



UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR
UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIES
MASTER PHYSIQUE ET APPLICATIONS

Mémoire présenté par :
Aïta DIONE
Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER en Sciences et Technologies
Mention Physique et Applications
Specialité Physique des Materiaux
Option Energie solaire

ETUDE DE FAISABILITE D'UN SYSTEME SOLAIRE POUR LA
PASTEURISATION DES JUS DE FRUITS (POMME DE CAJOU) :
CONCEPTION ET SIMULATION

Soutenu publiquement le 21/12/2021 devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
NDIAYE Lat Grand	Professeur Titulaire	Président jury	UASZ
DIATTA Joseph Sambasene	Maitre-Assistant	Rapporteur	UASZ
SY Mouhamadou	Assistant	Examineur	UASZ
DRAME Omar	Docteur	Invité	CERER/UCAD
THIAO Serigne	Assistant	Encadreurs	UASZ
KOBOR Diouma	Professeur Titulaire		UASZ

Abstract.

Pasteurization is a process of food preservation which consists in heating them at a given temperature during a well determined duration before a sudden cooling, in order to eliminate a good number of micro-organisms.

In this study, we worked with CERER (Center for Studies and Research on Renewable Energies) where we carried out the design of a **solar pasteurizer** (which involves dimensioning and 3D modeling), using a low-cost solar water heating technology. This device is intended to pasteurize fruit juices for industries as well as for rural and urban consumers. With an output of 100 L/h, this machine will be entirely made of stainless steel, taking into account the food safety standards and it will be independent of electrical energy for its operation with the possibility of **thermal storage**.

It is a question of proposing a solution based on solar technology, so that it is substituted for gas (butane) or electricity, currently used for pasteurization in **Agro-industry**. This technology is that of the solar water heaters, which will produce hot water necessary for the pasteurization.

Four cases of studies were carried out under the same conditions of operation (flow, temperature, volume, section of passage of the juice), namely:

- two coaxial cylinders with juice flowing inside and hot water flowing outside and vice versa ;
- A cylinder and a coil where the juice circulates inside the coil and the **hot water** outside and vice versa.

A numerical simulation program has been developed on Ansys Fluent 2020 R1 to study the evolution of the juice temperature through our **exchange surface**. The case where the juice flows through the coil offers more satisfactory results. It is much more accessible than the others with a global heat exchange coefficient $U = 901,57 \text{ W/m}^2\text{K}$. It is the only one that respects the order of magnitude of the global coefficients of the fluids according to their viscosities. Moreover the results of the simulation show that the temperature of exit of the juice can reach 83 °C. This means that our pasteurizer respects the nutritional standards well because beyond 90 °C one attacks the chemical integrity of certain elements of the food. The manufacturing cost (in appendix) of this pasteurizer is 2915750 FCFA for an estimated life span of 10 years.

Keywords: Agro-industry; hot water; solar pasteurizer; thermal storage; exchange surface.

DEDICACES

Je dédie ce travail

A Mon Père qui a sacrifié toute sa vie pour la réussite de ses enfants et à qui, j'aimerai voir fier des valeurs qu'il a inculqué à ses enfants.

A ma Mère qui s'est toujours sacrifiée pour qu'on ne manque de rien.

A tous mes frères et sœurs pour leur amour, leur aide, leurs conseils, leurs encouragements et leurs prières.

A mon oncle, le professeur Youssou FAYE, pour l'accompagnement depuis mes premiers pas à l'UASZ.

A mon oncle, le docteur Issa FAYE, pour ses conseils et motivations.

A mes amis : Marie SOW, Arame MBOUP, Ndeye.A DIOP, Khadi SARR, Oumar TALLA, Etienne.M BASSE, Fatoumata KONTE et plus particulièrement à Diouma CISSE, pour cette belle et sincère amitié qu'ils ont tous voués à mon égard.

A tous les professeurs et camarades de promotion de l'UASZ ainsi qu'à tout le personnel admiratif et technique du CERER.

Et à tous ceux que ma plume a oubliés.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements au Docteur **Serigne THIAO**, pour avoir accepté de diriger ce travail en tant que Co-Directeur. Je le remercie pour ces multitudes conseils, sa patience, sa disponibilité et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ces côtés et je lui adresse toute ma gratitude.

Je remercie également tous les membres du jury qui ont accepté de consacrer un temps qui leur est précieux pour juger mon travail à savoir :

Professeur **Lat Grand NDIAYE**, Professeur titulaire à l'Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Professeur **Diouma Kobor**, Professeur titulaire à l'Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) qui m'a honoré en acceptant de diriger ce travail.

Docteur **Mouhamadou SY**, Assistant à l'Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) à qui je traduis toute ma gratitude pour avoir accepté d'examiner mon document.

Docteur **Joseph Sambasene DIATTA**, Maitre-Assistant à l'Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) à qui je manifeste toute ma reconnaissance pour avoir accepté de rapporter le travail.

J'adresse mes sincères remerciements à :

Monsieur **Babacar NDIAYE** Ingénieur, Chef de Service Solaire thermique et thermodynamique du CERER, mon Maitre de stage qui m'a permis de travailler avec aisance sur ce projet passionnant.

Docteur **Omar DRAME**, enseignant vacataire au département de Physique à la faculté des sciences et techniques de l'UCAD.

Monsieur **Bou Counta MBAYE**, Doctorant au CERER pour ses valeureux conseils, suggestions et surtout encouragements, je ne saurai vous remercier assez.

Monsieur **Mamadou Lamine COLY**, Doctorant au CERER, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Professeur **Issakha YOUM**, enseignant chercheur au département de Physique à la faculté des sciences et techniques de l'UCAD, pour m'avoir aussi beaucoup appuyé dans mes recherches.

Je tiens à exprimer ma gratitude à l'ensemble des personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

Table des matières

<i>RESUME</i>	
<i>Abstract</i>	I
<i>DEDICACES</i>	II
<i>REMERCEMENTS</i>	III
<i>Table des matières</i>	IV
<i>LISTE DES FIGURES</i>	VII
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	VIII
<i>NOMENCLATURE</i>	IX
<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	1
1 Chapitre : Etude bibliographique sur la pasteurisation.....	2
1.1 Introduction.....	3
1.2 Généralités sur la pasteurisation.....	3
1.2.1 Procédés de pasteurisation, aliments concernés et leur mode de pasteurisation.....	3
1.2.2 Paramètres de pasteurisations (Cinétique de destruction des microorganismes).....	4
1.2.2.1 Facteur temps.....	4
1.2.2.2 Durée de réduction décimale Dθ	5
1.2.2.3 Facteurs de variation de la thermorésistance.....	6
1.2.2.4 Barème de pasteurisation et valeur pasteurisatrice.....	6
1.3 Tests de vérifications de l'efficacité de la pasteurisation.....	8
1.3.1 Tests microbiologiques.....	8
1.3.2 Tests biochimiques.....	8
1.4 Autres traitements thermiques.....	8
1.4.1 Ultra pasteurisation (UP).....	8
1.4.2 Procédé UHT.....	8
1.4.3 Stérilisation.....	9
1.5 Les différents moyens utilisés pour la pasteurisation des aliments.....	9
1.5.1 Le chauffage à l'aide d'un échangeur de chaleur.....	9
1.5.2 Le chauffage au moyen d'un appareil à électrodes (thermoplongeur).....	9
1.5.3 Pasteurisation au bain-marie.....	9
1.6 Les différentes sources d'énergie utilisée.....	9
1.7 Conclusion.....	11

2	Chapitre: Généralités sur le produit ciblé et la technologie des chauffe-eaux solaires industriels pour la pasteurisation.....	12
2.1	Introduction	13
2.1.1	La filière d'anacarde en Afrique et plus particulièrement au Sénégal.....	13
2.1.1.1	Généralités sur la matière première.....	14
2.1.1.2	Les propriétés physico-chimiques du cajou.....	14
2.1.1.3	Exemple de processus de fabrication du jus de cajou par pasteurisation.	15
2.2	Technologie des chauffe-eaux solaires.....	16
2.2.1	Principe de fonctionnement.....	16
2.2.2	Les différents types d'installations.....	17
2.2.2.1	Boucle solaire fermé.....	17
2.2.2.2	Boucle solaire ouverte	17
2.2.3	Les circuits de production d'Eau chaude.....	17
2.2.3.1	Circulation thermosiphon	17
2.2.3.2	Circulation forcée	17
2.2.4	Les principaux composants d'une installation d'eau chaude	18
2.2.5	Les différents types de capteurs solaires thermiques pour la production d'eau chaude	18
2.2.6	Le choix des capteurs plans vitrés pour notre système.....	18
2.2.6.1	Le capteur	19
2.2.6.2	Le raccordement des capteurs	19
2.3	Conclusion	20
3	Chapitre : Dimensionnement de quatre types de pasteurisateurs solaires, la conception et la simulation du meilleur pasteurisateur choisi pour notre étude.	21
3.1	Introduction	22
3.2	Principe de fonctionnement de la technologie de transfert choisie pour les quatre types de pasteurisateur.....	22
3.3	Hypothèses	23
3.4	Dimensionnement des pasteurisateurs : surface d'échange, réservoirs et accessoires	23
3.4.1	Les paramètres thermo-physiques des fluides en fonction de leurs températures.....	24
3.4.2	Le cas où on a deux cylindres coaxiaux dont le diamètre du réservoir (cylindre) de jus est supérieur à celui du réservoir d'eau chaude (jus extérieur et eau chaude intérieur)	26
3.4.2.1	Fonctionnement	26
3.4.2.2	Calcul des Coefficients convectif externe h_e , interne h_i et le coefficient global U	27
3.4.2.3	Calcul du flux de chaleur, de la surface d'échange, de la longueur et de son efficacité	

