

Au cours de la deuxième journée, on assiste à une élévation des températures internes, ce qui se traduit par une diminution rapide de poids du produit.

Nous avons arrêté le séchage lorsqu'on a constaté que les produits sont secs.

Les teneurs en eau finales obtenues sont égales à 12,7% pour la masse M1 et 11,2% pour la masse M2.

La durée moyenne du séchage est de 1 jour et 7 heures.

Comparativement au séchoir témoin, on constate une nette amélioration au niveau non seulement de la durée de séchage mais aussi à la disparition des moisissures avec ce séchoir.

### **III.3.8 ) Troisième essai en charge:**

Pour cet essai, nous avons utilisé le séchoir du deuxième essai auquel nous avons ajouté une cheminée solaire.

Nous avons mis dans le séchoir 5189 grammes de tomates dont 2610 grammes sont étalés sur la claie supérieure et 2579 grammes sur la claie inférieure.

Après la préparation des produits, nous avons démarré l'essai à 8 heure.

Il faut noter que pour cet essai, nous n'avons pas traité les produits au métabisulfite de sodium. Cette initiative était prise dans le but de voir si sans le traitement il pourrait avoir un changement considérable.

Notons aussi que nous avons poursuivi la pesée des claies pendant la nuit.

Les résultats de mesures sont regroupés dans le tableau ci-joint pour la période du 17 au 18 Mai 1996, ainsi que sur des graphes suivants:

- Variations de températures,
- Ecart entre différentes températures,
- Perte de poids de la tomate au cours du séchage,
- Variations de la teneur en eau.

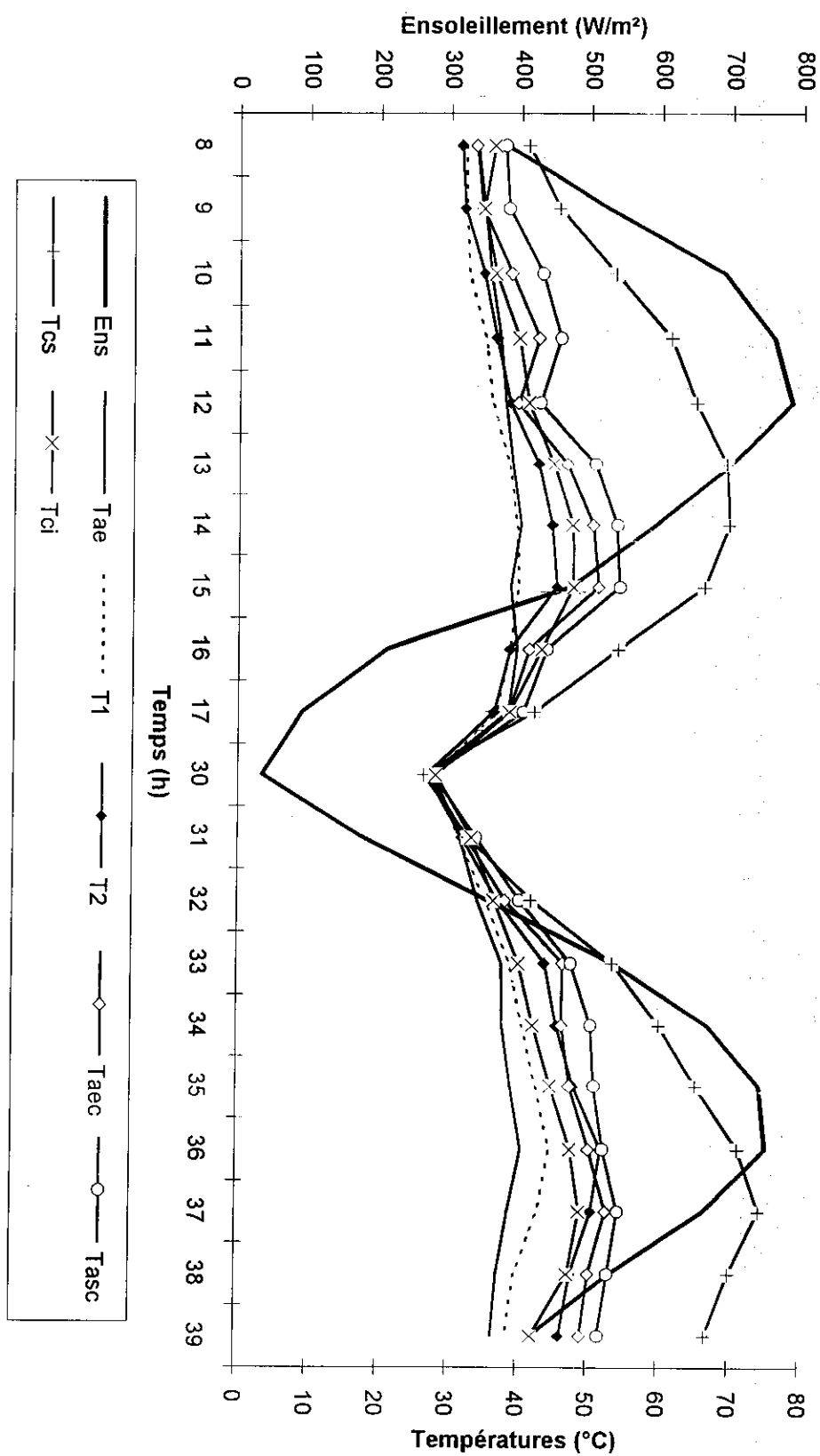
## RELEVÉ DE MESURES DU 17 AU 18 MAI 1996

