

# 太陽熱을 利用한 牛乳 低温處理機 開發에 關한 研究(I)

## - 模型의 回路構成

### Etude d'un Système Pasteurisation de Lait à Energie Solaire (I)

#### - Composition de circuits d'une Maquette -

宋 鉉 甲\* · 호베르 듀성\*\*

Song, Hyun Kap · R. Duchamp

### 要 約

날씨가 더운지방에 小規模 牧場들이 먼거리를 두고 散在되어 있는 경우, 各牧場에서 生産된 牛乳를 收集해서 處理工場까지 輸送하는 데는 많은 어려움이 있다.

現代화된 牛乳處理工場이나 低温貯藏施設이 充分하지 못한 亞熱帶地方에 位置한 發展道上面에서는 牛乳를 長時間 收集하여 먼거리를 輸送하는 동안 많은量의 牛乳가 부패 損失되고 있다. 이 문제를 解決하기 爲하여, 그곳 現地牧場에 強하게 쏘이는 太陽熱을 利用하는 것은 대단히 바람직 하다. 에너지 절약이나, 牛乳의 腐敗損失을 막기 爲하여, 太陽熱을 利用한 小規模牛乳處理機를 開發하여 現地牧場에서 直接 牛乳를 處理하여 인근주민에게 공급하는 것이 가장좋은 해결방법이라 판단하고, 그 實現可能性을 確認하기 爲하여 實際로 太陽熱우유處理機 開發을 爲한 그 模型의 回路構成을 考察한 結果 다음과 같다.

1. 太陽熱 牛乳處理機의 模型은 다음 4個의 回路로 構成되었다.
  - 가. 牛乳순환 回路
  - 나. 加熱回路
  - 다. 豫冷回路
  - 라. 冷却回路
2. 牛乳加熱回路는 太陽熱을 利用하였으며 冷却回路는 壓縮式 冷却機를 利用하였다.
3. 自動制御시스템을 裝置하여 太陽強度變化에 따른 牛乳處理量 調節을 自動화 할 수 있도록 하였다.

## I INTRODUCTION

### Motivation d'étude

A l'origine de cette étude se trouve un organisme de développement d'applications techniques qui, devant les quantités de lait perdues par les éleveurs des pays en voie de développement, a eu l'idée d'un pasteurisateur de lait à énergie solaire.

En effet, dans une région semi désertique où la nourriture est difficile à obtenir, il paraît aberrant de perdre un aliment aussi complet que le lait.

La crise pétrolière de 1974 a entraîné dans les pays industrialisés des recherches sur l'exploitation de l'énergie solaire pour diminuer leur dépendance pétrolière et pour disposer d'une énergie "douce".

Ces recherches sont également favorables aux pays en voie de développement qui sont très bien ensoleillés et qui ont une infrastructure énergétique encore faible. Le projet de pasteurisation du lait à énergie solaire entre dans ce cadre.

D'après le G.R.E.T. (Groupe de Recherches et Etrange Technologique) l'Université d'Addis Abeba en Ethiopie se montre intéressée par un tel projet.

\* 忠北大學校 農大農業機械科

\*\* LEcole Nationale Supérieure D'Arts et Métiers, Paris

A part l'Ethiopie, seule l'Inde (Indian Institute of Technology) s'est préoccupée du traitement du lait par l'énergie solaire. (cf. 6).

Les recherches actuelles, dans le domaine de la pasteurisation, visent à accroître les performances des appareils industriels existants. Ces appareils industriels sont conçus pour traiter des quantités importantes de lait et nécessitent l'emploi de nombreux auxiliaires électriques. Dans la gamme des appareils proposés sur le marché, il n'existe pas d'appareil intermédiaire entre la casserole, appareil rudimentaire, et des appareils sophistiqués traitant 450 l/h. Notre objectif est de combler ce manque en proposant un appareil de technologie simple, autonome et utilisant au maximum l'énergie solaire.

#### But de la pasteurisation de lait

La pasteurisation est un procédé dont le but est non seulement d'augmenter la durée de conservation du lait par réduction de la flore banale, mais aussi de détruire les germes pathogènes pour l'homme en altérant le moins possible les propriétés physiques, chimiques, nutritives et biologiques du lait.

#### Orientation d'étude

Cette étude porte sur la réalisation d'une maquette (échelle 1) de pasteurisateur qui présente les caractéristiques principales suivantes:

- débit de lait : 60 l/h ;
- utilisation de l'énergie solaire;
- appareil transportable par camion, dans les villages;
- Technologie simple pour faciliter la construction sur place, dans les pays en voie de développement.

Le présent travail comporte 4 parties:

- choix d'une unité de pasteurisation de lait;
- montage du système et vérification du fonctionnement par essais;
- analyse du rendement du capteur solaire cylindro-parabolique transformant l'énergie solaire en

énergie thermique;

- modélisation des circuits de chaudière et de refroidissement pour un dimensionnement facile et précis des composants du système.

## 2. Principe de Pasteurisation du Lait

La pasteurisation est un chauffage modéré du lait, suivi d'un refroidissement rapide. Le chauffage assure la destruction de tous les germes pathogènes et de presque tous les germes banaux, le refroidissement bloque le développement des germes banaux non détruits.

### 2.1. Relation entre le temps et la température

Une opération de pasteurisation est caractérisée par la relation entre le temps de chauffage à réaliser et la température du lait.

La courbe jointe donne les valeurs de cette relation permettant d'assurer la destruction des germes pathogènes.

En général, pour des raisons de sécurité et à cause de la qualité du lait cru on utilise des valeurs qui se situent au-dessus de la courbe (voir fig I-1).

### 2.2. Circuit principal

L'unité de pasteurisation du lait est composée de deux parties:

- \* première partie est le circuit de chaudière qui se compose
  - du capteur solaire;
  - du ballon de stockage des calories;
  - du chambreur;
  - de l'échangeur à préchauffer le lait.
- \* deuxième partie est le circuit de refroidissement qui se compose:
  - de deux échangeurs à prérefroidir;
  - d'un groupe frigorifique (voir fig. I-2).

Le lait est envoyé par la pompe de circulation dans le circuit de chaudière, il est chauffé jusqu'à la température de 75°C à 80°C en passant dans le serpentin placé dans le ballon de stockage. Le ballon de

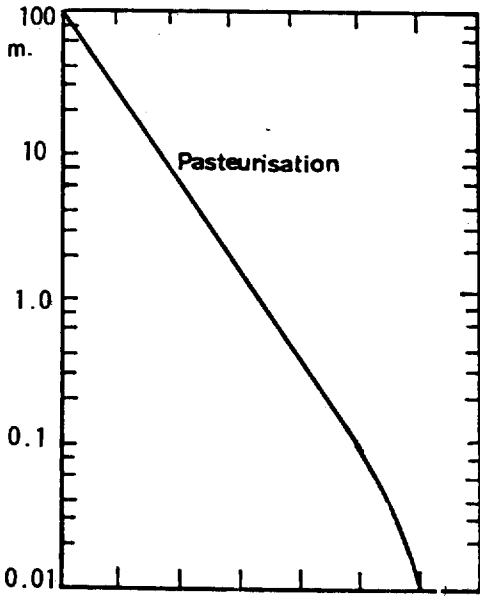


Fig. I. 1- Relation entre le temps et la température de pasteurisation du lait

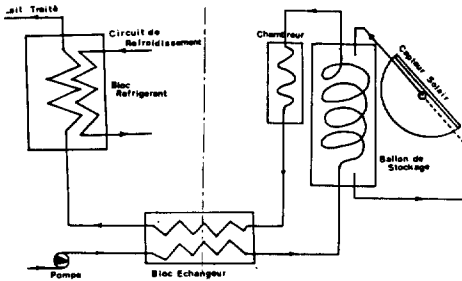


FIGURE I. 2-Circuit principal de pasteurisation du lait à énergie solaire.

stockage est chauffé par capteur solaire cylindro-parabolique, puis le lait traverse le chambreur pour entretenir la même température de 75°C à 78°C pendant 15 à 25 secondes. Il retourne dans le bloc échangeur où il échange la chaleur avec le lait cru entrant. Ensuite, il est refroidi rapidement à 5°C dans le groupe frigorifique.