3.4.3	Le cas où on a 2 cylindres coaxiaux dont le diamètre du réservoir (cylindre) de jus est inférieur à celui du réservoir d'eau chaude (jus intérieur et eau chaude extérieur).....	31
3.4.3.1	Fonctionnement	31
3.4.3.2	calcul du Coefficient convectif externe h_e , interne h_i et le coefficient global U.....	31
3.4.3.3	Calcul du flux de chaleur, de la surface d'échange, de la longueur et de son efficacité	32
3.4.4	Cas où l'échangeur est un serpentin plongé dans une cuve dont le jus est versé dans la cuve et l'eau chaude circule dans le serpentin.....	33
3.4.4.1	Fonctionnement	33
3.4.4.2	Calcul du Coefficient convectif externe h_e , interne h_i et le coefficient global U.....	33
3.4.4.3	Calcul du flux de chaleur, des dimensions du serpentin et de son efficacité.....	34
3.4.5	Cas où l'échangeur est un serpentin plongé dans un cylindre dont le jus circule dans le serpentin et l'eau chaude dans le réservoir externe	35
3.4.5.1	Fonctionnement	35
3.4.5.2	Calcul du Coefficient convectif externe h_e , interne h_i et le coefficient global.....	35
3.4.5.3	Détermination du Flux de chaleur échange, des dimensions du serpentin et des réservoirs d'eau chaude et du jus et l'efficacité du serpentin.....	36
3.5	Choix du meilleur pasteurisateur pour notre étude.....	37
3.6	Dimensionnement des capteurs	40
3.7	Choix des autres équipements et accessoires	40
3.8	Simulation numérique	40
3.8.1	Présentation du logiciel de simulation.....	40
3.8.2	Resultats et discussions	41
3.8.2.1	Le maillage	41
3.8.2.2	Variation des températures	42
3.9	Conclusion.....	43
	<i>CONCLUSION GENERALE</i>	43
	<i>PERSPECTIVES</i>	45
	<i>Annexes</i>	49
	Annexe A: Aspects socio-économiques et environnementaux du projet	49
	Annexe B : Importance de la pasteurisation sur la société, avantages et limites.....	54

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 :Influence du temps sur le nombre de micro-organismes survivants à une température létale θ constante [1].	4
Figure 1-2: technologie du chauffe-eau solaire[10].	10
Figure 2-1 : Fruits de l'anacardier à pomme rouge et à pomme jaune[12]	14
Figure 2-2 : Diagramme technologique de production des jus de pommes de cajou filtrés au filtre- presse[14].	16
Figure 2-3 : Fonctionnement d'un chauffe-eau solaire [15].	17
Figure 2-4 : Températures de fonctionnements des différents capteurs solaires thermiques [16].	18
Figure 2-5 : coupe schématique d'un capteur plan vitré [17].	19
Figure 2-6 : Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré [17].	19
Figure 3-1 : pasteurisateur à 2 cylindres coaxiaux dont le jus circule dans le cylindre externe et l'eau chaude dans le cylindre interne	27
Figure 3-2 : pasteurisateur à 2 cylindres coaxiaux dont le jus circule dans le cylindre interne et l'eau chaude dans le cylindre externe.	31
Figure 3-3 : Schéma du principe de fonctionnement [11].	33
Figure 3-4 : fonctionnement du pasteurisateur	35
Figure 3-5 : fonctionnement du pasteurisateur (dessin fait sur solideworks)	39
Figure 3-6 : Les étapes de la simulation numérique [20].	41
Figure 3-7 : Maillage	42
Figure 3-8 : Variation de la température pour une vitesse du jus $V = 0.347$ m/s	42
Figure 3-9 : variation de la température pour une vitesse du jus $V= 0.1$ m/s	42
Figure A.3-10 : bouteille de jus de cajou chez Zena[22].	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 Exemples d'aliments pasteurisés et leurs modes de pasteurisation[2].	3
Tableau 1-2 : exemple de calcul de valeur pasteurisatrice utilisé en industrie alimentaire [7].	7
Tableau 1-3 : Quelques valeurs pasteurisatrices utilisées en industrie alimentaire et leurs durées limites de conservation [7].	8
Tableau 2-1 : composition moyenne pour 100g de pomme de cajou fraîche [13].	15
Tableau 3-1 : Données physiques sur l'eau à 20° C.	25
Tableau 3-2 : Données physiques sur l'eau à 90°C [18].	25
Tableau 3-3 : Données physiques complémentaires.	26
Tableau 3-4 : les données de la surface d'échange.	33
Tableau 3-5 : Etude comparative du dimensionnement des quatre surfaces d'échanges.	37
Tableau 3-6 : Ordre de grandeur du coefficient global d'échange [11].	39
Tableau A.3-7 : Etude comparative.	52
Tableau A.3-8 : Calcul de la rentabilité du projet	53

NOMENCLATURE

Symboles	Désignations	unités
g	Champ de pesanteur	N/kg
S	Surface d'échange	m^2
C_p	Chaleur massique	J/kg K
G	Rayonnement solaire incident	W/m ²
Gr	Nombre de Grashof	Sans dimension
Pr	Nombre de Prandtl	Sans dimension
h	Coefficient de transfert de chaleur	W/m ² .K
N	Nombre de micro-organismes	N/s
D_{θ}	Temps de réduction décimale à la température T	s
V_p	Valeur pasteurisatrice	min
τ	coefficient de transmission	%
ε	coefficient d'émission	%
m	Masse	kg
e	Epaisseur	m
U	Coefficient d'échange global thermique	W/m ² .K
d	Diamètre externe du réservoir de jus	m
\dot{m}	Débit massique	kg/s
ϕ	Flux de chaleur transféré	Watt
T	Température	K
μ_f	Viscosité dynamique de l'eau	kg/m.s
β_f	dilatabilité	°C ⁻¹
λ_f	Conductivité thermique eau	W/m.K
V	Vitesse d'écoulement des fluides	m/s
H	hauteur	m
E	efficacité	%

INTRODUCTION GENERALE

Au Sénégal plus particulièrement en Casamance, les producteurs de fruits et légumes perdent 60 à 70 % de leurs productions, faute d'accès au marché d'écoulement et de conservation. Les producteurs sont obligés de brader leurs productions, juste pour amortir les charges engagées par la culture. Une quantité importante de fruits est produite plus particulièrement la pomme d'acajou dans les zones où la filière anacarde est très développée. Ces fruits communément appelés fruits sauvages sont des produits très riches en vitamines et en sels minéraux. Ils constituent une source importante de nutriments pour l'alimentation humaine. La filière de l'anacarde a toujours été limitée à la commercialisation de la noix de cajou et à la transformation pour la production d'amandes ou les autres composants de l'anacarde à savoir la pomme et le baume peuvent bel et bien être valorisés.

Plusieurs solutions ont été proposées pour pallier à ce handicap : les techniques de conservation par la chaleur (pasteurisation, stérilisation...) ou le froid (congélation, surgélation, réfrigération).

C'est dans cette optique que s'inscrit notre recherche qui est l'étude de faisabilité d'un système solaire thermique pour la pasteurisation du jus de fruits. Ce système a but de substituer le gaz butane et l'électricité, qui sont actuellement utilisés pour la pasteurisation du jus de fruits. Cette technologie est semblable à celle du chauffe-eau solaire, qui produira de l'eau chaude nécessaire à la pasteurisation de notre jus. En effet elle consiste à soumettre les aliments à une température comprise entre 65° C et 100° C pendant une durée déterminée et à les refroidir brutalement. Elle préserve les caractéristiques des denrées alimentaires, notamment leur saveur. Les denrées pasteurisées ont une date limite de conservation (DLC) et sont à conserver au frais.

Le présent document est structuré en trois chapitres :

- Chapitre 1 : Etude bibliographique sur la pasteurisation
- Chapitre 2 : Généralités sur les produits ciblés et la technologie des chauffe-eaux solaires industriels pour la pasteurisation
- Chapitre 3 : dimensionnement de quatre types de pasteurisateurs solaires et la conception et simulation du meilleur pasteurisateur choisi pour notre étude

En annexe, nous avons donné les aspects socio-économiques et environnementaux du projet.

Chapitre 1 : Etude bibliographique sur la pasteurisation

1.1 Introduction

La pasteurisation est un traitement thermique appliqué à un produit à des températures comprises entre 60 °C et 100 °C. Ce processus a pour but de détruire la totalité des micro-organismes pathogènes non sporules et de réduire significativement la flore végétative présente dans un produit tout en évitant de modifier ses caractéristiques organoleptiques (odeur, gout, texture, vitamines ...) et nutritionnelles. En effet c'est une technique de conservation limitée utilisée très fréquemment en agroalimentaire. Elle a pour objectif d'allonger de façon significative la durée de conservation des aliments.

Ainsi les généralités sur la pasteurisation, les différentes techniques utilisées et les autres traitements thermiques feront l'objet de ce chapitre.