| Temps (h) | Ens (W/m²) | Tae (°C) | T1 (°C) | T2 (°C) | Taec (°C) | Tasc (°C) | Tes (°C) | Tel (°C) | T1 - Tae | T2 - Tae | Tasc - Taec | M1 (g) | M2 (g) | W1 (%) | W2 (%) | Observations     |
|-----------|------------|----------|---------|---------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|-------------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| 8         | 378        | 33,7     | 32,1    | 31,4    | 33,5      | 37,6      | 41       | 36,2     | -1,6     | -2,3     | 4,1         | 2610   | 2579   | 95     | 95     | Ciel peu nuageux |
| 9         | 523        | 34,7     | 32,1    | 31,9    | 34,4      | 38,2      | 45,4     | 34,6     | -2,6     | -2,8     | 3,8         |        |        |        |        |                  |
| 10        | 688        | 35,6     | 32,5    | 34,6    | 38,6      | 43        | 53,4     | 36,3     | -3,1     | -1       | 4,4         |        |        |        |        |                  |
| 11        | 758        | 37       | 34,9    | 36,4    | 42,5      | 45,6      | 61,3     | 39,6     | -2,1     | -0,6     | 3,1         | 1972   | 1615   | 93,382 | 92,015 |                  |
| 12        | 784        | 37,8     | 35,9    | 38,4    | 39,5      | 42,7      | 64,9     | 41,1     | -1,9     | 0,6      | 3,2         |        |        |        |        |                  |
| 13        | 699        | 38,8     | 38,4    | 42,5    | 46,6      | 50,6      | 69,2     | 44,7     | -0,4     | 3,7      | 4           |        |        |        |        |                  |
| 14        | 592        | 40       | 39,5    | 44,4    | 50,3      | 53,7      | 69,6     | 47,4     | -0,5     | 4,4      | 3,4         | 1336   | 1287   | 90,232 | 89,981 |                  |
| 15        | 472        | 38,6     | 39,7    | 45,2    | 51,1      | 54,1      | 66,2     | 47,6     | 1,1      | 6,6      | 3           |        |        |        |        |                  |
| 16        | 212        | 39,5     | 38,6    | 38,6    | 41,3      | 43,8      | 54       | 43,1     | -0,9     | -0,9     | 2,5         |        |        |        |        |                  |
| 17        | 91         | 38,3     | 36,7    | 36,3    | 38,4      | 40,5      | 42,1     | 38,6     | -1,6     | -2       | 2,1         | 912    | 862    | 85,691 | 85,041 |                  |
| 19        |            |          |         |         |           |           |          |          |          |          |             | 741    | 705    | 82,389 | 81,709 |                  |
| 21        |            |          |         |         |           |           |          |          |          |          |             | 522    | 509    | 75     | 74,666 |                  |
| 23        |            |          |         |         |           |           |          |          |          |          |             | 455    | 450    | 71,319 | 71,344 |                  |
| 25        |            |          |         |         |           |           |          |          |          |          |             | 405    | 405    | 67,778 | 68,16  |                  |
| 27        |            |          |         |         |           |           |          |          |          |          |             | 352    | 355    | 62,926 | 63,676 |                  |
| 29        |            |          |         |         |           |           |          |          |          |          |             | 329    | 336    | 60,334 | 61,622 |                  |
| 30        | 34         | 27,9     | 27,6    | 26,8    | 27,2      | 27,7      | 26,4     | 28,1     | -0,3     | -1,1     | 0,5         |        |        |        |        |                  |
| 31        | 176        | 31,5     | 31,4    | 31,8    | 32,4      | 33,8      | 32,7     | 33,2     | -0,1     | 0,3      | 1,4         | 301    | 305    | 56,645 | 57,721 |                  |
| 32        | 355        | 34,1     | 35,2    | 36,9    | 38,1      | 40,1      | 41,8     | 36,5     | 1,1      | 2,8      | 2           |        |        |        |        |                  |
| 33        | 535        | 37,6     | 38,8    | 43,8    | 46,4      | 47,5      | 53,4     | 40       | 1,2      | 6,2      | 1,1         | 231    | 233    | 43,506 | 44,657 |                  |
| 34        | 670        | 37,8     | 40,6    | 45,5    | 46,3      | 50,4      | 60,1     | 42,2     | 2,8      | 7,7      | 4,1         |        |        |        |        |                  |
| 35        | 743        | 39       | 42,6    | 48      | 47,4      | 50,9      | 65,3     | 44,7     | 3,6      | 9        | 3,5         | 177    | 180    | 26,271 | 28,361 |                  |
| 36        | 752        | 40,5     | 44,6    | 51,9    | 50,2      | 52,2      | 71,3     | 47,6     | 4,1      | 11,4     | 2           |        |        |        |        |                  |
| 37        | 665        | 38,7     | 43      | 50,6    | 52,7      | 54,4      | 74,4     | 48,9     | 4,3      | 11,9     | 1,7         | 160    | 163    | 18,438 | 20,89  |                  |
| 38        | 533        | 37,2     | 39,8    | 47,7    | 50,3      | 53        | 70,1     | 47,3     | 2,6      | 10,5     | 2,7         |        |        |        |        |                  |
| 39        | 421        | 36,5     | 38,5    | 46,2    | 49,2      | 51,7      | 66,8     | 42,2     | 2        | 9,7      | 2,5         | 145    | 147    | 10     | 12,279 |                  |

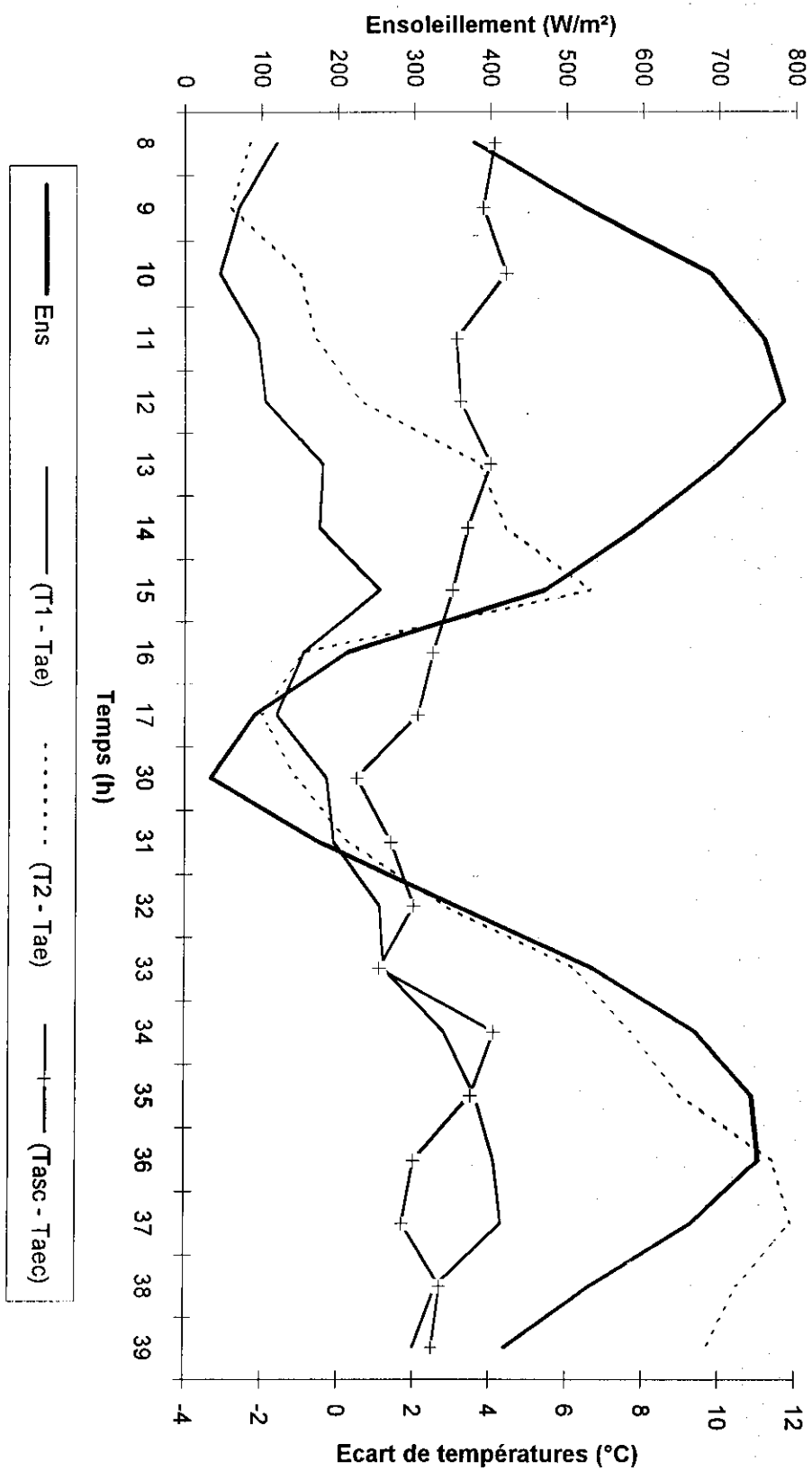
**LEGENDE DU TABLEAU :**

- Taec (°C) : température de l'air à l'entrée de la cheminée.
- Tasc (°C) : température de l'air à la sortie de la cheminée.