### 2. 3. Evolution de la température de pasteurisation du lait

La température du lait évolue en six étapes comme

le montre la figure I-3 dans le circuit principal de la pasteurisation du lait.

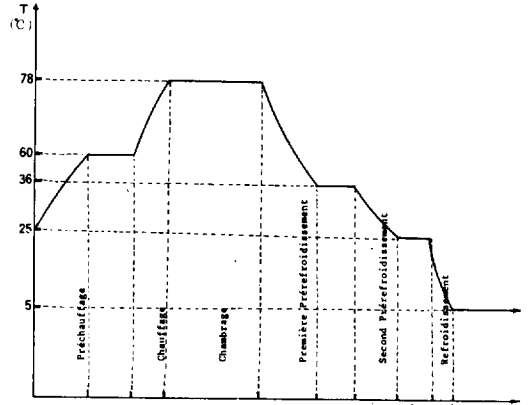


FIGURE I. 3-Evolution de la température en cours de la pasteurisation

### 3. Choix D'une Nouvelle Unité de Pasteurisation

On se propose la choix entre deux nouveaux systèmes en étudiant la puissance du moteur entrainant le compresseur du système, car il est absolument nécessaire d'économiser l'énergie.

Un system de chauffage

#### 3.1. Un système de chauffage et refroidissement par pompe a chaleur: (systeme I)

Une unité de pasteurisation à énergie solaire peut être réalisée par la pompe à chaleur qui permet de chauffer et de refroidir le lait par le même circuit frigorifique.

Le principee de fonctionnement de cette unité de pasteurisation à pompe à chaleur est représenté par le schéma suivant (voir fig. I-4).

#### \* Fonctionnement du système I:

- le lait entrainé par une pompe est préchauffé par le lait sortant du chambreur, puis il est chauffé à 75 ou 78°C au condenseur du circuit frigorifique, ensuite, il traverse le chambreur à la même température pendant 15 à 25 secondes, puis il est refroidi rapidement à 5°C dans l'évaporateur.

\* Le compresseur de la machine frigorifique sera entra-

iné par un moteur solaire ou par un moteur électrique alimenté par une batterie de photopiles.

3.2. Système à chauffage et refroidisseur séparés: (système II)

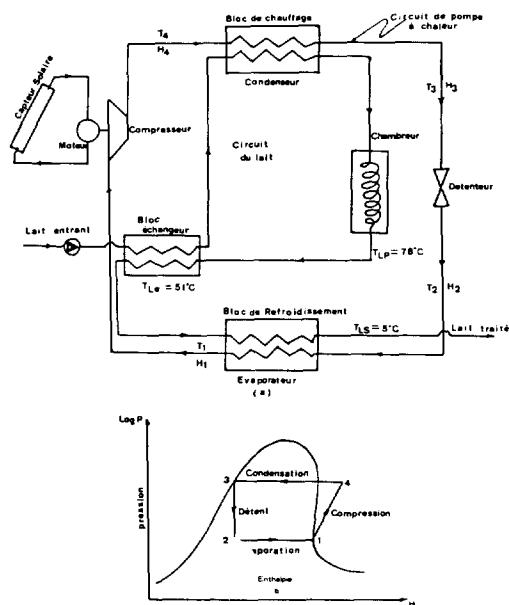


FIGURE I.4-Schéma représentant le principe de fonctionnement (a) et d'équilibre énergétique (b) de l'unité I à pompe à chaleur

Ce système de pasteurisateur se compose de quatre circuits:

- le circuit de chaudière;
- le circuit d'eau froide;
- le circuit du refroidisseur;
- le circuit du lait (voir fig. I-5).

- ① entrée du lait
- ② Pompe de circulation du lait
- ③ échangeur I
- ④ capteur solaire cylindro-parabolique (C.S.C.P.)
- ⑤ Ballon de stockage
- ⑥ chambreur
- ⑦ échangeur II
- ⑧ source d'eau froide
- ⑨ pompe de circulation d'eau froide
- ⑩ échangeur III (évaporateur)

- ⑪ capteur solaire (plan ou panneau de photopile)
- ⑫ moteur
- ⑬ Compresseur
- ⑭ condenseur
- ⑮ détendeur
- ⑯ lait traité

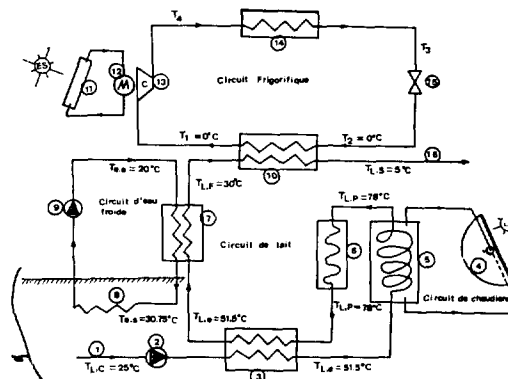


FIGURE I.5-Schéma représentant le principe de fonctionnement du Système II (chauffage et refroidisseur séparés)

\* Fonctionnement du système II:

- Le circuit de lait:

Le lait passe par l'échangeur I où il est préchauffé par le lait sortant du chambreur, ensuite il est chauffé par le circuit de la chaudière.

- Le circuit de chaudière:

Le circuit de chaudière se compose d'un capteur solaire, d'un ballon de stockage et du chambreur. Le lait est chauffé en passant dans le serpentin placé dans le ballon de chaleur, le capteur solaire cylindro-parabolique alimente le ballon en chaleur.

- Le circuit d'eau froide:

L'eau passe par l'échangeur II pour prérefroidir le lait sortant de l'échangeur I, afin de diminuer la puissance à fournir au moteur-compresseur.

- Le circuit de refroidissement:

Le circuit de refroidissement se compose du groupe frigorifique et de l'échangeur de pré-

refroidissement. Le lait est prérefroidi dans les échangeurs I et II et refroidi à l'évaporateur du groupe frigorifique jusqu'à 5°C.

**3.3. Comparaison de la puissance de moteur-compresseur entre les deux systèmes**

Les deux systèmes frigorigifiques, toutes choses égales par ailleurs, peuvent être comparés pour choisir le meilleur au niveau de la puissance des moteurs des compresseurs, puisqu'il est important d'économiser l'énergie.