1.2 Généralités sur la pasteurisation

1.2.1 Procédés de pasteurisation, aliments concernés et leur mode de pasteurisation

La pasteurisation est un procédé consistant à chauffer un aliment cru pendant quelques minutes ou secondes à une température la plus basse possible, entre 63 et 95° C, puis à le refroidir à 4°C de manière à détruire les germes nocifs qui pourraient être présents dans le produit, et réduire le nombre de microorganismes nullement dangereux pour la santé[1].

Elle peut être effectuée pour assurer la bonne conservation :

- des confitures et compotes ;
- du miel ;
- du vin, de la bière et du cidre ;
- des jus de fruits et notamment les jus de pommes ;
- des fruits en sirop et des concentrés de légumes ;
- de certaines viandes etc.

Tableau 0-1 : Exemples d'aliments pasteurisés et leurs modes de pasteurisation[2].

Exemples d'aliments	Exemples de modes de pasteurisation
Lait	Pasteurisateur à échangeur à plaques (15 s à 72 °C).
Crèmes	Pasteurisateur a échangeur à plaques (15 s à 82 °C).
Jus de fruits	Pasteurisateur à échangeur tubulaire (10 s à 97 °C).

Purées de fruits, concentrés de tomates	Pasteurisateur à échangeur à surface raclée (90-95 °C).
Bière	Traitement après conditionnement en tunnel de pasteurisation (20 min à 65 °C).
Ovoproduits	Pasteurisateur à échangeur tubulaire (2 - 6 min à 57-65 °C).

1.2.2 Paramètres de pasteurisations (Cinétique de destruction des microorganismes)

1.2.2.1 Facteur temps

On peut déterminer à différents temps le nombre de micro-organismes survivants suite à l'exposition à une température létale constante selon l'équation 1-1 [3]:

$$\log N = f(t) \quad 0-1$$

Cette relation est appelée courbe de survie ou cinétique de destruction microbienne.

Avec : $\log N = f(t)$

- t : Temps d'exposition des micro-organismes à la chaleur ;
- N_0 : Nombre de micro-organismes avant traitement thermique, donc à l'instant $t = 0$;
- N : Nombre de micro-organismes survivants à l'instant t .

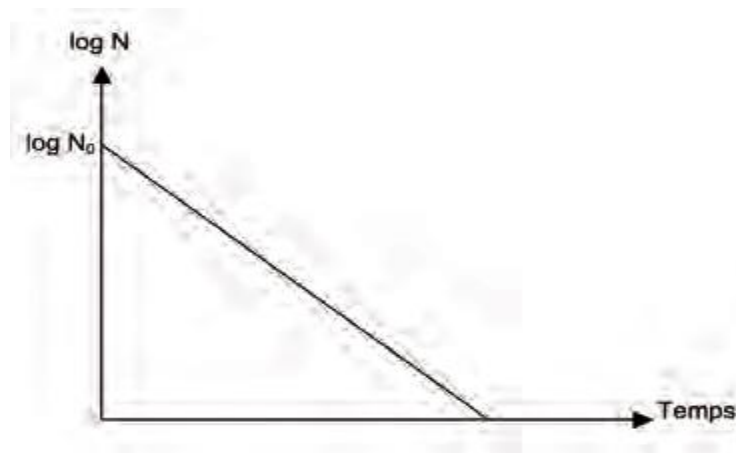


Figure 0.1 : Influence du temps sur le nombre de micro-organismes survivants à une température létale θ constante [1].

Plus le nombre initial de micro-organismes (N_0) est important, plus le temps de pasteurisation doit être long. De même, plus les micro-organismes sont thermorésistants, plus la durée de pasteurisation doit être grande [2].

1.2.2.2 Durée de réduction décimale D_θ

Le temps de réduction décimale à la température T, est le temps nécessaire pour réduire d'un facteur 10 (soit 90% des microorganismes initiaux) le nombre de microorganismes lors d'un traitement thermique à une température T. Ce temps de réduction décimale dépend principalement du type de microorganisme, mais également du milieu dans lequel il se trouve (pH, présence de certains ions, matières grasses ...)

La cinétique de destruction microbienne étant d'ordre 1, alors :

$$-\frac{dN}{dt} = k_\theta * N \quad (1-2)$$

Avec :

- θ : Température létale d'exposition à la chaleur ;
- k_θ : Constante de vitesse ;
- D_θ : Temps de réduction décimale

Et en séparant les variables de l'équation (1-2) on obtient :

$$-\frac{dN}{N} = k_\theta * dt$$

Cette équation s'intègre entre l'instant initial $t = 0$ et l'instant t , ce qui correspond aux valeurs N_0 et N :

$$\int_{N_0}^N -\frac{dN}{N} = \int_0^t k_\theta * dt \quad \rightarrow \quad \ln\left(\frac{N_0}{N}\right) = k_\theta * t$$

En utilisant le logarithme décimal, on obtient :

$$\log\left(\frac{N_0}{N}\right) = t * \left(\frac{k_\theta}{2.303}\right); \text{ Soit : } D_\theta = \frac{2.303}{k_\theta} \text{ ainsi } \log\left(\frac{N_0}{N}\right) = \frac{t}{D_\theta} \quad \rightarrow \quad \frac{N_0}{N} = 10^{\frac{t}{D_\theta}}$$

Avec :

- N_0 : Nombre (ou concentration) de micro-organismes avant traitement thermique, d'unité : N/L ;
- N : Nombre (ou concentration) de micro-organismes survivants à l'instant t , d'unité : N/L ;
- t : Temps d'exposition des micro-organismes à la chaleur, d'unité : s ou min ;
- D_θ : Temps de réduction décimale d'unité : s ou min ;

Si $t = D_\theta$, alors : $\log\left(\frac{N_0}{N}\right) = 1$ et $\frac{N_0}{N} = 10$;

Ainsi, D_θ est la valeur que prend t pour $\frac{N_0}{N} = 10$;

1.2.2.3 Facteurs de variation de la thermorésistance

La durée de réduction décimale D_0 dépend du micro-organisme considéré, de son état physiologique, de la température et du milieu dans lequel il est présent. Ainsi, D_0 caractérise la résistance à la température d'un micro-organisme dans des conditions physico-chimiques bien définies.

Les micro-organismes sont plus facilement détruits lorsqu'ils se trouvent en phase de croissance. Il existe deux types de flores :

- les micro-organismes détruits par un traitement à 63 °C pendant 30 min (ou par un traitement équivalent) : flore thermosensible ;
- les micro-organismes résistants à un traitement à 63 °C pendant 30 min (ou par un traitement équivalent) : flore thermorésistante.

La résistance à la température des micro-organismes varie en fonction des caractéristiques physico-chimiques de l'aliment telles que le pH, l'activité de l'eau et la teneur en lipides. En effet, la valeur du pH joue un rôle important dans la détermination de la quantité de chaleur nécessaire pour garantir un produit sûr lors de la transformation industrielle des aliments[4].

- plus le pH de l'aliment est éloigné de la neutralité (pH=7), plus les micro-organismes sont sensibles à la chaleur ;

L'objectif principal de la pasteurisation des aliments à faible acidité est la réduction des agents pathogènes responsables de maladies d'origine alimentaire, alors que dans le cas des aliments à haute acidité, la pasteurisation est destinée à éviter la détérioration et les pertes économiques [5].

- plus l'activité de l'eau de l'aliment est faible, plus les microorganismes sont thermorésistants et donc plus le traitement par la chaleur est inefficace ;
- plus l'aliment est gras, plus les micro-organismes seront résistants à la chaleur car les lipides sont de médiocres conducteurs de la chaleur [2].

1.2.2.4 Barème de pasteurisation et valeur pasteurisatrice

Il s'agit du couple temps-température de chaque produit. Pour comparer les barèmes, on utilise la valeur pasteurisatrice (VP) [6].

La valeur pasteurisatrice VP d'un traitement thermique est la durée (de maintien, en minutes d'une température donnée) nécessaire pour obtenir à 70 °C (la température de référence) la réduction du nombre d'un germe de référence de 10^{13} à 10 par gramme de produit [7]. C'est-à-

dire pour un traitement à une autre température, il est possible de calculer le temps nécessaire t pour obtenir le même effet à 70°C en utilisant la relation suivante :

$$P_{70}^z(t) = t * 10^{\frac{T-70}{z}} \quad \text{0-3}$$

t = Durée de maintien (en minute) à la température T ;

z = Variation de température qui entraîne une variation du temps de réduction décimale d'un facteur 10.

Dans les traitements thermiques réels la température subit des variations au moment du chauffage et du refroidissement; on détermine en conséquence l'efficacité du traitement en cumulant les valeurs pasteurisatrices partielles.

Chaque valeur pasteurisatrice partielle P(T_i) est calculée pour une température T_i intermédiaire considérée constante pendant une durée de 1 minute [7].

$$P(T_i) = 10^{\frac{T_i-70}{z}} \quad \text{0-4}$$

La valeur pasteurisatrice a une influence certaine sur la qualité microbiologique du produit pasteurisé et donc sur sa durée de conservation. C'est pourquoi elle a été choisie avec la température maximale atteinte pour déterminer les catégories dans lesquelles sont classés les produits pasteurisés[7].

Le nombre 70 représente la température de référence à laquelle on calcule la valeur pasteurisatrice et le nombre 10 correspond à la valeur z du germe de référence, c'est-à-dire Streptococcus faecalis. Ce germe a été choisi car il s'agit du germe le plus thermorésistant parmi les germes non sporulés. Si ce germe est détruit, les autres germes non sporulés le sont aussi.