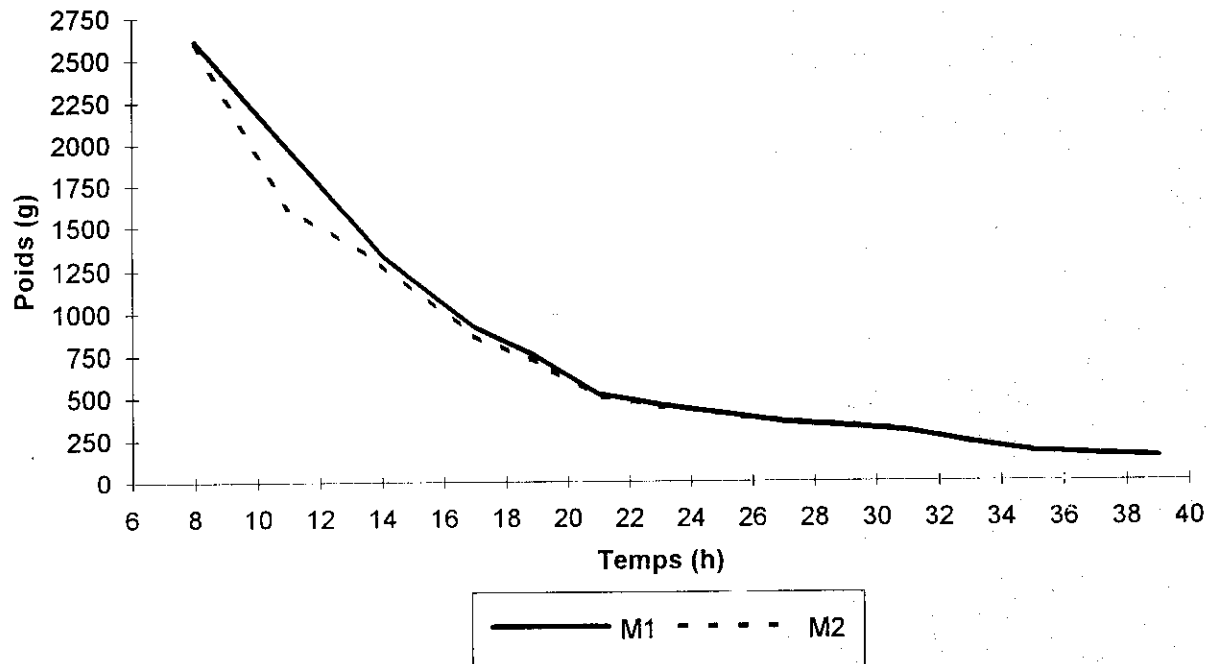
## Variations de températures



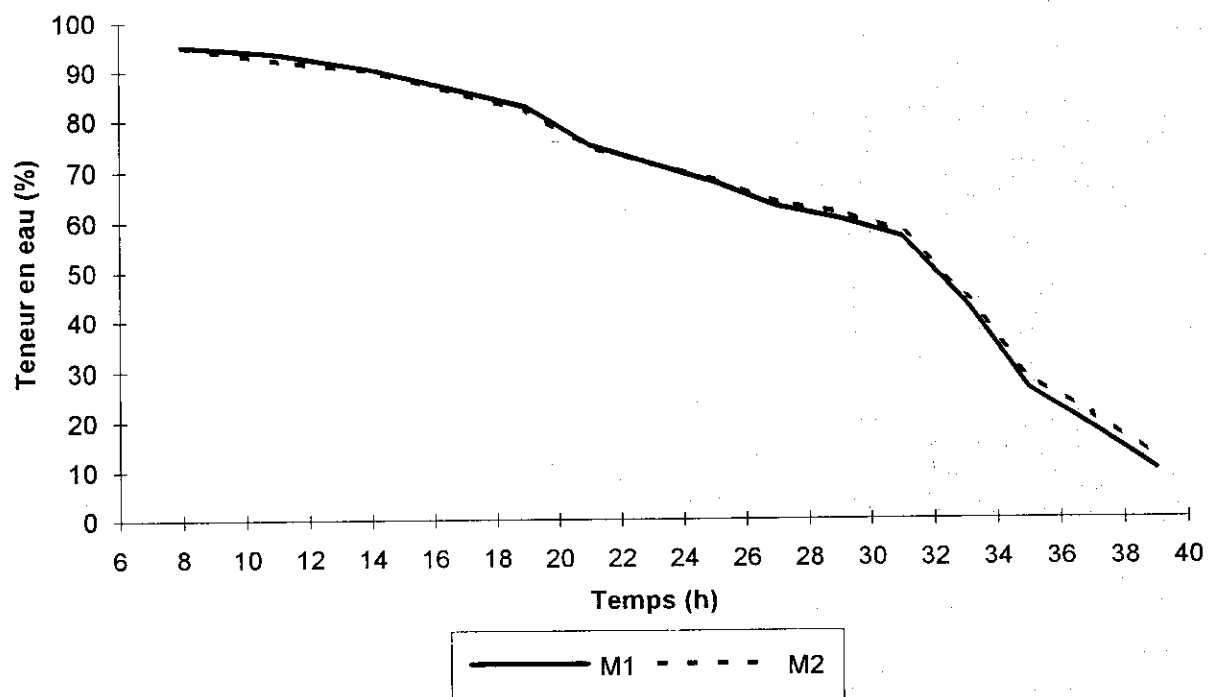
### Ecarts par rapport à $T_{ae}$



### Perte de poids de la tomate



### Variations de la teneur en eau



### **III.3.8.1 ) Interprétation des résultats:**

On constate qu'en fin de la première journée la teneur en eau a considérablement diminué. En effet on a obtenu une teneur de 85% contre 95% à l'état initial; soit une baisse de 10%.

Ceci s'explique par le fait qu'on a commencé l'essai au bon moment, que la journée était ensoleillée et qu'avec la cheminée nous avons obtenu un tirage satisfaisant.

Il faut noter qu'on pourrait descendre plus bas que cette valeur si l'on n'avait pas perturbé le fonctionnement du séchoir en pesant les claies plusieurs fois dans la journée.

L'examen du graphe "Ecart par rapport à Tae" montre que la différence entre la température de l'air à la sortie et l'air à l'entrée de la cheminée varie de 2,1°C à 4,4°C avec un ensoleillement de l'ordre de 91 W/m<sup>2</sup> à 784 W/m<sup>2</sup> entre 8 heure et 17 heure.

Nous pouvons donc dire que le débit d'air a augmenté puisque la différence de température entre l'air qui sort et l'air qui entre dans le séchoir est en moyenne de 15°C.

Le lendemain matin, on a constaté que les produits ne contiennent que 57% d'eau et qu'il n'y ait pas eu des moisissures sur les produits.

Au cours de la deuxième journée, on a poursuivi le séchage; les températures internes ont augmenté, mais l'écart entre la température de l'air à la sortie et à l'entrée de la cheminée a légèrement baissé et se situe autour de 0,5°C à 4,1°C.

Cette amélioration peut s'expliquer que l'effet de la cheminée et l'agrandissement des ouvertures d'entrée de l'air ont fortement favorisé la circulation d'air à l'intérieur du séchoir.

En fin de séchage, nous avons obtenu une teneur en eau finale de 10% pour la masse M1 et 12% pour la masse M2.

La durée moyenne du séchage est de 1 jour et 7 heures.