1) – Calcul de la puissance théorique du moteur  $W_{MI}$  du système I:

$$\eta_c W_{MI} = a (H_4 - H_1) \quad (I.1)$$

donc:

$$W_{MI} = \frac{a (H_4 - H_1)}{\eta_c} = 889.1 \text{ W}$$

où :

- $\eta_c$  : rendement du compresseur
- $H_1$  : enthalpie de  $R_{1,2}$  sortant de l'évaporateur
- $H_4$  : enthalpie de  $R_{1,2}$  sortant du compresseur
- $a$  : débit massique de  $R_{1,2}$
- $W_{MI}$  : Puissance théorique du moteur du système I
- $W_{MII}$  : Puissance théorique du moteur du système II

2) – Calcul de la puissance théorique du moteur  $W_{MII}$  du système II:

$$\eta_c W_{MII} = a (H_4 - H_1) \quad (I.2)$$

donc:

$$W_{MII} = \frac{a (H_4 - H_1)}{\eta_c} = 294.3 \text{ W}$$

**3.4. Choix du meilleur système entre les deux solutions précédentes**

La solution du type pompe à chaleur (système I) semble simple, cependant la puissance théorique du moteur-compresseur est plus grande que celle du système à chauffage et refroidissement séparés (système II)

pour la même dimension de prototype. (Puissance du type pompe à chaleur:  $W_{MI}=880.1 \text{ W}$ ). (Puissance du type chauffage et refroidissement séparés:  $W_{II}=294.3 \text{ W}$ ).

Nous avons donc choisi pour la réalisation du prototype de pasteurisateur le système à chauffage et refroidisseur séparé (système II), comme on le voit sur la figure I-5.

**4. Predimensionnement des Divers Elements de La Maquette De Pasteurisateur A Energie Solaire**

Afin de réaliser une maquette du pasteurisateur et d'en faire les essais, les éléments de la maquette peuvent être prédimensionnés avec le cahier des charges suivant:

- capacité de traitement du lait de 60 l/h:
- utilisation d'énergie solaire comme source de l'énergie :
- appareil transportable au niveau des villages dans les régions tempérées et tropicales;
- appareil autonome:
- appareil simple et économique.

**4.1. Dimensionnement du diamètre de tuyau de circuit du lait**

Le circuit de lait est représenté par le schéma (voir fig. I-5), dans lequel nous avons fixé les températures du lait et de l'eau de refroidissement en différents points du circuit.

L'écoulement du lait dans le circuit doit être turbulent afin d'avoir une bonne répartition des calories dans le lait et éviter les dépôts dans les tubes.

Cette turbulence peut être obtenue, soit par une vitesse suffisante du fluide, soit en insérant dans le circuit des chicanes ou des aubages. Pour la prédétermination de l'appareil, on fixera une valeur de nombre de Reynolds minimale de 5000, en assurant ainsi une bonne turbulence.

La condition de turbulence  $Re \geq 5000$  s'écrit:

$$Re = \frac{4q}{\pi \nu d_i} \geq 5000$$

$$d_i > \frac{4q}{5000 \pi \nu} \quad (I-3)$$

où:  $Re = \frac{V d_i}{\nu}$  : nombre de Reynolds

$V = \frac{4q}{\pi d_i^2}$  : vitesse moyenne del fluide dans le tuyau (m/s)

$\nu$  : viscosité unétique du lait (m<sup>2</sup>/s)

$d_i$  : diamètre interieur du tuyau (mm)

$q$  : débit volumique de lait (m<sup>3</sup>/s)

On peut trouver le diamètre  $d_i$  en fonction de la viscosité cinétique  $\nu$  et du débit du lait  $q$ .  $d_i=f(\nu,q)$ . Et encore la viscosité cinétique du fluide circulant est fonction de la température de ce fluide comme le montre le tableau suivant:

Température (°C)	0	20	40	60	80	100
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	1.79 X 10 <sup>-4</sup>	1.02 X 10 <sup>-4</sup>	0.658 X 10 <sup>-4</sup>	0.475 X 10 <sup>-4</sup>	0.365 X 10 <sup>-4</sup>	0.295 X 10 <sup>-4</sup>

Tableau I - 1 - Viscosité cinétique du lait à la pression de 10<sup>5</sup> pa, ou 1 bar

Par conséquent le diamètre du tuyau est fonction de la température et du débit de ce fluide:

$$d_i = f(T, q) \quad (I-4)$$

On peut tracer les courbes donnant le diamètre interieur du tube en fonction de la température et du debit du lait:

La température de pasteurisation du lait est de 78°C et le debit est de 60 l/h, par conséquent le diamètre de tube peut être déterminé directement sur la fig. I-6. Nous avons donc :

$$d_i = 10 \text{ mm}$$

On peut trouver la vitesse de lait dans le tube

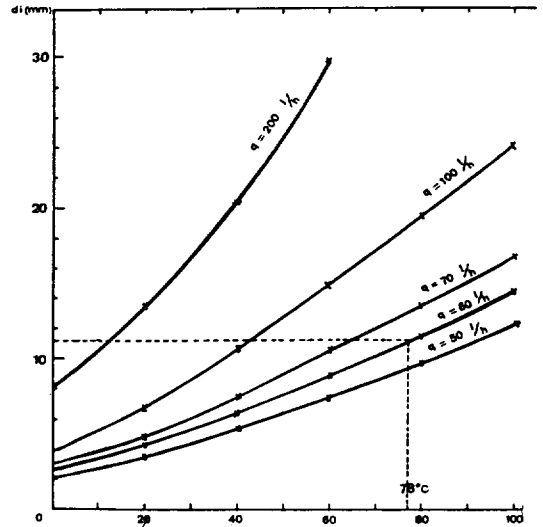


FIGURE I. 6-Courbes donnant le diamètre interieur du tube en fonction de T et de q

avec ce diamètre:

$$V = \frac{4q}{\pi d_i^2} = 0.2124 \text{ m/s}$$

#### 4.2. Prédimensionnement des échangeurs thermiques (échangeurs I et II)

Il y a principalement deux types d'appareils dans l'industrie de pasteurisation:

- les échangeurs a plaques:
- les échangeurs tubulaires:

On a choisi l'échangeur a faisceau tubulaire à simple passage de tubes et calandre (voir fig. I-7) pour la réalisation de la maquette de pasteurisateur. Par la suite, on utilisera l'échangeur a plaques pour le prototype de pasteurisateur de lait.

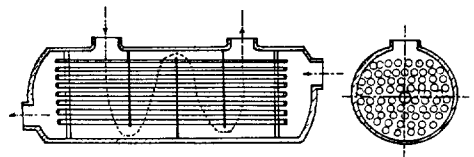


FIGURE I. 7-Schéma de l'échangeur à faisceau tubulaire et de l'écoulement dans une calandre et les tubes.

**1) Détermination du coefficient d'échange global, échangeur à faisceau tubulaire K**

La méthode de KERN peut être utilisée pour déterminer le coefficient d'échange global K en fonction de débit du fluide et de longueur d'échangeur L.

Les dimensions nécessaires des autres composants de l'échangeur sont données pour déterminer le coefficient global K, par conséquent la surface nécessaire de l'échangeur sera fonction de la longueur unitaire des tubes L.

Le coefficient d'échange global d'échangeur à faisceau tubulaire peut être écrit comme suit:

$$K = \frac{10^4}{7.8 \cdot \left(\frac{\dot{m}Li}{L}\right)^{-1/3} + 12.78 \left(\frac{\dot{m}Li}{L}\right)^{-1/3} + 9.9} \quad (I.5)$$

ou:

**K** : coefficient global d'échange pour l'échangeur à faisceau tubulaire ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ).