La valeur pasteurisatrice peut être facilement déterminée à partir du relevé de température à cœur du produit c'est à dire le point le plus lent à s'échauffer.

Tableau 0-2 : exemple de calcul de valeur pasteurisatrice utilisé en industrie alimentaire [7].

Temps de cuisson (min)	Température à cœur (°C)	Valeur pasteurisatrice partielle VPP (min)
70	70	1
71	70.5	1.12
72	70.9	1.259
73	71.3	1.415
	Valeur pasteurisatrice totale = somme VPP	4.794 min

- t : intervalle de temps entre 2 mesures. Les valeurs pasteurisatrices du tableau ont été calculées en prenant t = 1 minute

- T : température à cœur du produit T_{ref} ; température de référence. $T_{ref} = 70\text{ °C}$.
- z : paramètre de thermorésistance du germe de référence ;

Les valeurs pasteurisatrices du tableau ont été calculées avec $z=10\text{ °C}$.

Tableau 0-3 : Quelques valeurs pasteurisatrices utilisées en industrie alimentaire et leurs durées limites de conservation [7].

catégories	1	2	3(plats pasteurisés)
Valeur pasteurisatrice	$<100\text{ °C}$	> 100	> 100
Température à cœur	$57\text{ °C} < \theta < 65\text{ °C}$	$\theta > 65\text{ °C}$	$\theta > 70\text{ °C}$
DLC maximum	14 jours	21 jours	42 jours

1.3 Tests de vérifications de l'efficacité de la pasteurisation

Pour vérifier l'efficacité d'une pasteurisation deux moyens figurent :

1.3.1 Tests microbiologiques

Pour ces types de tests, on recherche les bactéries de contamination fécale principalement les souches d'Escherichia Coli. Il s'agit d'un test long (48 à 72h d'incubation), ce qui n'est pas recommandé dans le milieu industriel car ça entraîne une énorme perte de temps et d'argent.

1.3.2 Tests biochimiques

L'activité résiduelle des enzymes est un bon indicateur de l'efficacité du traitement thermique. Le test consiste à rechercher l'une des deux enzymes, la catalase ou la phosphatase alcaline que contiennent les aliments.

1.4 Autres traitements thermiques

1.4.1 Ultra pasteurisation (UP)

Elle emploie un traitement thermique plus élevée que la pasteurisation mais inférieure aux processus (Ultra Haute Température) UHT [1].

1.4.2 Procédé UHT

Avec cette méthode de conservation, le produit par exemple le lait, est porté à une haute température au-delà de 135 °C pendant une courte période de 1 à 5 secondes, puis immédiatement et très rapidement refroidi. Il est ensuite conditionné aseptiquement. Ce traitement permet une conservation de longue durée à température ambiante[8].

1.4.3 Stérilisation

Il s'agit d'un traitement thermique à des températures supérieures à 100° C visant à détruire toute forme microbienne, ce qui assure la stabilité à température ambiante des denrées[8].

1.5 Les différents moyens utilisés pour la pasteurisation des aliments

Différentes méthodes permettent de chauffer un aliment :

1.5.1 Le chauffage à l'aide d'un échangeur de chaleur

Le jus par exemple à chauffer circule dans l'échangeur en sens inverse de l'eau chaude, prélevant au passage les calories de cette dernière. La source d'énergie pourra être l'électricité, le gaz, une chaudière de chauffage central ou encore une chaudière à vapeur. Avec ce système, le débit de jus chaud est continu[9].

1.5.2 Le chauffage au moyen d'un appareil à électrodes (thermoplongeur)

C'est le système le mieux adapté pour la pasteurisation des jus dans le cadre familial. En effet, ce système demande peu de matériel et reste simple d'emploi. Un thermoplongeur comprenant trois électrodes est alimenté par du courant électrique. Il est plongé dans le jus à chauffer.

1.5.3 Pasteurisation au bain-marie

Pour de faibles quantités également, il est possible de pasteuriser les bouteilles dans une chaudière ou une marmite à stériliser à bain-marie, de la manière suivante:

- Remplir les bouteilles ou bocaux de jus froid, jusqu'à 5 ou 6 cm du bord. Avec la chaleur, le jus arrivera jusqu'au rebord du contenant;
- Déposer les bouteilles dans la chaudière ou la marmite en veillant qu'elles se touchent pas;
- Remplir la chaudière ou la marmite d'eau froide jusqu'à un minimum de $\frac{3}{4}$ de la hauteur des récipients ;
- Chauffer à feu doux jusqu'à ce que la température du jus dans les bouteilles atteigne 75° ;
- Retirer les bouteilles et les déposer sur une surface en bois, les fermer immédiatement à chaud.

1.6 Les différentes sources d'énergie utilisée

Fabriquer un pasteurisateur sert à conserver tous types de liquide, particulièrement les jus de fruits, pour pouvoir en boire toute l'année et stopper toute activité de fermentation, sans en

détruire toutes les propriétés nutritives. Le principe de pasteurisation reste le même pour tout type de pasteurisateur. Cependant les pasteurisateurs divergent par rapport à leur mode de fonctionnement. Si certains ont pour source d'énergie les énergies fossiles d'autres utilisent l'énergie verte. Parmi les sources d'énergie on peut citer :

- **Combustion biomasse**

Cette technologie est beaucoup moins chère par rapport à celle du gaz butane qui demande des brûleurs puissants. Le bois est la source d'énergie la plus utilisée dans cette technologie car elle est plus disponible, plus puissante et moins cher.

- **Electrique**

Pour cette technologie on utilise l'électricité comme source de chaleur avec les résistances chauffantes ou l'élément chauffant électrique fonctionne en convertissant l'énergie électrique en chaleur. Cette technologie est le plus souvent utilisée en industrie.

- **Solaire thermique**

Ce système est très vaste et diversifié. Dans notre cas d'étude, il est question de proposer une solution basée sur la technologie solaire afin qu'elle soit substituée au gaz butane, actuellement utilisé pour la pasteurisation. Cette technologie est celle des chauffe-eaux solaires, qui produira de l'eau chaude nécessaire à la pasteurisation d'après la figure 1-2.

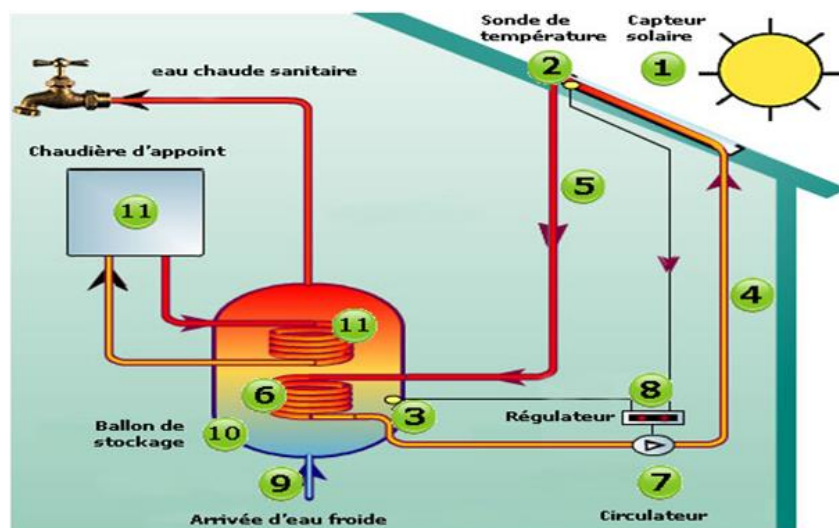


Figure 0-2: technologie du chauffe-eau solaire[10].

1.7 Conclusion

Nous avons passé en revue le principe de fonctionnement de la pasteurisation des produits, les différents paramètres à tenir en compte ainsi que les différents moyens utilisés pour la pasteurisation des aliments. Le choix du type de pasteurisation à appliquer dépend de la nature de l'aliment, des conditions de traitement et du type d'emballage. Dans notre cas d'étude, on a utilisé la technologie du chauffe-eau solaire. Ces différents paramètres étudiés nous seront utiles dans la suite.

Chapitre 2: Généralités sur le produit ciblé et la technologie des chauffe-eaux solaires industriels pour la pasteurisation

1.8 Introduction

Actuellement une grande quantité de fruits issue de la forêt pourrie par faute de transformation ou de conservation. La valorisation de ces fruits pourrait aider à atteindre l'autosuffisance alimentaire, générer des revenus au niveau des PME (Petites et Moyennes Entreprises). Ainsi, nous nous intéressons à la filière anacarde ou la transformation et la conservation du jus restent toujours problématiques.