Cette durée pourrait être réduite si au cours de la première journée on avait un ciel dégagé et que la journée était suffisamment ensoleillée.

### **III.4 ) CONCLUSIONS SUR LES ESSAIS:**

Les résultats des essais seraient complets et plus explicatifs si l'on avait pu disposer des sondes d'humidité et des anémomètres pour les mesures d'humidité et vitesses du vent à l'entrée et à la sortie des séchoirs.

Néanmoins cette expérimentation nous permet d'éclaircir quelques défauts liés au séchoir témoin:

- L'étanchéité entre coquilles est insuffisante pour espérer un tirage thermique du bas vers le haut.
  - Faibles ouvertures d'entrée d'air créant une insuffisance de circulation de l'air à l'intérieur du séchoir.
  - Tirage thermique au niveau des produits très faibles pendant les premières journées.
- Conséquences: en fin de la première journée, les eaux du produit ne sont pas évacuées au maximum et le lendemain on constate des moisissures sur les produits.

- La qualité de la peinture noire utilisée ne permet pas d'obtenir une température plus élevée possible.

Vu les pertes radiatives qu'il y a, il faut pouvoir utiliser une peinture bien appropriée.

- La distance entre les entrées d'air et le sol est très courte ( $< 40$  cm).

Cette distance ne permet pas au séchoir de profiter du vent qui circule.

- L'entrée d'air par les ouvertures de la virole est à revoir.

Pour notre part, elle ne joue pas ce rôle mais plutôt elle favorise les pertes de chaleur interne.

Par ailleurs lorsqu'on a agrandi les ouvertures d'entrée d'air, on a constaté une nette amélioration au niveau de la convection, de la vitesse de séchage et tout ceci a permis d'anéantir le développement des moisissures.

En plus de l'agrandissement des ouvertures, une cheminée solaire a été ajoutée et on a obtenu les résultats suivants:

- un tirage d'air satisfaisant ( la différence de température entre l'air à la sortie de la cheminée et l'air à la sortie des produits est de l'ordre de  $6^{\circ}\text{C}$  à  $8^{\circ}\text{C}$ ).

- Faible durée de séchage (1 jour et 7 heures).

- Disparition également des moisissures.

Mais il serait nécessaire de poursuivre l'expérimentation de ces nouveaux séchoirs avant confirmation des résultats.

## **CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS:**

A l'issue de cette expérimentation, il faut retenir que la cause fondamentale du développement des moisissures sur les produits nous semble être le degré hygrométrique élevée de l'air ambiant; du fait que la température ambiante est aussi élevée (entre 20°C et 50°C), il en résulte l'apparition des moisissures.

Le principe de la solution que nous proposons est de maintenir dans les séchoirs une température supérieure à 15 °C par rapport à la température ambiante au moins pendant les deux premières phases du séchage; ceci aura pour effet d'y réduire le taux d'humidité relative de l'air à une valeur inférieure à 80%, valeur considérée comme seuil maximal permettant aux produits de se mettre à l'abri des moisissures (Polycopie SECHAGE SOLAIRE - Yves JANNOT).

Sur le plan technique, les séchoirs N°1 et 2 donnent des résultats plus satisfaisants que le séchoir témoin:

- Vitesse de séchage relativement élevée au début du séchage,
- Durée de séchage plus court (1 jour et 7 heures),
- Disparition des moisissures sur les produits mis à sécher.

Cependant entre les deux séchoirs N°1 et 2 , le N°2 présente des avantages par rapport à l'autre:

- L'évacuation de l'eau du produit est plus accélérée que dans le cas du séchoir N°1,
- La cheminée ajoutée a permis d'activer l'écoulement de l'air chaud vers le haut et produisant ainsi une amélioration du tirage thermique au niveau des produits.

Vu les avantages mentionnés ci-dessus, nous pensons que le séchoir N°2 est mieux approprié pour sécher les produits sans apparition des moisissures et avec une durée de séchage relativement faible.

Les recommandations après ces expériences sont les suivantes:

- Nous conseillons de commencer le séchage très tôt au début de la matinée (à 7 h 00) afin de profiter du soleil,
- Il faut se rassurer que la journée sera bien ensoleillée,
- Nous recommandons à ce que le séchoir puisse être placé dans un endroit dégagé pour lui faciliter de profiter de l'air qui circule,
- Il faut éviter que les produits ne soient étalés les uns sur les autres.

Les répartir uniformément sur les claies.

- Eviter de permuter les claies à plusieurs fois par jour: cela perturbe le bon fonctionnement du séchoir, (1 fois/j suffit).
  - Fermer le séchoir avec un cadenas si possible afin d'éviter aux curieux d'ouvrir le couvercle et perturber le bon fonctionnement du séchoir.
- Quant aux agents de conception des séchoirs coquillage:
- Il faut utiliser la peinture noir mat ou de l'ardoisine,
  - Veuillez à l'étanchéité entre différents éléments du séchoir lors de la conception,
  - Augmenter la hauteur des pattes du séchoir (on propose un minimum de 80 cm).

## **BIBLIOGRAPHIE**

- 1 ) GRET - GERES, 1986  
" Le point sur le séchage solaire ", Dossier N°8.
- 2 ) Yves JANNOT, 1990  
" Séchage solaire ", polycopié, E.I.E.R.
- 3 ) Yves JANNOT  
" Thermique solaire ", polycopié, E.I.E.R.
- 4 ) CF - CTA - GRET - GERES - FAO  
" Sécher des produits alimentaires "
- 5 ) Michel DAGUENET, 1985  
" Les séchoirs solaires: théorie et pratique ", UNESCO, Paris.
- 6 ) DIONI Aly, 1992/93  
" Conception et réalisation d'un nouveau type de séchoir coquillage ",  
Mémoire de fin d'études.
- 7 ) SOME Kanyi, 1991/92  
" Etude d'écoulement d'air dans un séchoir en convection naturelle;  
Conception et réalisation d'un séchoir en convection forcée;  
Déshydratation osmotique ",  
Rapport de travaux de recherche appliquée (FPU - EDR 2ème année).
- 8 ) ABAC - GERES, 1984  
" Guide pratique: Comment sécher vos produits avec le séchoir coquillage ? "
- 9 ) M. FOURNIER  
" Modélisation et Simulation de procédés solaires ",  
Fascicule, IUT, Université de Perpignan.
- 10 ) " Le séchage des produits alimentaires "  
Compte rendu du colloque tenu à Edmonton, Alberta du 6 au 9/07/ 1981.