$r = \frac{\dot{m}Le}{\dot{m}L}$  rapport entre le débit dans la calandre et celui dans les tubes.

Le coefficient global d'échange K se présente sur la figure I-8 suivante.

**2) Détermination de la surface nécessaire d'échangeur**

$$S_t = \frac{\dot{Q}}{K \cdot \Delta T_{log}}$$

ou:

$S_t$  : surface nécessaire de l'échangeur ( $m^2$ )

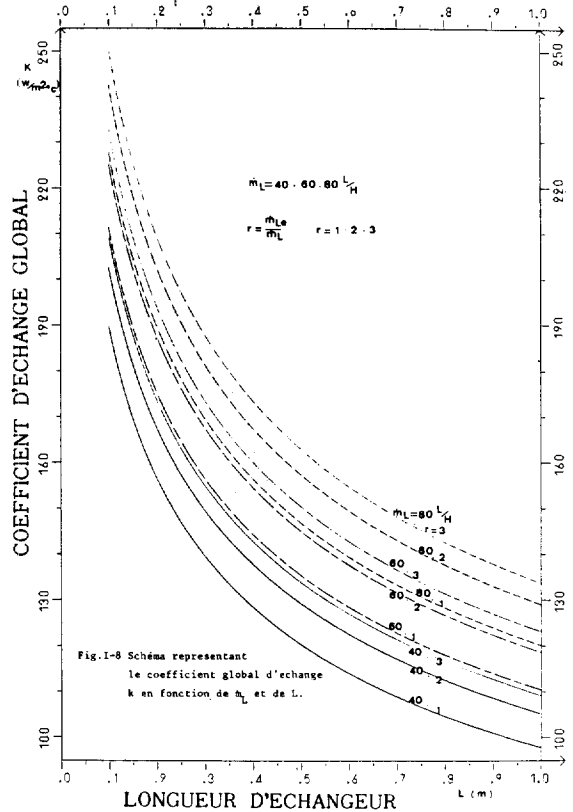
$\dot{Q}$  : puissance thermique échangée dans l'échangeur à tubulaire (W)

$$\Delta T_{log} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_e}{\Delta T_s}} \quad (^\circ C)$$

**3) Prédimensionnement de l'échangeur I**

L'échangeur I est un récupérateur de chaleur: le lait cru est réchauffé par le lait pasteurisé sortant du chambreur.

La dimension de l'échangeur I peut être déterminée à partir de la figure I-8 et de l'équation (I-6) avec les conditions données:



**Fig. I-8 Schéma représentant le coefficient global d'échange k en fonction de  $m_L$  et de L.**

ou:

$T_{L.P}$  : température du lait chauffé par le circuit de chaudière ( $^\circ C$ )

$T_{L.C}$  : température du lait cru ( $^\circ C$ )

$T_{L.E}$  : température du lait sortant de l'échangeur I

donc :

$$S_{II} = 0.54 \text{ m}^2$$

### 4.3. Prédimensionnement de l'évaporation (échangeur III)

Le lait chauffé est prérefroidi respectivement dans le circuit de chaudière et dans les échangeurs I et II puis refroidi définitivement dans l'évaporateur (échangeur III) du groupe frigorifique. (cf. 2).

On a choisi un échangeur de type coaxial comme évaporateur (échangeur III).

Le dimensionnement est directement déduit de la puissance thermique échangée. On le calcul comme suit:

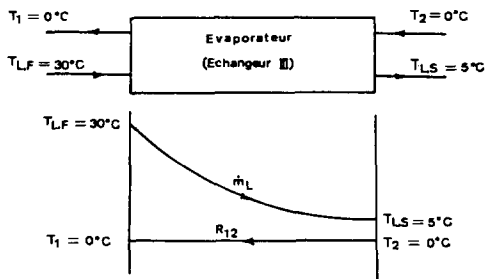


Fig. I.11. Phénomène d'évolution des températures du lait dans l'évaporateur (échangeur III)

$$\dot{Q}_{III} = \dot{m}_L \text{ cp } (T_{L.F} - T_{L.S}) = a L_V (T_2) \quad (I-7)$$

$$Q_{III} = 1742 \text{ W} = 1501.6 \text{ Kcal/h}$$

Remarque: En l'absence du circuit de prérefroidissement par l'eau froide, la puissance thermique de l'évaporateur est augmentée.

$$\dot{Q}_{III} = \dot{m}_L \text{ cp } (T_{L.e} - T_{L.S})$$

$$Q_{III} = 3240.15 \text{ W} = 2793 \text{ Kcal/h}$$

En effet, ce circuit de prérefroidissement permet d'économiser environ la moitié de la puissance de l'évaporateur.

où:

$Q_{III}$  : puissance nécessaire de l'évaporation (W)

$\dot{Q}_{III}$  : puissance nécessaire de l'évaporateur sans le circuit de prérefroidissement (W)

$T_{L.S}$  : température du lait pasteurisé (°C)

$L_V$  : chaleur latente de vaporisation de  $R_{12}$

$a$  : débit de  $R_{12}$

### 4.4. Prédimensionnement du chambreur

Le rôle est de maintenir chaque particule du lait à la température de pasteurisation (75 à 78°C) pendant le temps nécessaire (15 à 25 secondes).

- Calcul de longueur du chambreur

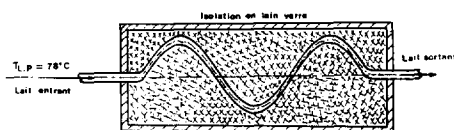


Fig. I.12. Forme de chambreur

$$\dot{m}_L = \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot V_c \quad (I-8)$$

$$l = V_c \cdot t$$

donc:

$$l = \frac{4 \dot{m}_L}{\pi d_c^2} \cdot t \cong 3.2 \text{ m}$$

où:

$l$  : longueur de serpentin du chambreur

$V_c$  : vitesse d'écoulement du lait dans le serpentin

$d_c$  : diamètre du tube du chambreur

$\dot{m}_L$  : débit du lait

$t$  : durée nécessaire

### 4.5. Le circuit frigorifique

Le circuit frigorifique du type à compression se compose au minimum des 4 éléments suivants:

- 1 compresseur :
- 1 condenseur :



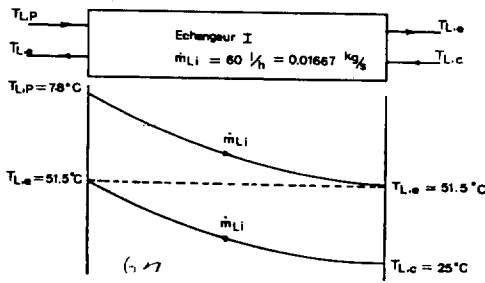


Fig. I.9. Phénomène d'évaluation des températures du lait dans l'échangeur I.

$\dot{m}_{Li}$  : débit du lait dans les tubes

$\dot{m}_{Le}$  : débit de fluide dans la calandre

- Détermination du coefficient global d'échangeur I  $K_I$

Le coefficient global d'échangeur I peut être déterminé à partir de la figure I-8 avec  $\dot{m}_{Li} = 60$  l/h :

$$K_I = 160 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$$

- Calcul de la surface  $S_I$  :

A partir de l'équation (I-6)

$$S_I = \frac{P_I}{K_I \Delta T}$$

$$\Delta T = 26.5^\circ \text{C}$$

$$\dot{Q}_I = \dot{m}_{Li} \text{ cp } \Delta T = 0.01667 \times 4180 \times 26.5 = \underline{1846.54 \text{ W}}$$

donc :

$$S_t = 0.436 \text{ m}^2$$

#### 4) Prédimensionnement de l'échangeur II

Le lait sortant de l'échangeur I est prérefroidi par le circuit d'eau froide dans l'échangeur II afin de diminuer la puissance du groupe frigorifique.