Ce présent chapitre est constitué de deux grandes parties:

- Les généralités sur le produit ciblé ;
- Une revue bibliographique sur la technologie du système chauffe-eau solaire industriel ;

1.8.1 La filière d'anacarde en Afrique et plus particulièrement au Sénégal

L'anacardier, espèce introduite en Afrique de l'ouest et au Sénégal comme essence de boisement et reboisement, est devenu une espèce à vocation agricole et représente une source de revenus importante pour les populations rurales. En Afrique, entre 2011 et 2018, la production en noix brute est passée de 1 million de tonnes à 1,8 million de tonnes avec une croissance annuelle de 5,8 % dont la moitié est produite par la Côte d'Ivoire [11]. En effet la côte d'ivoire est le premier producteur de cajou d'Afrique. Cependant, cette production est essentiellement destinée à la transformation et l'exportation de la noix de cette matière première. Faute de recherche, sa pomme n'est pas utilisée à bon escient alors qu'elle est susceptible d'être transformée localement pour la fabrication de jus, de confitures, de produits cosmétiques, d'éthanol et autres. En effet, la transformation de la pomme de cajou peut être une solution additionnelle à la vente de l'anacarde, ce qui constituerait une plus-value aux acteurs de la filière cajou. C'est ce qui a conduit les autorités africaines comme le Sénégal dans la recherche des meilleurs rendements de leurs processus de transformation de la pomme de cajou. L'objectif est de mettre sur pieds des technologies, d'unités de transformation efficaces, performantes et surtout écologiques. Cette nouvelle vision ne serait pas seulement judicieuse du point de vue écologique ou énergétique, elle serait aussi très rentable financièrement. Ceci impose néanmoins un recours à des solutions techniques optimales offrant le meilleur rendement possible plus précisément dans notre cas d'étude, des systèmes solaire à échangeur thermique.

1.8.1.1 Généralités sur la matière première

La pomme d'anacarde constitue la principale matière première utilisée dans la production du jus d'anacarde. Celles-ci doivent être bien mûres, saines et intégrées. Plusieurs types de pommes d'anacarde, distinctes selon la couleur allant du jaune au rouge existent. Mais pour la transformation, il est recommandé d'utiliser les pommes de même couleur de peau[12].



Figure 0-1 : Fruits de l'anacardier à pomme rouge et à pomme jaune.

1.8.1.2 Les propriétés physico-chimiques du cajou

L'indice de maturité des pommes varie de 20,19 à 44,17. Après extraction, les rendements en jus et en résidus de pressage ont été évalués et varient respectivement de 76 % à 86 % et de 10 % à 16 %. La teneur en sucres totaux est comprise entre 60,49 et 64,14 g/l. Les concentrations (mg/l) de polyphénols, de flavonoïdes et de tanins condensés varient respectivement de 2506,510 à 4247,690 ; 134,60 à 450,95 et de 130,30 à 614,70. Le jus de pommes d'anacarde contient beaucoup de composés tanniques qui donnent une sensation désagréable lorsqu'on le consomme et son utilisation au niveau commercial est limitée. Le pH du jus est compris entre 3,37 et 4,52 ; l'acidité totale titrable varie de 0,24 à 0,61 % d'acide citrique. Les teneurs en extrait sec réfractométrie de 8,2° à 10, 2° brix, en matière sèche de 7,20% à 8,43% puis en cendres de 0,15% à 0,23 % [13].

Tableau 0-1 : composition moyenne pour 100g de pomme de cajou fraiche [13].

Paramètres	Comparatif: jus de fruit					
	Cajou	Orange	Ananas	Mangue	Goyave	A.J.R
Calories	51,4	47	28,9	65,4	78,4	-
Protéines (g)	0,8	0,8	0,3	0,5	0,9	60 - 75
Gras (g)	0,2	0,2	0,5	0,2	0,4	68
Hydrate de carbone (g)	11,6	10,5	12	17	14	375
Fibres (g)	1,0	0	0	2,0	5	
Calcium (mg)	4,0	34	16	12	22	0,68
Magnésium (mg)	260	11	12	9	22	300
Potassium (mg)	565	200	125	156	4,7	1600
Phosphore (mg)	5,0	20	11	12	26	1200
Fer (mg)	0,71	0,7	0,3	0,8	0,7	0,015
Vitamine A (UI)	120	40	21	630	80	5000 U.I
Vitamine B1 (mg)	0,03	0,09	0,08	0,05	0,04	1,5
Vitamine B2 (mg)	0,03	0,03	0,13	0,06	0,04	1,7
Vitamine B3 (mg)	0,13	0,4	0,47			19
Vitamine C (mg)	219	59	27	63	218	60

Nous considèrerons les propriétés thermo-physiques de l'eau pour les calculs thermiques dans la mesure où l'eau a des propriétés qui avoisinent celles des jus en général, mais plus particulièrement celle du jus de pomme de cajou. Ainsi, la pomme de cajou est constituée environ de 90% d'eau. Le jus de pommes d'anacarde est riche de par sa composition et c'est cette richesse qui précipite sa dégradation car ses qualités organoleptiques vont de pair avec sa fragilité, d'où le problème de sa conservation[13].

1.8.1.3 Exemple de processus de fabrication du jus de cajou par pasteurisation.

Les fruits ont été triés, lavés, laissés égoutter, découpés et pressés. Le jus extrait a été directement filtré ou clarifié avant d'être filtré. Vingt gramme de poudre d'amidon de riz ont été dissous dans 100 ml d'eau à 60°C. Dix millilitre de la solution obtenue ont ensuite été prélevés pour clarifier un litre de jus, pendant 193 minutes, pour une élimination optimale par floculation et décantation des tanins [14] . Un préchauffage du jus filtré à 60°C pendant environ 15 min a été réalisé avant la mise en bouteilles et le capsulage. Les jus ainsi conditionnés ont été pasteurisés à 80°C pendant 20 min, puis refroidis.

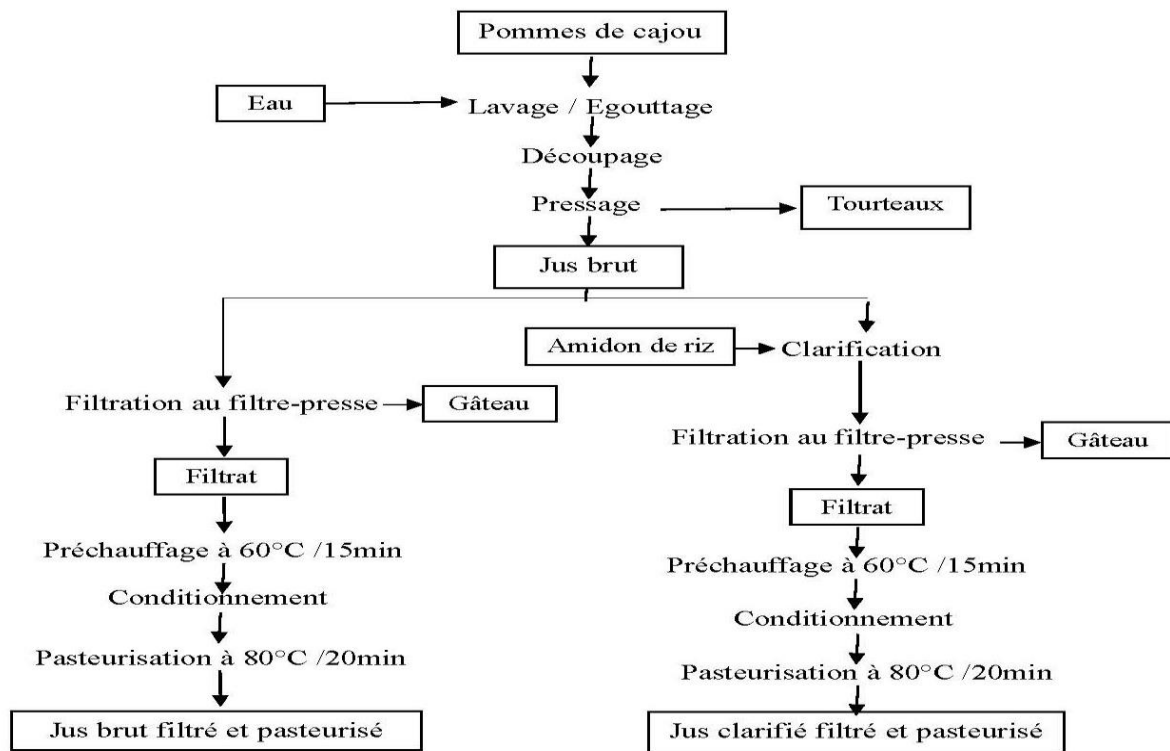


Figure 0-2 : Diagramme technologique de production des jus de pommes de cajou filtrés au filtre-presse[14].

1.9 Technologie des chauffe-eaux solaires

Une chauffe - eau solaire est un système qui permet la production d'eau chaude par conversion de l'énergie solaire. Elle peut être utilisée à des fins domestiques (vaisselle, lessive, toilette...) pour des consommations réduites, ou pour des usages collectifs, industriels ou commerciaux tel que les hôpitaux, les hôtels ... ; pour des consommations importantes.

1.9.1 Principe de fonctionnement

Les capteurs solaires transforment le rayonnement solaire en chaleur grâce à un absorbeur. L'absorbeur transfère cette chaleur à un fluide caloporteur généralement de l'eau glycolée circulant à travers les capteurs et qui stockent la chaleur solaire. Le fluide caloporteur est ensuite transporté via une pompe de circulation forcée vers un ballon de stockage d'eau où il va restituer sa chaleur à l'eau grâce à un échangeur thermique. Un dispositif de régulation électronique commande le fonctionnement du système selon les conditions d'ensoleillement et la demande en eau chaude. Lorsque la différence de température entre la sonde capteur (S1) et la sonde en fond de ballon (S2) dépasse quelques degrés, les circulateurs s'enclenchent. La figure 2-3 nous montre le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire :

.