# **ANNEXES**

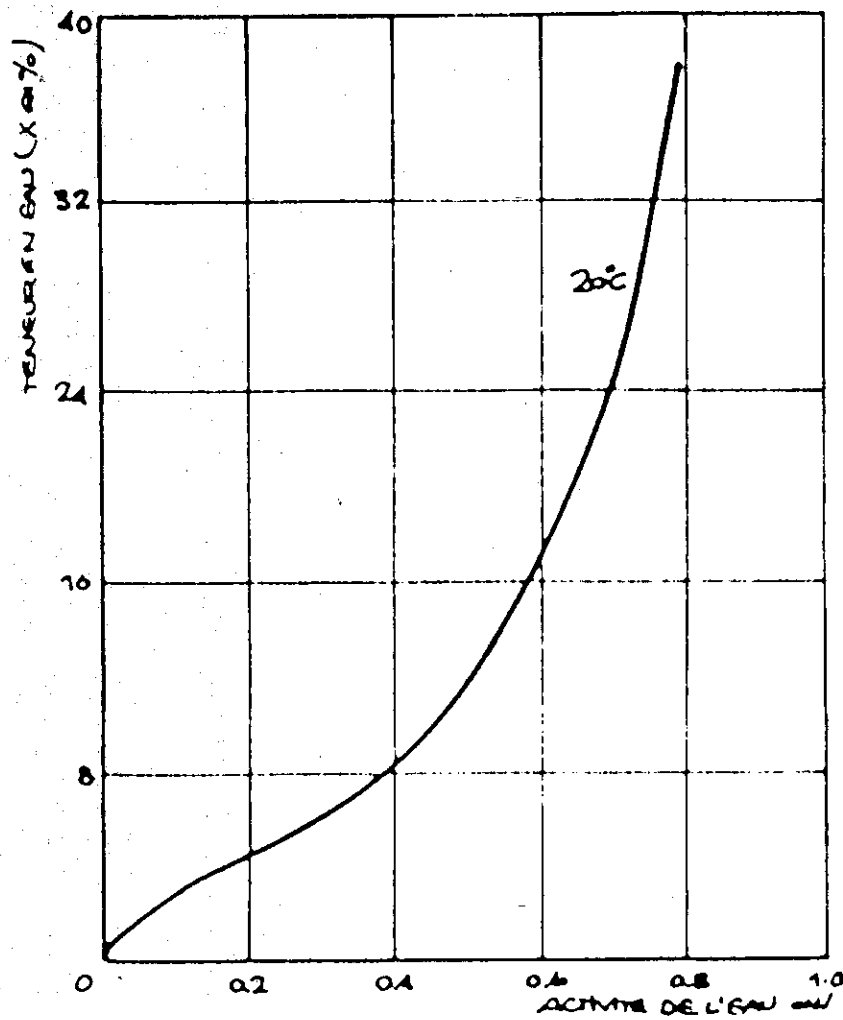
# SOMMAIRE

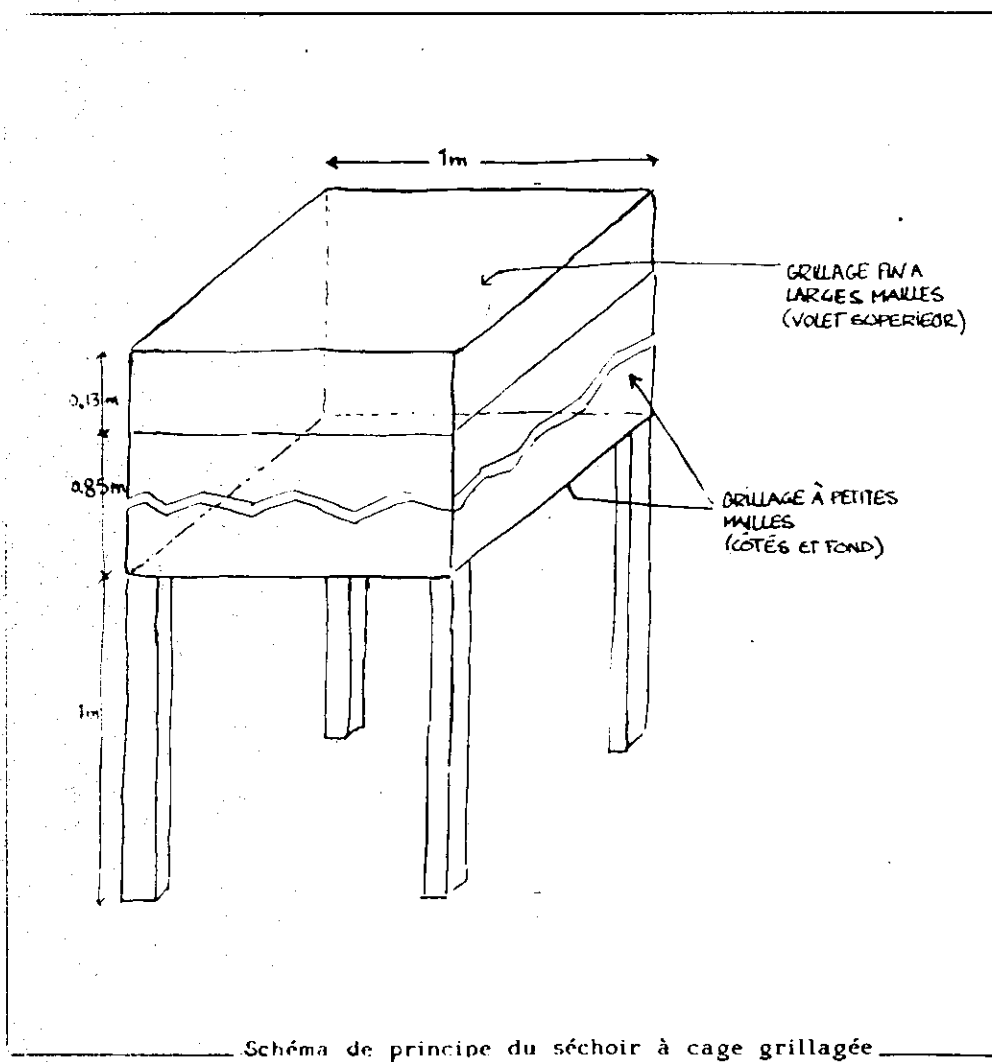
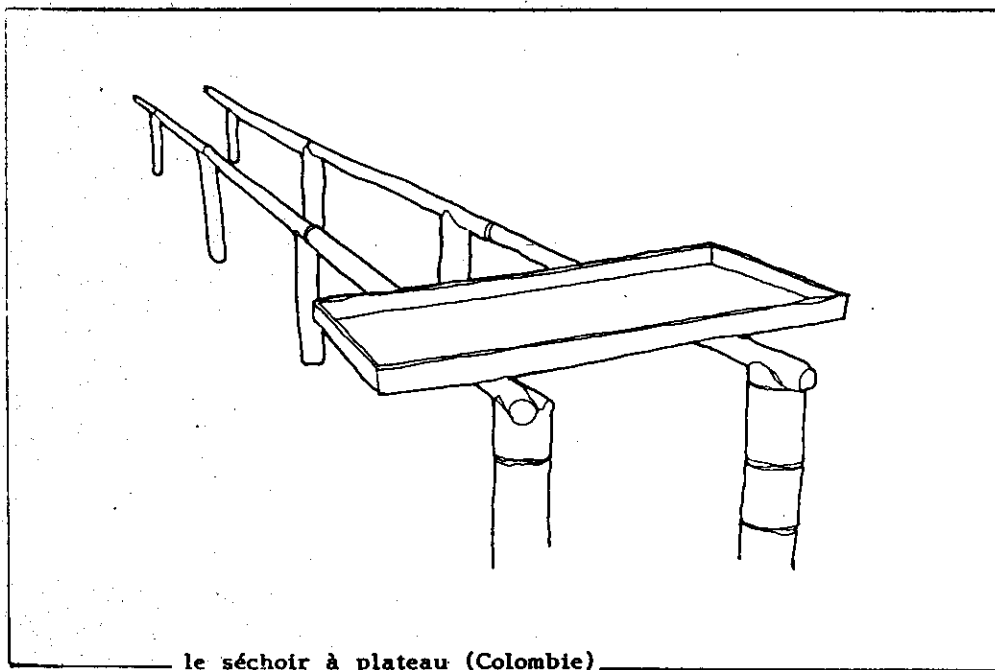
|                                                            | Pages |
|------------------------------------------------------------|-------|
| - Températures maximales de séchage                        | 1     |
| - Courbe de sorption - désorption de la tomate             | 2     |
| - Les différents types de séchoirs                         | 3     |
| . les séchoirs naturels                                    | 3     |
| . les séchoirs solaires directs                            | 4     |
| . les séchoirs solaires indirects                          | 5     |
| . les séchoirs mixtes                                      | 6     |
| - Cout de fabrication des séchoirs "coquillage" au BURKINA | 7     |