La dimension de l'échangeur II peut être aussi déterminée sur la figure I-8 et par l'équation (I-6) avec les conditions données:

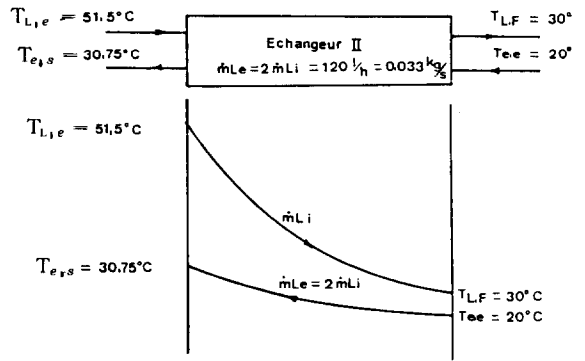


Fig. I.10. Phénomène d'évaluation des températures du lait dans l'échangeur II.

où:

$T_{e.e}$  : température de l'eau froide entrant dans l'échangeur II ( $^\circ \text{C}$ )

$T_{e.S}$  : température de l'eau sortant de l'échangeur II ( $^\circ \text{C}$ )

$T_{L.F}$  : température du lait prérefroidi dans l'échangeur II ( $^\circ \text{C}$ )

$\dot{Q}_{II}$  : puissance nécessaire de l'échangeur II

- Détermination du coefficient global de l'échangeur II  $K_{II}$

Le coefficient global de l'échangeur II peut être déterminé sur la figure 1.8 avec  $\dot{m}_{Li} = 60$  l/h et  $\dot{m}_{Le} = 2 \dot{m}_{Li}$  :

$$K_{II} = 188 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$$

- Calcul de la surface de l'échangeur II,  $S_{II}$

A partir de l'équation (I-6), il vient:

$$S_{II} = \frac{\dot{Q}_{II}}{K_{II} \Delta T_{log}} = \frac{1498.133}{188 \times 14.73} = 0.54 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{II} = \dot{m}_{Li} \text{ cp } \Delta T = 0.01667 \times 4180 \times 21.5 = 1498.133 \text{ W}$$

$$\Delta T_{log} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_e}{\Delta T_s}} = \frac{10.75}{\ln \frac{20.75}{10}} = \frac{10.75}{0.73} = 14.73^\circ \text{C}$$

- 1 détenteur :
- 1 évaporateur.

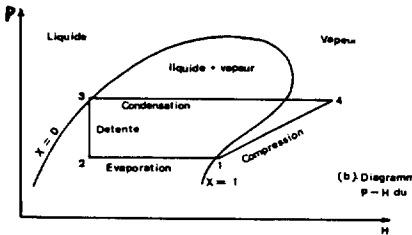
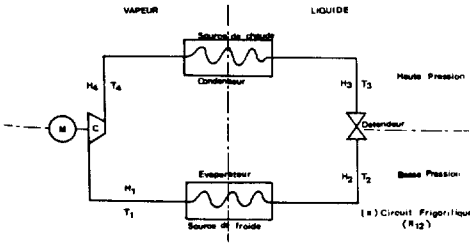


Fig. I.13. (a) (b) Circuit Frigorifique

La puissance théorique du moteur-compresseur, du condenseur et de l'évaporateur peuvent être déterminés afin de refroidir le lait entrant à une température  $T_{L,F}$  jusqu'à la température  $T_{L,S} = 5^\circ\text{C}$  à la sortie de l'évaporateur.

1) Débit massique de fréon 12 à l'évaporateur (échangeur III)

$$\dot{Q}_{III} = \dot{m}_L cp (T_{L,F} - T_{L,S}) = \eta_E a (H_1 - H_2) \text{ (cf. fig I.13)}$$

donc:

$$a = \frac{\dot{m}_L cp (T_{L,F} - T_{L,S})}{\eta_E (H_1 - H_2)} \quad (I-8)$$

où:

- $\eta_E$  : rendement de l'évaporateur
- a : débit massique de fréon 12 (kg/s)
- $H_1$  : enthalpie (à  $T_s = 0^\circ\text{C}$  et  $X = 0$ ,  $H_1 = 137$  Kcal/kg)
- $H_2$  : enthalpie de  $R_{1,2}$  sortant du détenteur
- $H_3$  : enthalpie de  $R_{1,2}$  sortant du condenseur (Kcal/kg)

Une relation entre  $H_2$  et  $T_4$  peut être déterminée par le diagramme de Mollier pour  $R_{1,2}$ . Dans ce système

frigorifique on peut écrire:

$$T_3 = T_4, \text{ et } H_3 = H_2$$

Tableau I.2. Relation entre  $H_2$  et  $T_4$

$T_4$ ( $^\circ\text{C}$ )	0	10	20	30	40	50	60	70
$H_2$ (Kcal/kg)	100	102.3	104.6	107.0	109.5	112.0	114.6	117.2

On peut trouver la relation  $H_2 = f(T_4)$  à partir du tableau I-2 avec une bonne approximation, il s'agit d'une fonction lineaire, soit donc:

$$H_2 = 0.2433 T_4 + 99.7 \quad (I-9)$$

En substituant l'équation (I-9) à l'équation (I-8), on aboutit à:

$$a = \frac{16.67 \times 10^{-2} (T_{L,F} - 5)}{\eta_E (37.3 - 0.2433 T_4)} \quad (I-10)$$

2) Puissance théorique du moteur-compresseur

$$W_{Mthé} = \frac{a (h_4 - H_1)}{\eta_C} \quad (I.11)$$

En substituant l'équation (I-10) à l'équation (I-11), on aboutit à:

$$W_{Mthé} = \frac{16.67 \times 10^{-3} (T_{L,F} - 5) (H_4 - H_1) cp}{\eta_C \eta_E (37.3 - 0.2433 T_4)} \quad (I.12)$$

$W_M$  est fonction de  $T_{L,F}$  et de la température de condensation  $T_4$ , dépendant de la température ambiante.

Une relation entre  $H_4$  et  $T_4$  peut être établie par le diagramme de Mollier pour  $R_{1,2}$ .

La relation entre  $H_4$  et  $T_4$  est une fonction

linéaire:

$$H_4 = 0.0082 T_4 + 137.65 \quad (I.13)$$

En substituant l'équation (I-13) à (I-12):

Tableau I.3. Relation entre  $H_4$  et  $T_4$

$T_4$ (°C)	0	10	20	30	40	50	60
$H_4$ (Kcal/kg)	135.7	135.82	139.2	140.15	140.9	141.8	142.4

$$W_{Mthé} = \frac{16.67 \times 10^{-3} (T_{L,F} - 5) (0.082 T_4 + 0.65) \times 4180}{\eta_c \eta_E (37.3 - 0.2433 T_4)} \quad (W) \quad (I-14)$$

En effet, la puissance du moteur  $W_M$  est fonction de  $T_{L,F}$  et de  $T_4$  (cf. ann. 1.7).