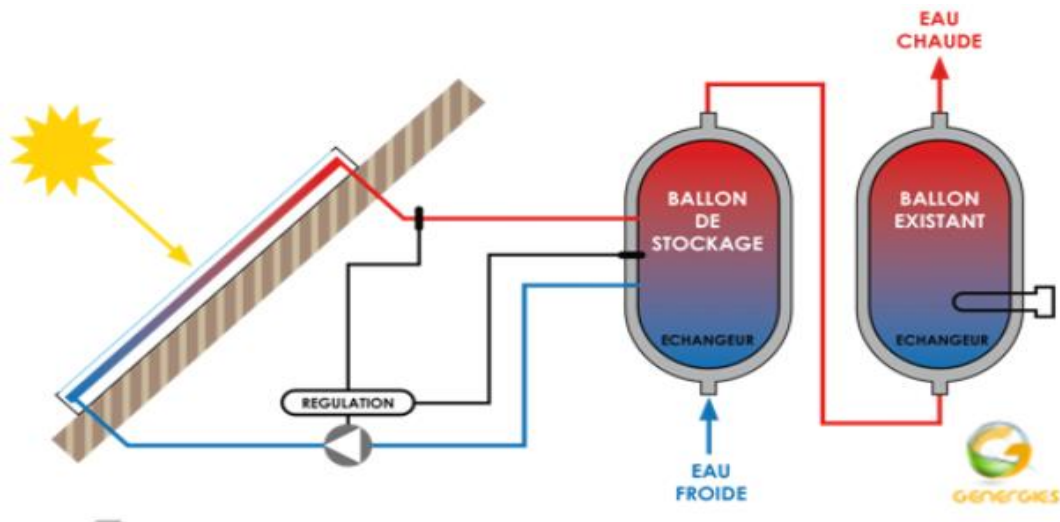


Figure 0-3 : Fonctionnement d'un chauffe-eau solaire [15].

1.9.2 Les différents types d'installations

1.9.2.1 Boucle solaire fermé

Dans ce cas de figure, le fluide qui chauffe dans les capteurs solaires et celui qui arrive aux points de puisages (douche, pasteurisateur...) sont distincts : l'eau de consommation est indirectement chauffée à travers un échangeur par le fluide caloporteur du circuit solaire.

1.9.2.2 Boucle solaire ouverte

La boucle est dite ouverte si l'eau qui circule dans les capteurs est la même que celle qui est consommée aux points de puisage. On le trouve donc plus souvent dans les pays chauds où les capteurs constituent le seul moyen de chauffage.

1.9.3 Les circuits de production d'Eau chaude

1.9.3.1 Circulation thermosiphon

Un thermosiphon est un phénomène physique qui est capable par un simple effet thermique de mettre en circulation un fluide. Dans les installations à thermosiphon, le fluide de la boucle solaire circule par convection naturelle, le fluide réchauffé s'élève. Le stockage est en général situé au-dessus des capteurs à une distance de minimum 50 cm[6].

1.9.3.2 Circulation forcée

Dans ces types d'installations, un dispositif de pompage provoquant la circulation forcée du fluide de la boucle solaire est mis en place. La pompe est activée automatiquement par la régulation qui évalue la différence de température du fluide à la sortie des capteurs et la température de l'eau dans le bas du réservoir de stockage.

1.9.4 Les principaux composants d'une installation d'eau chaude

- ✚ Le système de charge : il comprend les capteurs solaires, la boucle primaire ou solaire et un échangeur de chaleur.
- ✚ Le système de stockage : Il s'agit généralement d'un ou plusieurs ballon(s) d'eau, bien isolé(s) thermiquement. Le stockage permet de différer la demande de puisage par rapport au moment de la production solaire.
- ✚ Le système d'appoint : Pendant une bonne partie de l'année, un appoint de chaleur est nécessaire pour atteindre la température minimale. Cet appoint de chaleur peut être fourni par un moyen traditionnel de production de chaleur (chaudière, résistance électrique, pompe à chaleur,...).
- ✚ Le système de décharge : C'est la partie de l'installation qui distribue l'eau chaude aux différents points de puisage.

1.9.5 Les différents types de capteurs solaires thermiques pour la production d'eau chaude

La figure 2-4 suivante montre les différents types de capteurs en fonction de leur température de fonctionnement.

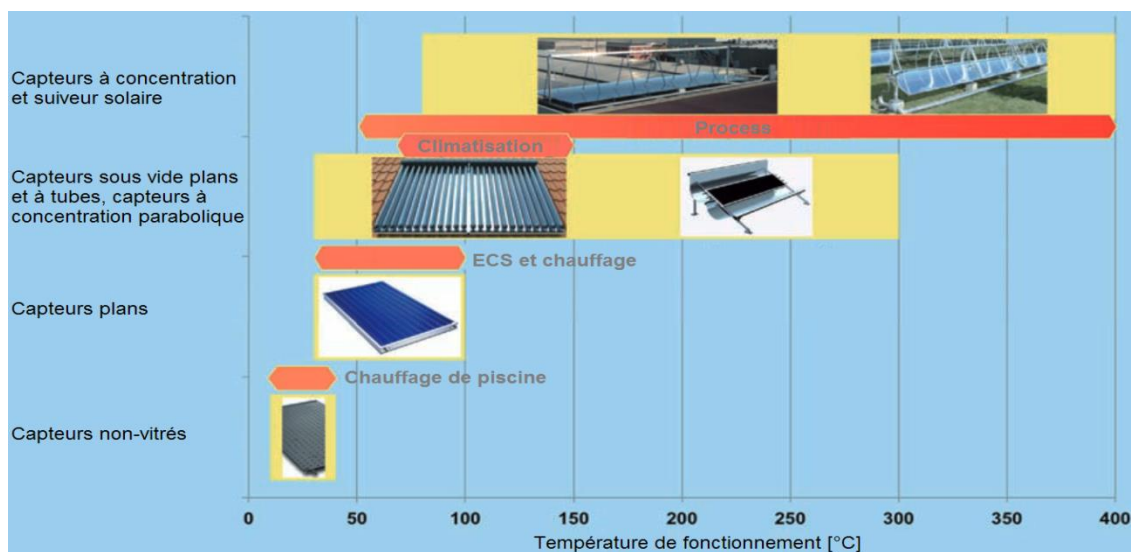


Figure 0-4 : Températures de fonctionnements des différents capteurs solaires thermiques [16].

1.9.6 Le choix des capteurs plans vitrés pour notre système

Ils sont recommandés pour une plage de températures comprises entre 30 à 80°C. Ils sont facile à mettre en œuvre et ont un bon rapport performance/prix [6]. C'est le type de capteur qui correspond aux mieux à notre pasteurisateur.

1.9.6.1 Le capteur

✚ Principaux éléments constituant un capteur plan vitré

Un capteur plan vitré est constitué principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur et d'une isolation thermique comme la montre la figure 2-5.

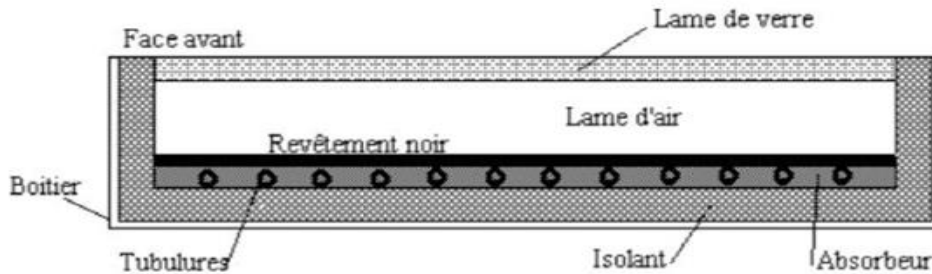


Figure 0-5 : coupe schématique d'un capteur plan vitré [17].

✚ Principe de fonctionnement et paramètres d'un capteur plan vitré

Une partie du rayonnement solaire qui arrive sur la vitre traverse cette dernière pour atteindre la plaque absorbante. La plaque absorbante s'échauffe et transfère la chaleur au fluide caloporteur qui circule dans les tubes. Comme tout corps qui s'échauffe, l'absorbant émet un rayonnement infrarouge qui est réfléchi par la vitre, c'est le principe de « l'effet de serre ». L'isolant a pour fonction de minimiser les déperditions thermiques avec l'extérieur. En effet, la grande partie de l'énergie absorbée doit être transmise au fluide. Il faut donc minimiser les pertes avec l'environnement proche. La figure 2-6 nous montre le fonctionnement d'un capteur plan vitré :

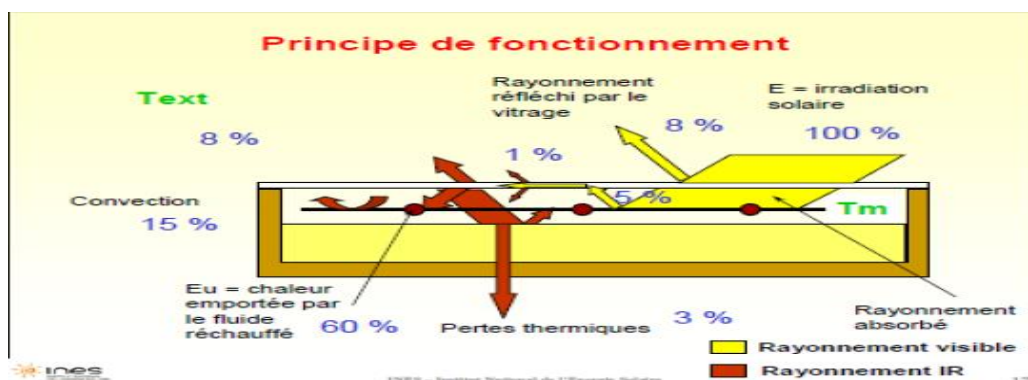


Figure 0-6 : Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré [17].