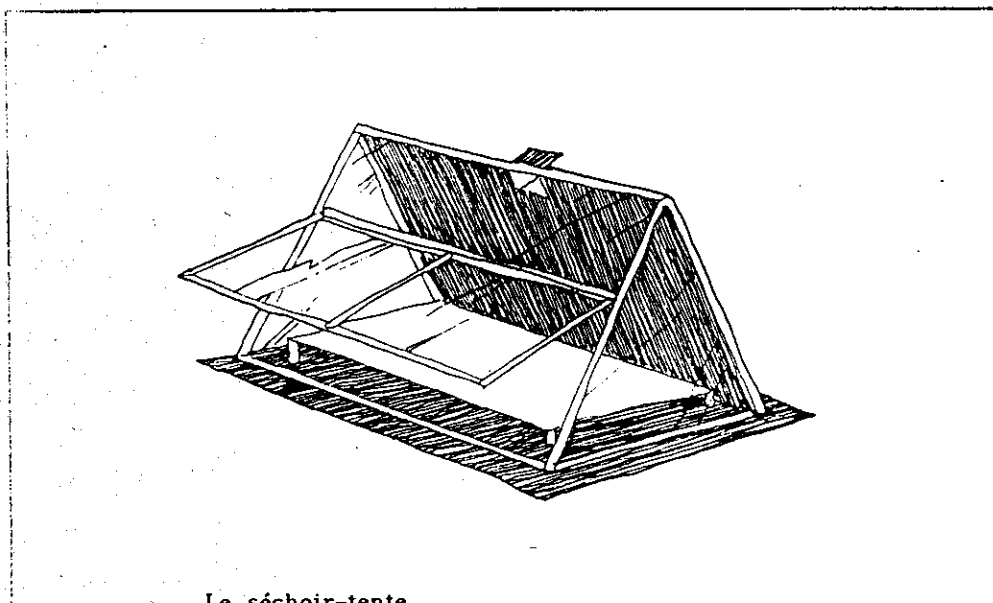
# TEMPERATURES MAXIMALES DE SECHAGE

| Produits                                                            | Humidité<br>initiale<br>(%)<br>sur base<br>humide | Humidité<br>finale<br>(%)<br>sur base<br>humide | Température<br>maximale<br>(°C) | Prétraitements        |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 1. paddy, cru                                                       | 22-24                                             | 11                                              | 50                              |                       |
| 2. paddy, demi-cuit                                                 | 30-35                                             | 13                                              | 50                              | cuisson à demi        |
| 3. maïs                                                             | 25                                                | 15                                              | 60-80                           |                       |
| 4. blé                                                              | 20                                                | 16                                              | 45                              |                       |
| 5. millet                                                           | 21                                                | 14                                              |                                 |                       |
| 6. haricots                                                         |                                                   | 15                                              |                                 |                       |
| 7. pois verts                                                       | 80                                                | 5                                               | 65                              | blanchiment           |
| 8. choux fleurs                                                     | 80                                                | 6                                               | 65                              | découpage             |
| 9. carottes                                                         | 70                                                | 5                                               | 75                              | " blanchiment         |
| 10. haricots verts                                                  | 70                                                | 5                                               | 75                              | blanchiment           |
| 11. oignons, ail                                                    | 80                                                | 4                                               | 55                              | découpage             |
| 12. choux                                                           | 80                                                | 4                                               | 55                              | éminçage, blanchiment |
| 13. patates douces                                                  | 75                                                | 7                                               | 75                              | morceaux              |
| 14. pommes de terre                                                 | 75                                                | 13                                              |                                 | "                     |
| 15. légumes à feuilles<br>(épinards, feuilles<br>de manioc, etc...) | 80                                                | 10                                              |                                 |                       |
| 16. piments                                                         |                                                   | 5                                               | 65                              |                       |
| 17. manioc                                                          | 62                                                | 17                                              |                                 | morceaux              |
| 18. prunes                                                          |                                                   | 25                                              | 77                              | soufrage              |
| 19. pommes                                                          |                                                   | 24                                              | 70                              | découpage             |
| 20. abricots, pêches                                                | 85                                                | 18                                              | 55                              | " , soufrage          |
| 21. raisins                                                         | 80                                                | 15-20                                           | 70                              | soufrage              |
| 22. bananes                                                         |                                                   | 15                                              | 70                              | coupe longitudinale   |
| 23. goyaves                                                         |                                                   | 7                                               | 65                              | découpe, égrenage     |
| 24. figues                                                          |                                                   | 24                                              | 45-50-65-70                     | soufrage              |
| 25. thé                                                             |                                                   |                                                 | 36                              |                       |
| 26. café                                                            | 50-52                                             | 11                                              |                                 | trempage, pelage      |
| 27. fèves de cacao                                                  | 50                                                | 7-8                                             | 55                              | fermentation          |
| 28. coton                                                           |                                                   | 9                                               |                                 |                       |
| 29. graines de coton                                                |                                                   | 8                                               |                                 |                       |
| 30. copra                                                           | 30                                                | 5                                               |                                 | découpage             |
| 31. arachides                                                       | 40                                                | 9                                               |                                 |                       |
| 32. épices                                                          |                                                   |                                                 | 90                              |                       |
| 33. noix de cajou                                                   |                                                   |                                                 | 90                              |                       |
| 34. poissons                                                        |                                                   |                                                 | 45-50                           |                       |
| 35. cocon de ver à soie                                             | 68-70                                             | 10-12                                           | 80                              |                       |
| 36. briques                                                         | 16                                                |                                                 | 70                              |                       |
| 37. bois :                                                          |                                                   |                                                 |                                 |                       |
| feuillus,                                                           | 25-35                                             | 17-20                                           | 40-50                           |                       |
| conifères,                                                          | 30-40                                             | 10-15                                           | 40-50                           |                       |
| bois trempé                                                         | 60                                                | 12                                              | 40-50                           |                       |
| 38. cuir                                                            | 50-65                                             | 18                                              | 30-35                           | tannage               |
| 39. tissus, fil                                                     | 50                                                |                                                 | 75                              |                       |