3) Puissance à évacuer au condenseur  $\dot{Q}_{CO}$

$$\dot{Q}_{CO} = \eta_{CO} a (H_4 - H_3) \quad (I.15)$$

(cf. fig. I-13)

En substituant les equations (I.9), (I.10) et (I.13) à l'équation (I.15):

$$\dot{Q}_{CO} = \frac{\eta_{CO} \times 15.67 \times 10^{-3} (T_{L,F} - 5) (37.95 - 0.1613 T_4) \times 4180}{\eta_E (37.3 - 0.2433 T_4)} \quad (I.16)$$

où:

$\dot{Q}_{CO}$ : puissance à évacuer au condenseur (W)

$\eta_{CO}$ : rendement du condenseur

La puissance au condenseur est aussi fonction de  $T_{L,F}$  et  $T_4$

#### 4.6. Captage de l'énergie solaire

On utilise l'énergie solaire de deux manières:

- \* capteur solaire cylindro-parabolique dans le circuit de chaudière pour chauffer le lait:
- \* panneau photovoltaïque dans le circuit frigorifique pour entrainer le moteur-compresseur.

1) Détermination de la surface du capteur solaire cylindro-parabolique (C.S.C.P.)  $A_c$

On a utilisé un capteur solaire à concentration cylindro-parabolique dans le circuit de chaudière (voir fig. I.14)

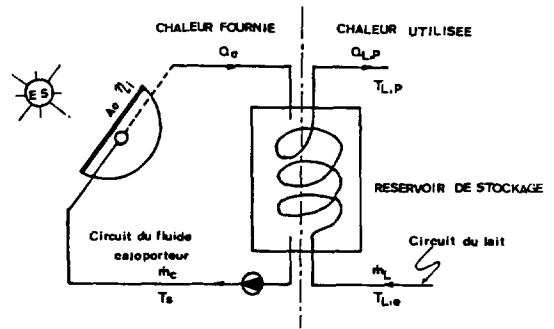


Fig. I.14. Schéma représentant le circuit de chaudière pour chauffer le lait.

Le circuit de chaudière peut être divisé en deux parties:

- \* une partie qui fournit de la chaleur par le capteur solaire:
- \* une partie qui utilise de la chaleur pour chauffer le lait.

On peut déterminer globalement la surface du capteur solaire  $A_c$  à partir du bilan thermique entre deux parties ci-dessus:

– énergie thermique fournie par le capteur solaire  $\dot{Q}_c$ :

$$\dot{Q}_c = 2\eta ES_{\max} \frac{\Delta t_j}{\pi} \times A_c \quad (I.17)$$

dans laquelle le terme  $2ES_{\max} \frac{\Delta t_j}{\pi}$  est l'énergie solaire recue, par la surface unitaire du capteur solaire pendant 10 heures (de 7 à 17 heures solaires vraies). On le calcule comme suit:

$$\int_0^{10} ES_{\max} \sin \frac{\pi t}{\Delta t_j} dt = 2 ES_{\max} \frac{\Delta t_j}{\pi}$$

ou:  
 $ES_i = ES_{\max} \sin \frac{\pi T}{\Delta t_j}$  : intensité rayonnement solaire (W)

$ES_{\max}$  : intensité rayonnement solaire maximal (W)

$\Delta t_j$  : heures d'ensoleillement par journée (h)

$t$  : temps (heure)

$t_{L.P}$  : durée de pasteurisation du lait

$A_c$  : surface du C.S.C.P.

- Energie thermique utilisée pour chauffer le lait  $Q_{L.P}$ .

$$Q_{L.P} = \dot{m}_{L.P} (T_{L.P} - T_{L.e}) \times t_{L.P} \quad (I.18)$$

On peut écrire l'équation suivante à partir des équations (I.17) et (I.18).

$$2\eta ES_{\max} \frac{\Delta t_j}{\pi} \times A_c = \dot{m}_{L.P} (T_{L.P} - T_{L.e}) \times t_{L.P}$$

nous avons donc:

$$A_c = \frac{\dot{m}_{L.P} (T_{L.P} - T_{L.e}) \times t_{L.P}}{2\eta ES_{\max} \frac{\Delta t_j}{\pi}}$$

$$A_c = 5 \text{ m}^2$$

2) Détermination de la courbe parabolique du C.S.

C.P.

- Expression de l'équation de la parabole

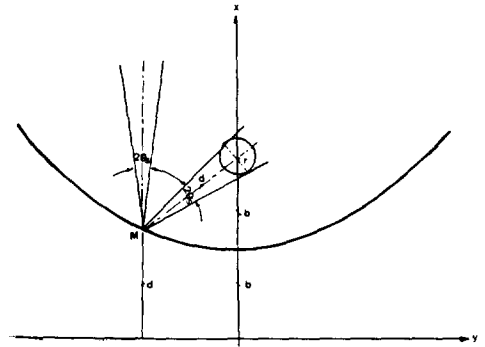


Fig. I-15. Representation d'une courbe du profil de C.S.C.P.

On peut dériver l'équation de la parabole de la fig. I.15, au point M, une relation peut être déterminée comme suit:

$$d^2 = y^2 + (2b - d)^2$$

$$d = x = \frac{y^2}{4b} + b \quad (I.19)$$

- Expression de la concentration géométrique:cg  
 Le diamètre de l'image focale peut être déterminé par l'expression suivante:

$$De = 2\gamma$$

dans laquelle  $\gamma = d \sin \theta_s$

donc on peut écrire:

$$De = 2 d \sin \theta_s \quad (I.20)$$

En substituant l'équation (I.19) à l'équation (I.20);

$$De = 2 \left( \frac{y^2}{4b} + b \right) \sin \theta_s$$

donc:

$$c_g = \frac{1}{\pi D_e} = \frac{1}{2\pi \left(\frac{b^2}{4b} + b\right) \sin \theta_s} \quad (I.21)$$

– Détermination du diamètre de tube focal:  $d_f$

La concentration géométrique  $c_g$  doit être  $10 \leq c_g \leq 25$  puisque le diamètre de tube focal dépend du demi-angle solaire après la réflexion.

On va déterminer ici deux dimensionnements du diamètre de tube focal avec  $c_{g_1} = 23$  et  $c_{g_2} = 10$  et  $\ell = 1$  m

Nous avons donc: (à partir de l'équation (I.21):

$$* D_{e1} = \frac{1}{\pi c_{g_1}} = \frac{1}{3.14 \times 23} \simeq 14 \text{ mm}$$

$$* D_{e2} = \frac{1}{\pi c_{g_2}} = \frac{1}{3.14 \times 10} \simeq 32 \text{ mm}$$

où:

- $\theta_s$  : demi-angle solaire ( $16' = 0.2667^\circ$ )
- $b$  : distance focale (m)
- $D_e$  : diamètre extérieur du tube focal (m)
- $c_g$  : concentration géométrique
- $\ell$  : largeur du capteur solaire (C.S.C.P.) (m)

– Réalisation de la courbe parabolique réelle

Une seule courbe parabolique réelle peut être réalisée avec  $b = -0.25$ m et  $\ell = 1$  m à partir de l'équation (I.19).

3) Détermination de la surface du panneau photovoltaïque

\* Généralités sur le générateur photovoltaïque

Le module photovoltaïque est un dispositif entièrement statique transformant directement la lumière du soleil en électricité (courant continu). Grâce à l'utilisation de la seule énergie solaire, il est totalement

autonome, silencieux et non polluant. Cependant, les aléas climatiques imposent presque toujours l'utilisation, d'un stockage "tampon" (batteries) entre module solaire et utilisation, afin de fournir de l'électricité avec suffisamment de régularité.