1.9.6.2 Le raccordement des capteurs

Un champ de capteurs doit être composé de capteurs aux propriétés physiques semblables.

Plusieurs raisons sont dues à cela :

- ✚ Éviter les sources d'usure prématurée ;

✚ Eviter un problème d'équilibrage hydraulique ;

- **Raccordement en série**

Le raccordement en série permet une montée en température plus importante au prix de pertes thermiques plus importantes surtout si l'on travaille avec un faible débit. De ce fait, la montée progressive en température au fil des panneaux en série est accompagnée par une diminution du rendement. Un trop grand nombre de capteurs raccordés en série sera donc à éviter. En pratique, 5 à 6 capteurs de taille standard environ 2 m² est un maximum [6].

- **Raccordement en parallèle**

Énergétiquement parlant, le raccordement en parallèle est donc plus intéressant mais n'est pas toujours réaliste vu les longueurs de tuyauterie nécessaires. L'équilibrage hydraulique des différents capteurs est un point crucial. Dans la réalité, il est souvent réalisé empiriquement par un jeu de vannes qui ne permet évidemment pas de corriger les erreurs de conception. Il est donc primordial de prendre en compte les pertes de charges liées aux capteurs pour le dimensionnement des tuyauteries.

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une revue bibliographique sur la technologie du système chauffe-eau solaire industriel et une généralité sur le produit ciblé (l'anacarde). Les différentes parties étudiées dans ce chapitre nous permettront de bien dimensionner notre pasteurisateur solaire qui est le principal objet du chapitre 3.

Chapitre 3 : Dimensionnement de quatre types de pasteurisateurs solaires, la conception et la simulation du meilleur pasteurisateur choisi pour notre étude.

1.11 Introduction

Dans cette partie du travail dédiée au dimensionnement de quatre types de pasteurisateurs, à la conception et à la simulation du meilleur d'entre eux, il sera question dans un premier temps de choisir la technologie de transfert des pasteurisateurs. Puis viendra le dimensionnement de chacun d'eux et le choix du plus adéquate à notre étude. Ensuite nous allons passer à la conception du dispositif à l'aide du logiciel de dessin industriel **solidworks** pour sa réalisation à l'atelier de fabrication. Enfin nous terminons par la simulation du pasteurisateur. Des compétences en énergétique, en mécanique et en dessin industriel sont nécessaires pour mener à bien ce travail.

1.12 Principe de fonctionnement de la technologie de transfert choisie pour les quatre types de pasteurisateur

On distingue différents types d'échangeurs (tubulaire, à spirale, à surface raclée...). Cependant le principe de fonctionnement reste le même. Dans notre étude, nous allons essayer de travailler avec l'échangeur tubulaire monotube. Dans ce cas, le produit alimentaire circule dans un tuyau au centre et le fluide thermique circule dans la partie extérieure. L'élévation de la température du jus entre 70 °C et 80 °C empêche la fermentation. C'est en réglant le débit du jus dans le pasteurisateur que l'on maîtrise très finement la température. Plus le débit est faible, plus le transfert thermique est important.

Dans la pratique, si la température du fluide caloporteur est maintenu à 90°C, la variation de température du jus est identique au début et à la fin de la pasteurisation (80°C).

Par contre, la variation de température du jus va se réduire en fonction du temps si la machine fonctionne en stockage thermique, sans appoint de chauffage. La mise en bouteille à chaud avec bouchons hermétiques permet la conservation du produit sur une période d'un an, tout en maintenant les propriétés et le goût du jus au fil du temps.

Quatre cas d'études de dimensionnement seront étudiés à savoir :

- le cas où on a 2 cylindres coaxiaux dont le diamètre du réservoir (cylindre) de jus est supérieur à celui du réservoir d'eau chaude ;
- le cas contraire de ce dernier ;
- le cas où le jus circule dans un serpentin et l'eau chaude dans un réservoir cylindrique à l'intérieur duquel on incorpore le serpentin ;
- le cas contraire de ce dernier.

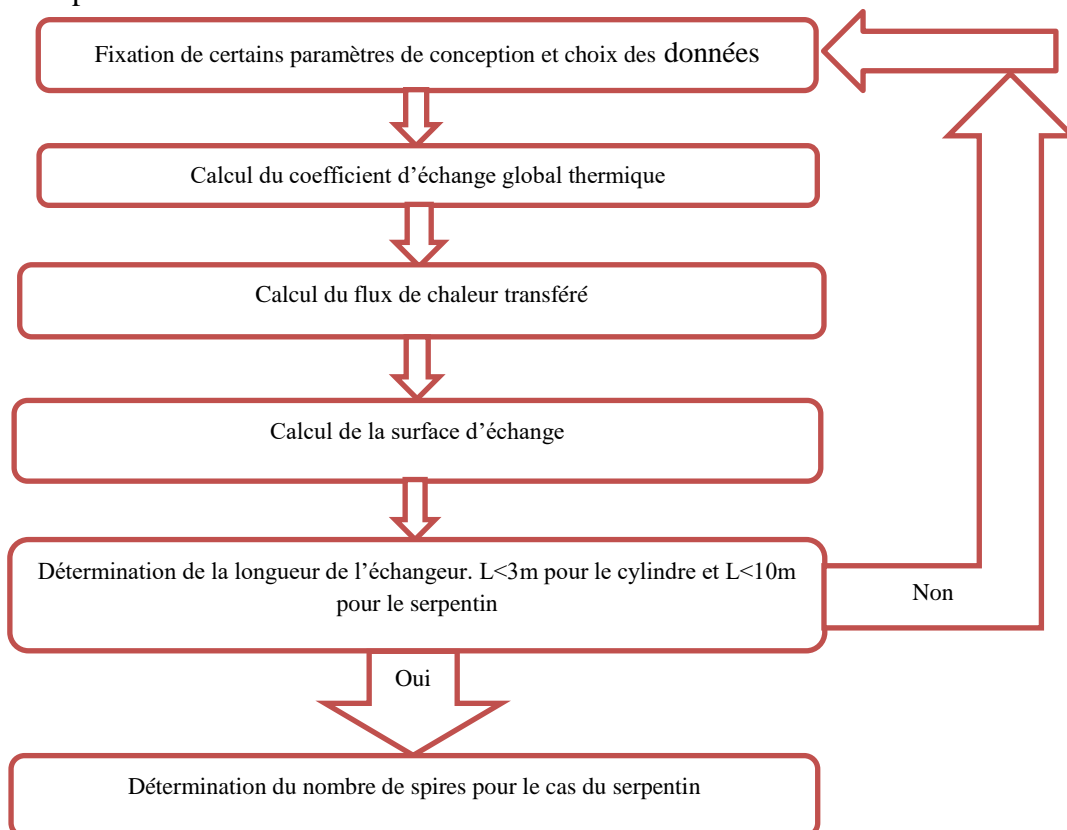
1.13 Hypothèses

L'écart de température entre les deux fluides provoque un courant thermique à travers la surface de chauffe. Le fluide froid se réchauffe et le fluide chaud se refroidit. De ce fait, des hypothèses importantes sont à considérer :

- ✚ Le régime est permanent, les conditions extérieures et les contraintes appliquées aux systèmes étudiés sont faiblement dépendantes du temps ;
- ✚ Tout ce qui est perdu par le fluide chaud, est regagné par le fluide froid ;
- ✚ Les pasteurisateurs sont bien calorifugés (pertes extérieures négligeables).

1.14 Dimensionnement des pasteurisateurs : surface d'échange, réservoirs et accessoires

Un échangeur de chaleur est un système qui permet d'échanger de la chaleur entre deux fluides sans se mélanger. Les transferts de chaleur s'opèrent sans changement d'état. Notre échangeur ici est de type monophasique. C'est-à-dire que le fluide caloporteur se refroidit pour chauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait changement de phase ou d'état. Pour le dimensionnement de l'échangeur, nous nous mettons dans les conditions de pression atmosphérique et nous négligerons les pertes de chaleur dans notre échangeur, sachant que la chaleur se dirige toujours du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. Les étapes à suivre pour le dimensionnement sont :



Le transfert de chaleur met en jeu 3 résistances :

- ✚ Une résistance à la convection entre le fluide chaud et la surface externe du contenant de jus (cylindre ou serpentin);
- ✚ Une résistance à la conduction dans la paroi d'épaisseur $e=5\text{mm}$ du réservoir de jus dans le cas des 2 cylindres coaxiaux et une résistance à la conduction dans la paroi d'épaisseur $e=2\text{mm}$ du réservoir de jus dans le cas du cylindre et du serpentin;
- ✚ Une résistance à la convection entre le fluide froid (jus) et la surface interne du contenant de jus.

Soient h_i et h_e les coefficients d'échange respectifs correspondant aux résistances de convection intérieur et extérieur. La conductivité thermique de l'inox (réservoir contenant le jus) est λ . Le coefficient d'échange global U en ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) est fonction des coefficients convectifs et de la transmission dans le métal.