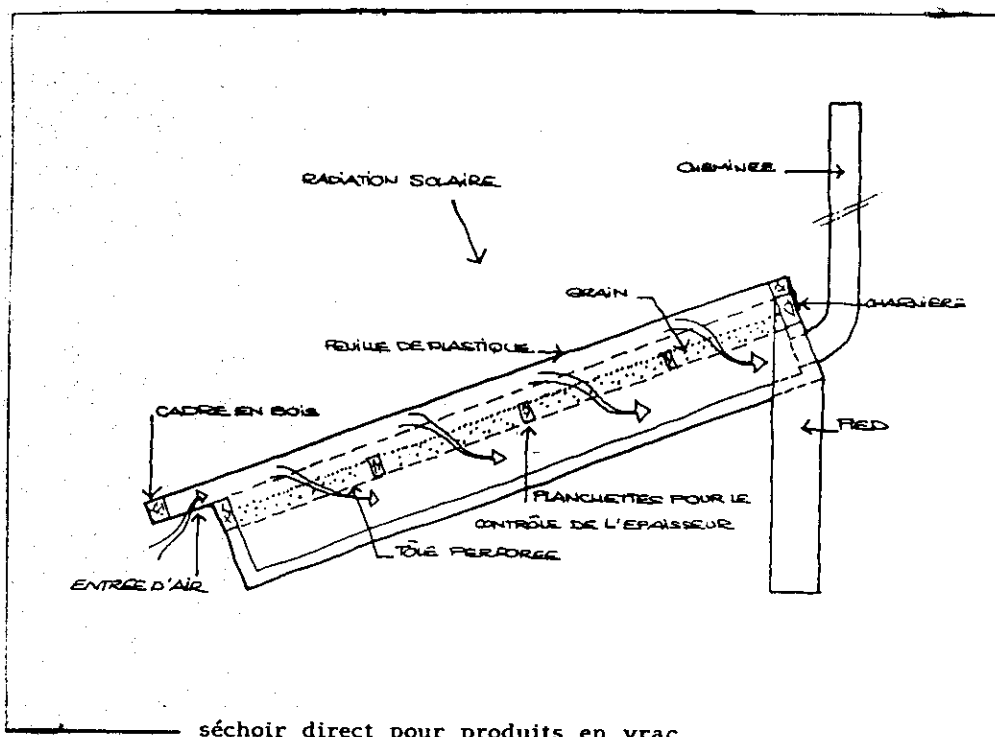
## COURBE DE SORPTION-DESORPTION DE LA TOMATE





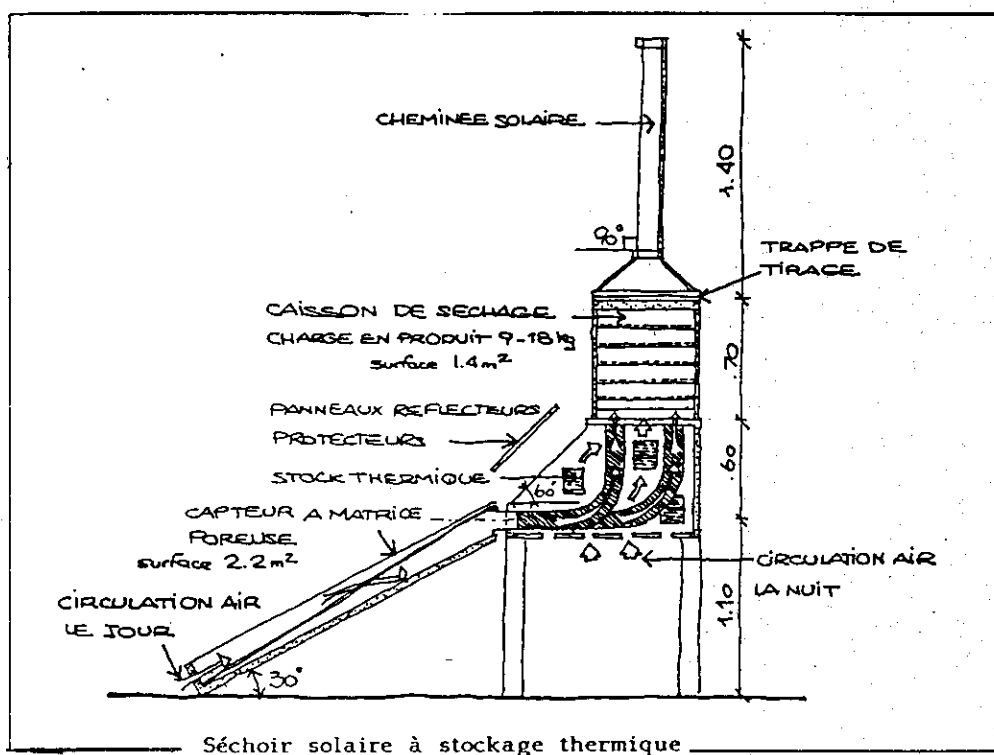
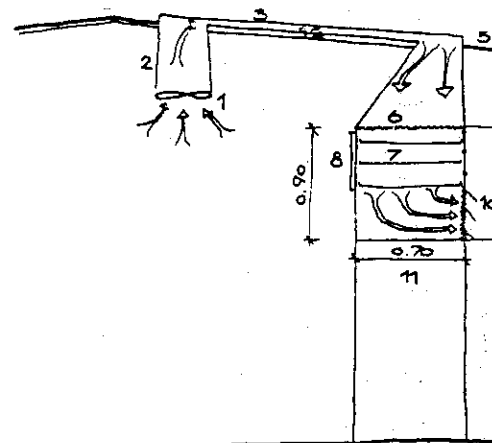