Un générateur solaire comprend donc:

- un module photovoltaïque précalibré:
- une charpente support inclinable:
- un régulateur de charge/décharge des batteries:
- des batteries.

\* Calcul de l'énergie fournie par la surface unitaire du panneau photovoltaïque

On a choisi le module photovoltaïque de FRANCE-PHOTON pour l'alimentation électrique du moteur-compresseur du système frigorifique et des pompes de circulation dans le système de pasteurisation.

Les caractéristiques générales sont:

F.P.C. 144V

- puissance crête : 132 W\*:
- 4 modules FPC 36 V:
- 144 cellules carrées (85 x 85):
- tensions nominales 16 et 32 volts:
- poids 21 kg:
- dimension 1075 x 1075.

\* : sous ES = 1000 W/m<sup>2</sup> et à une température de jonction de 25°C.

Le rendement crête du panneau photovoltaïque peut être calculé avec les caractéristiques générales:

- puissance de photopile par la surface unitaire:

$$P_{\text{photo}} = \frac{132}{1.075 \times 1.075} = 114.2 \text{ W/m}^2$$

- rendement maxi de photopile  $\eta_{\text{photo}}$ :

$$\eta_{\text{photo}} = \frac{P_{\text{photo}}}{EX_{\text{max}}} = \frac{114.2}{1000} = 0.1142 = 11.4\%$$

- le rendement réel peut être supposé:

$$\eta_r = 8 \sim 10\%$$

L'énergie solaire totale arrivant à la surface unitaire

du panneau photovoltaïque pendant une journée (10 heures):

$$Q_T = ES_{\max} \int_0^{10} \sin \frac{\pi \cdot t}{\Delta t_j} dt = 2ES_{\max} \frac{\Delta t_j}{\pi} \dots (I.22)$$

L'énergie électrique fournie par le panneau photovoltaïque pendant une Journée (10 heures):

$$Q_{\text{photo}} = \eta_r O_T = 2\eta_r ES_{\max} \frac{\Delta t_j}{\pi} \quad (I.23)$$

$Q_{\text{photo}} = 509.55 \text{ Wh/m}^2$

\* Energie globale nécessaire en électricité dans le système de pasteurisation:  $Q_{T,E}$

Puissance du moteur-compresseur réelle sur le groupe frigorifique:  $W_{Mr}$

$$W_{Mr} = \frac{W_{M\text{thé}}}{\eta_{mo}\eta_{com}} \quad (I.24)$$

Puissance globale du groupe frigorifique

$$P_{fr} = W_{Mr} + P_{MW}$$

Puissance nécessaire réelle des pompes de circulation:

On a utilisé deux pompes de circulation dans le circuit du lait et dans le circuit de chaudière.

\* Perte de charge dans le circuit du lait

$$\Delta h_L = (1.5 + \lambda \frac{L_L}{d_i}) \frac{V^2 L}{2g}$$

$$\Delta h_L = 0.217 \text{ m}$$

$\Delta H_L = 2\text{ m}$  (différente hauteur entre l'entrée et la sortie)

$$P_{\text{pompe L}} = 1.0 \text{ W}$$

\* Perte de charge dans le circuit de chaudière

$$\Delta h_C = (1.5 + \lambda \frac{L_C}{d_i}) \frac{V^2 C}{2g}$$

$$\Delta h_c = 0.02 \text{ m}$$

$\Delta H_c = 2.2 \text{ m}$  (différente hauteur entre l'entrée et la sortie)

$$P_{\text{pompe C}} = 1.22 \text{ W}$$

– Energie globale nécessaire en électricité pendant 5 heures du travail par jour

$$O_{T,E} = (W_{Mr} + P_{M.V} + P_{\text{pompe L}} + P_{\text{pompe C}}) \times 5\text{h} \\ = (1095.8 + 18 + 0.724 + 1.22) \times 5 = 5578.6 \text{ (Wh)} \quad (I.25)$$

– Surface nécessaire du panneau photovoltaïque

On peut déterminer la surface nécessaire du panneau photovoltaïque avec les équations (I-23) et (I-25) comme suit;

$$Q_{\text{photo}} \times A_p = Q_{T,E}$$

donc:

$$A_p = \frac{Q_{T,E}}{Q_{\text{photo}}} = \frac{5578.6 \text{ (Wh)}}{509.55 \text{ (Wh/m}^2)} = 10.95 \text{ m}^2$$

nous avons donc:

$A_p = 11 \text{ m}^2$

où:

$\eta_{\text{photo}}$  : rendement maximal du panneau photovoltaïque de FRANCE-PHOTON

$\eta_r$  : rendement réel du panneau photovoltaïque de FRANCE-PHOTON

$\eta_{mo}$  : rendement du moteur dans le frigo

$\eta_{com}$  : rendement du compresseur dans le frigo

$Q_T$  : énergie solaire total sur le panneau photovoltaïque pendant une journée par  $\text{m}^2$  (Wh/ $\text{m}^2$ )

$Q_{\text{photo}}$  : énergie électrique fournie par le panneau photovoltaïque pendant une journée par  $\text{m}^2$  (Wh/ $\text{m}^2$ )

$\Delta t_j$  : durée de la journée d'ensoleillement (10 heures) (h)

$ES_{\max}$  : intensité de rayonnement solaire au zénith

- (W/m<sup>2</sup>)
- $W_{Mthé}$  : puissance théorique du moteur-compresseur (W)
- $W_{Mr}$  : puissance réelle du moteur-compresseur (W)
- $P_{M.V}$  : puissance du moteur du ventilateur (W)
- $P_{fr}$  : puissance globale de groupe frigorifique (W)
- $\Delta h_L$  : perte de charge dans le circuit de lait (m)
- $\Delta h_c$  : perte de charge dans le circuit de chaudière (m)
- $P_{pompe L}$  : puissance de la pompe de circulation dans le circuit de lait (W)
- $P_{pompe C}$  : puissance de la pompe de circulation dans le circuit de chaudière (W)
- $A_p$  : surface nécessaire du panneau photovoltaïque (m<sup>2</sup>)

où :

- ① réservoir de lait
- ② Échangeur I
- ③ C.S.C.P.
- ④ chambreur
- ⑤ ballon de stockage (chauffage)
- ⑥ échangeur II
- ⑦ échangeur III (évaporateur)
- ⑧ pompe de circulation du lait
- ⑨ pompe de circulation du fluide caloporteur du capteur solaire
- ⑩ thermostat antigel

1) Fonction du système de régulation automatique  
(cf. I.16)

Ce système de régulation est rendu nécessaire par :

- l'irrégularité de l'intensité du rayonnement solaire :
- les caractéristiques de pasteurisation qui doivent être assurées dans le circuit de chaudière

Comme le lait doit être chauffé à 78°C, on fait varier le débit de lait en fonction de l'ensoleillement.

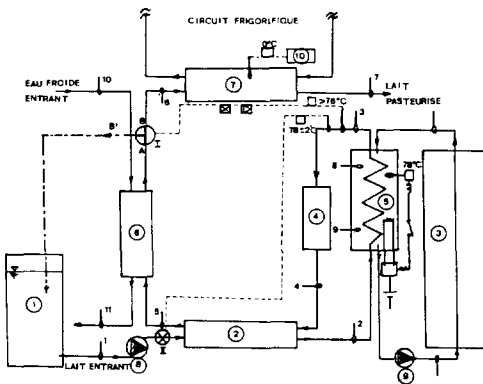
\* Vanne thermostatique

Nous avons choisi d'insérer dans le circuit, après la pompe, une vanne thermostatique reliée à une sonde de température placée à la sortie du chauffage pour réguler la variation de température de pasteurisation du lait  $T_{L,P} = 78 \pm 2^\circ C$ .

La vanne thermostatique introduira dans le circuit une perte de charge par la diminution de la section du tube, par conséquent le débit du lait sera diminué en fonction de la température du lait à la sortie du chauffage.

Lorsque la température de  $T_{L,P}$  sera inférieure à 78°C, la section de la vanne sera réduite en diminuant ainsi le débit jusqu'à ce que  $T_{L,P}$  redevienne supérieure ou égale à 78°C.

Lorsque la température de  $T_{L,P}$  sera supérieure à 78°C, la section de la vanne sera augmentée, en augmentant ainsi le débit jusqu'à ce que  $T_{L,P}$  redevienne



4-7. Systeme de regulation du pasteurisateur

- ⊕ Electrovanne a trois voies
- ⊗ Vanne thermostatique
- ⊠ Retardateur
- ▣ Regulateur de temperature
- Liaison entre sonde de temp. et nanne
- - - - - Circuit de reechage
- Thermometre
- Sonole de L'enregistreur de temp.
- ⊙ Thermostat.

Fig. I - 16 Schéma général du système de régulation dans le pasteurisateur

égale a 78°C.

Dans ces conditions, cette variation du débit peut aussi contrôler la température de chauffage (voir fig. I.16) De plus, l'échangeur-recupérateur I joue un rôle de régulation.

\* Electrovanne à trois voies

On a prévu, lors d'une diminution subite du rayonnement solaire (passage d'un nuage), d'isoler le lait n'ayant pas subi un traitement thermique suffisant.

Dans ce cas,  $T_{L.P} \leq 76^\circ C$ , pour éliminer la fraction du lait incorrectement traitée, on a choisi de placer dans le circuit du lait une électrovanne à trois voies à la sortie de l'échangeur II, afin de recycler le lait dans la cuve d'entrée (voir fig. I.16).

Lorsque  $T_{L.P}$  est inférieure à 76°C, l'électrovanne est commandée par une sonde de température placée à la sortie du chauffage. La temporisation entre la sonde de température et la vanne est nécessaire pour éliminer la fraction de lait incorrectement traitée qui est restée entre le chambreur et l'échangeur II.

Donc le circuit A-B est fermé et le circuit AB' est ouvert avec la temporisation, et inversement, le fonctionnement détaillé est expliqué sur le schéma

électrique d'automatisme (voir fig. I.17).

\* Résistance électrique de chauffage

On a prévu, lorsque le capteur solaire ne fournit pas suffisamment d'énergie à cause du climat, d'utiliser une résistance électrique pour maintenir la température de chauffage de 78°C, afin de continuer la pasteurisation du lait.

Le groupe frigorifique fonctionne à l'aide des batteries tampon, alimentées par les photopiles.

5. Conclusion

La crise pétrolière de 1974 a entraîné dans les pays industrialisés des recherches sur l'exploitation de l'énergie solaire pour diminuer leur dépendance pétrolière.

Ces recherches sont également favorables aux pays en voie de développement qui sont très bien ensoleillés.

Le projet de pasteurisateur à énergie solaire entre dans ce cadre.

Les résultats de l'étude sur Composition de circuits d'une maquette de pasteurisateur du lait à énergie solaire se resument ainsi;

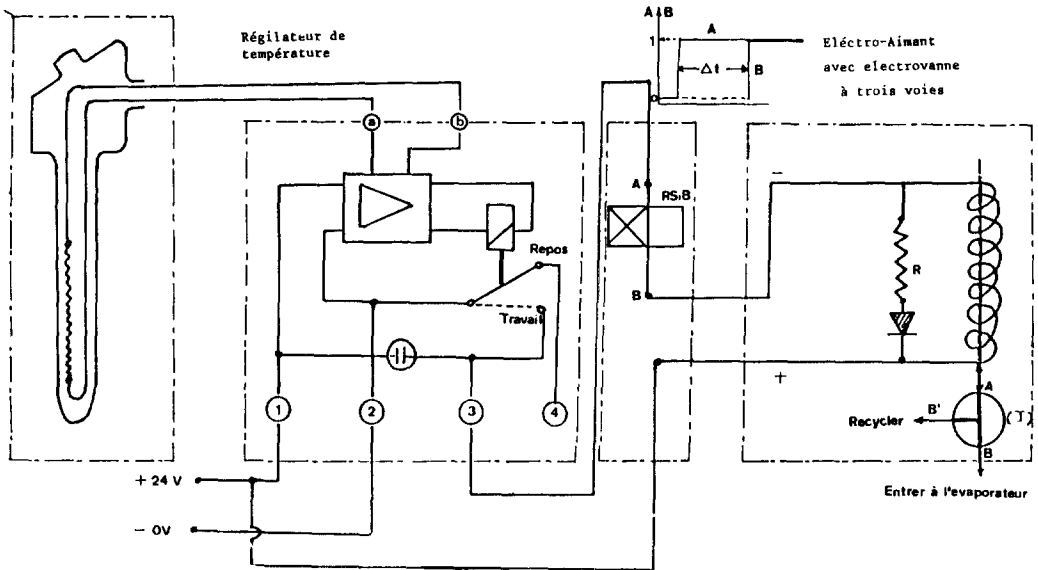


Fig. I-17. Schéma d'électrique de comande de l'électrovanne trois voies (I).



- 1) Le système de pasteurisation du lait est constitué de quatre circuits:
  - le circuit du lait;
  - le circuit de la chaudière;
  - le circuit de prérefroidissement;
  - le circuit frigorifique.
- 2) Tous les composants du système sont prédimensionnés selon les conditions de pasteurisation du lait (débit de lait de 60 l/h, température haute 78°C avec un maintien de 15 à 25 secondes et une température basse de 5°C).
- 3) Le système de régulation de la température est installé dans le système de pasteurisation du lait pour bien assurer la pasteurisation du lait.

### BIBLIOGRAPHE

Etude du système de pasteurisateur du lait en utilisant l'énergie solaire

1. ALAIS C. 1965, Science du lait, principe des techniques laitières. Ed. Sept. Paris.
2. BERNIER J. 1979. La pompe à chaleur-mode d'emploi, Tome 1 Pyc. Ed.
3. DAUDON, NGUYEN, DUCHAMP et DELAUNAY 1979. PFE ENSAM, Pasteurisateur solaire: conception d'un capteur solaire à concentration
4. GALLOT-LAVALLEE T. 1979. DEA ENSIA, Evaluation des coefficients de transfert de chaleur dans un échangeur tubulaire.
5. GORDON K.P., HANINSON D.J., CARVER C.E. Deposition of milks solids on heated surfaces J. dairy Sc. Vol. 51, n° 4.
6. PANDEY MM. ET GUPTA CP. 1979. Pasteurisation of milk by solar energy CNRS Paris pp.2167-2170.
7. BERNARD, MENGUY G. SCHWARTZ M. 1980. Le rayonnement solaire 9 (conversion thermique et applications) Technique et documentation, pp.1-90 paris.