Le séchoir-tente

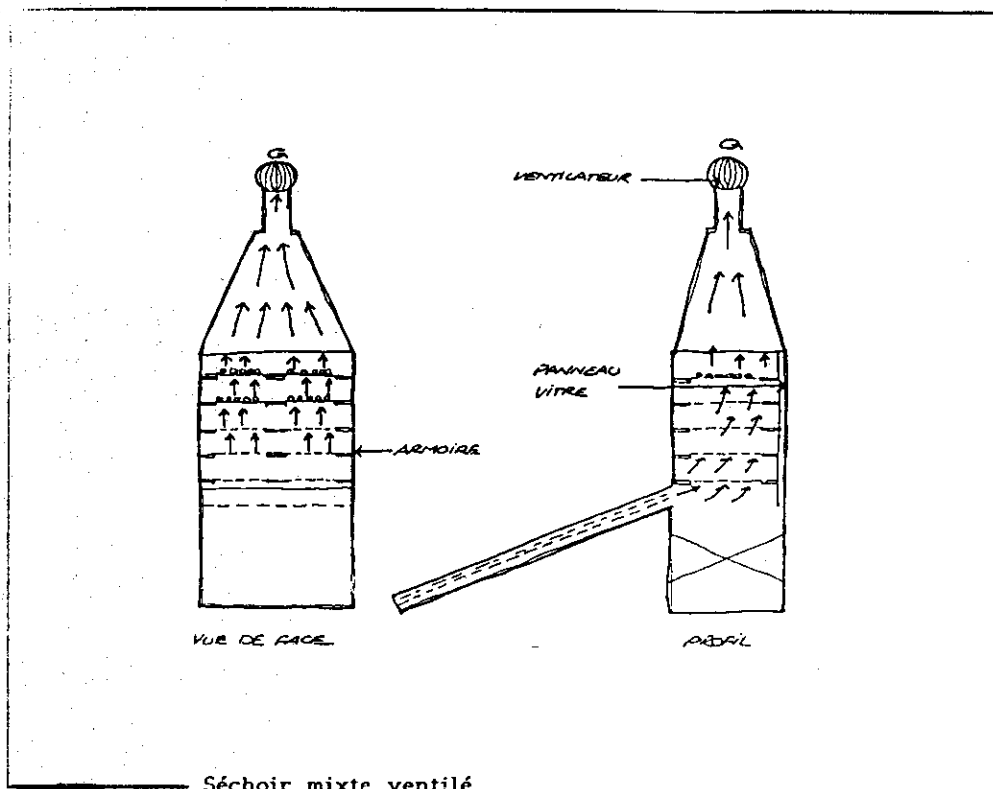
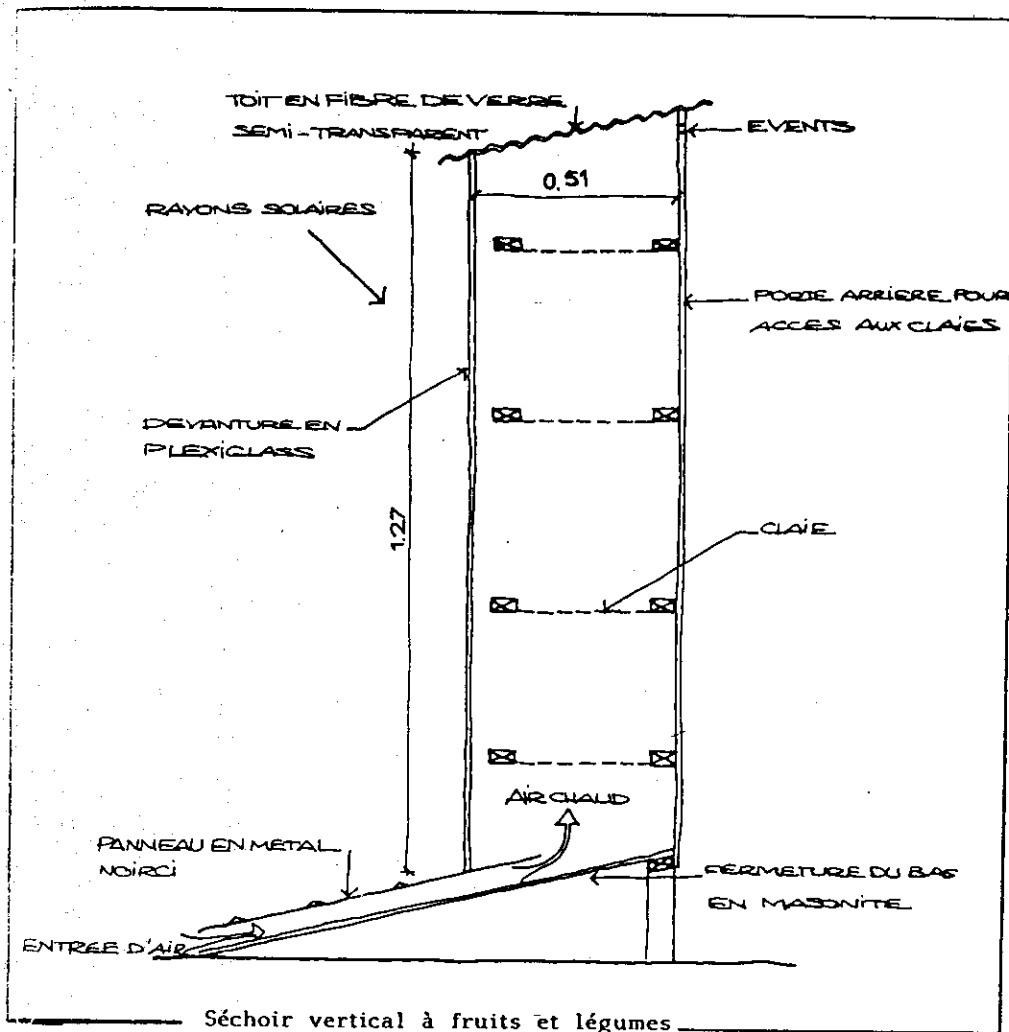


séchoir direct pour produits en vrac

Séchoir à fruits  
avec ventilateur  
électrique



Séchoir solaire à stockage thermique



## COUT DE FABRICATION DES SECHOIRS AU BURKINA FASO :

| Désignation \ Séchoir                                                   | N° 1                                        | N° 2                                          | N° 3                                          |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Capacité moyenne produits frais                                         | 1 à 3 kg                                    | 5 à 10 kg                                     | 8 à 15 kg                                     |
| Capacité moyenne produits secs<br>(varie selon produit/période séchage) | 0,1 à 0,2<br>kg/jour                        | 0,2 à 0,7<br>kg/jour                          | 0,3 à 1,3<br>kg/jour                          |
| <b>SPECIFICATIONS TECHNIQUES :</b>                                      |                                             |                                               |                                               |
| Surface trous sup/inférieure                                            | 18 cm <sup>2</sup> /<br>113 cm <sup>2</sup> | 177 cm <sup>2</sup> /<br>1291 cm <sup>2</sup> | 200 cm <sup>2</sup> /<br>1786 cm <sup>2</sup> |
| Diamètre claie principale (2)                                           | 67 cm                                       | 88 cm                                         | 106 cm                                        |
| Diamètre claie finition                                                 | 45 cm                                       | 70 cm                                         | 75 cm                                         |
| Surface séchage principale                                              | 0,35 m <sup>2</sup>                         | 1,19 m <sup>2</sup>                           | 1,76 m <sup>2</sup>                           |
| Surface séchage finition                                                | 0,15 m <sup>2</sup>                         | 0,25 m <sup>2</sup>                           | 0,44 m <sup>2</sup>                           |
| Surface totale séchage                                                  | 0,50 m <sup>2</sup>                         | 1,44 m <sup>2</sup>                           | 2,20 m <sup>2</sup>                           |
| <b>COUT MATERIAUX (sept. 94) :</b>                                      |                                             |                                               |                                               |
| Tôle plane 10/10ème                                                     | 4 000                                       | 10.625                                        | 16.250                                        |
| Fer rond de 8 en 12 mètres                                              | 600                                         | 1 420                                         | 1 700                                         |
| Fer rond de 6 en 12 mètres                                              | 400                                         | 1.150                                         | 1.150                                         |
| Fer plat de 20 X 3 pour le chapeau                                      | 0                                           | 160                                           | 160                                           |
| Fer plat de 30 ou cornière de 30                                        | 0                                           | 120                                           | 120                                           |
| Grillage moustiqu. sortie/entrée d'air                                  | 300                                         | 1.000                                         | 2.000                                         |
| Charnière                                                               | 400                                         | 500                                           | 500                                           |
| 3 Boulons 5 X 20 fixation charnière                                     | 100                                         | 90                                            | 90                                            |
| Tube carré de 20 ou 25 pour pieds                                       | 400                                         | 550                                           | 850                                           |
| Toile moustiquaire pour claies                                          | 1.000                                       | 6.000                                         | 7.200                                         |
| Fil Nylon pour claies                                                   | 100                                         | 400                                           | 400                                           |
| Peinture noire mate                                                     | 500                                         | 1 500                                         | 3.000                                         |
| Baguettes à souder et/ou rivets                                         | 200                                         | 700                                           | 1.050                                         |
| Frais électricité soudure, meuleuse                                     | 500                                         | 700                                           | 900                                           |
| Charge diverse, amortissement maté.                                     | 1.000                                       | 2.000                                         | 2.000                                         |
| Main d'oeuvre + bénéfice artisans                                       | 2.000                                       | 5.085                                         | 6.130                                         |
| <b>COUT TOTAL PAR SECHOIR</b>                                           | <b>13.000</b>                               | <b>32.000</b>                                 | <b>44.000</b>                                 |
| <b>COUT PAR M<sup>2</sup> DE CLAIE</b>                                  | <b>26.000</b>                               | <b>22.200</b>                                 | <b>20.000</b>                                 |