Le coefficient global d'échange est donné par l'équation 1.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{d_{ej}}{2\lambda} \times \ln\left(\frac{d_{ej}}{d_{ij}}\right) + \frac{d_{ej}}{d_i} \times \frac{1}{h_i} \quad \mathbf{0-1}$$

Avec

- ✚ $\frac{1}{U}$: La résistance thermique globale ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)
- ✚ h_i : Coefficient convectif interne ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)
- ✚ h_e : Coefficient convectif externe ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)
- ✚ U : Coefficient d'échange global thermique ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)
- ✚ d_{ej} : Diamètre externe du réservoir de jus
- ✚ d_{ij} : Diamètre interne du réservoir de jus

1.14.1 Les paramètres thermo-physiques des fluides en fonction de leurs températures

✚ Données sur le jus :

Pour les calculs thermiques, nous considérerons les propriétés thermo-physiques de l'eau qui a des propriétés qui avoisinent celles des jus en général, mais plus particulièrement celle du jus de pomme de cajou (la pomme de cajou étant constituée environ 90% d'eau) [11].

Nous fixons notre débit volumique de jus à $Q_f = 100 \text{ l/h}$

Connaissant le débit volumique on peut déterminer le débit massique à travers la formule :

$$\dot{m}_f = Q_f \times \rho_f \quad 0-2$$

Le tableau 3.1 ci-dessous présente les propriétés de l'eau à $T_f = 20^\circ\text{C}$ [11].

Tableau 0-1 : Données physiques sur l'eau à 20°C .

Désignation	Symboles	Valeurs	Unités
Débit volumique eau	Q_f	100	l/h
Débit massique eau	\dot{m}_f	0.03	kg/s
Température entrée eau	T_{ef}	20	$^\circ\text{C}$
Température sortie eau	T_{sf}	80	$^\circ\text{C}$
Masse volumique eau	ρ_f	998	kg/m^3
Chaleur spécifique eau	C_{pf}	4 180	J/kg.k
Viscosité dynamique de l'eau	μ_f	0,001	kg/m.s
dilatabilité	β_f	0,0002	$^\circ\text{C}^{-1}$
Conductivité thermique eau	λ_f	0,6	W/m.K

Données sur le fluide caloporteur :

Le choix est porté sur l'eau. Le tableau 3.2 ci-dessous présente les données sur l'eau à 90°C .

Tableau 0-2 : Données physiques sur l'eau à 90°C [18].

Désignation	Symboles	Eau	Unités
Débit volumique eau	Q_c	700	l/h
Débit massique eau	\dot{m}_c	0,19	kg/s
Masse volumique eau	ρ_c	965,06	kg/m^3
Chaleur spécifique eau	C_{pc}	4 205	J/kg.k
Viscosité dynamique eau	μ_c	0,000315	kg/m.s
Conductivité thermique eau	λ_c	0,6	W/m.K
Dilatabilité eau	β	0,0359	$^\circ\text{C}^{-1}$

Données constantes :

Les autres valeurs seront considérées comme des constantes prises dans la littérature, ou définies sur la base d'hypothèses. La hauteur est fixée suivant le volume et le diamètre. Le tableau 3.3 ci-dessous donne les données complémentaires

Tableau 0-3 : Données physiques complémentaires.

Désignation	Symboles	Eau	Unités
Différence de température fluide-paroi	ΔT	1	°C
Constante de pesanteur	G	9,81	m/s ²
Conductivité thermique inox	λ	14,6	W/m.k
Diamètre interne du réservoir de jus	d_{ij}	0,3	m
Diamètre externe du réservoir de jus	d_{ej}	0,302	m
Diamètre interne du réservoir d'eau chaude	d_{ic}	0,5	m
Diamètre externe du réservoir d'eau chaude	d_{ec}	0,502	m
Diamètre hydraulique (diamètre entre les deux réservoirs)	d_h	0.2	m
Hauteur de chacun des 2 réservoirs	H	1,4147	m
Vitesse d'écoulement de l'eau chaude	v_c	0,4	m/s

ΔT est la différence de température entre le fluide caloporteur et la surface externe de l'échangeur. Elle sera prise égale à 1°C. En réalité, nous savons que la température du fluide chaud et celle de la surface externe sont très proches, mais il nous est difficile d'évaluer exactement celle à la surface interne.

1.14.2 Le cas où on a deux cylindres coaxiaux dont le diamètre du réservoir (cylindre) de jus est supérieur à celui du réservoir d'eau chaude (jus extérieur et eau chaude intérieur)

1.14.2.1 Fonctionnement

Le jus entre par le haut et sort par le bas du réservoir externe par une circulation naturelle tandis que l'eau chaude entre par le haut et sort par le bas du réservoir interne en circulation forcée. La figure 3-1 en est une parfaite illustration :

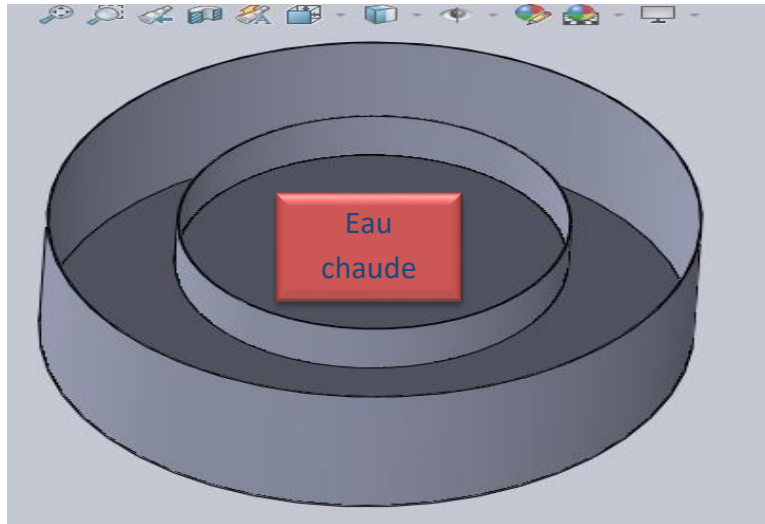


Figure 0-1 : pasteurisateur à 2 cylindres coaxiaux dont le jus circule dans le cylindre externe et l'eau chaude dans le cylindre interne

1.14.2.2 Calcul des Coefficients convectif externe h_e , interne h_i et le coefficient global U

❖ Les paramètres adimensionnels et le Coefficient de convection externe h_e

Pour le calcul de h_e , nous allons considérer une convection naturelle dans le réservoir de jus ou le mouvement du fluide est engendré par les forces d'Archimède dues aux variations de la masse volumique avec la température. Nous calculerons ici les nombres adimensionnels de Grashof et de Prandtl. Ensuite, le nombre de Rayleigh, puis nous déterminerons le nombre de Nusselt par application de la corrélation correspondante.

✚ Nombre de Grashof

Le nombre de Grashof caractérise l'écoulement en convection naturelle. Il est défini par :

$$\mathbf{Gr} = \frac{\mathbf{G} \times \beta \times \rho_f^2 \times d_{ij}^3 \times \Delta T}{\mu_f^2} \quad \mathbf{0-3}$$

La variation de température entre le jus et la paroi externe du réservoir d'eau chaude sera prise à 1°C compte tenu du fait que l'échangeur (la surface externe du réservoir d'eau chaude) est entièrement immergé dans le jus.

$$\mathbf{Gr} = 53824612,82,$$

$$\mathbf{Gr} < 10^9$$

On a un écoulement laminaire

✚ Nombre de Prandtl

C'est le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement (viscosité cinématique) et celle de la chaleur (diffusivité thermique). Elle compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide. Il est défini par :

$$\mathbf{Pr_f} = \frac{c_{p_f} \times \mu_f}{\lambda_f} \quad \mathbf{0-4}$$

$$Pr_f = 6,96$$

✚ Nombre de Rayleigh

C'est un nombre adimensionnel utilisé en mécanique des fluides et caractérisant le type de transfert de chaleur au sein d'un fluide à travers une valeur critique (1700). Si le nombre est inférieur à cette valeur, le transfert de chaleur s'opère par une simple conduction et au cas contraire on a une convection naturelle ou forcée. Il est défini par :

$$\mathbf{Ra} = \mathbf{Pr_f} \times \mathbf{Gr} \quad \mathbf{0-5}$$

$$Ra = 374619305,20$$

✚ Nombre Nusselt

C'est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser le type de transfert thermique entre un fluide et une paroi en mettant en rapport la convection par rapport à la conduction. La formule suivante correspond au cas d'un régime laminaire c'est-à-dire $Gr < 10^9$ [19].

$$\mathbf{Nu_f} = \mathbf{0,508} \times \frac{\mathbf{Pr_f}^{\frac{1}{2}}}{(\mathbf{0,95} + \mathbf{Pr_f})^{\frac{1}{4}}} \times \mathbf{Gr}^{\frac{1}{4}} \quad \mathbf{0-6}$$

$$Nu_f = 68,44$$

✚ Coefficient externe h_e

$$\mathbf{h_e} = \frac{\lambda_c \times \mathbf{Nu_c}}{d_{ej}} \quad \mathbf{0-7}$$

$$h_e = 135,97 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

❖ Les paramètres adimensionnels et le Coefficient de convection interne h_i

Dans cette rubrique, l'eau chaude circule de façon forcée dans le réservoir interne tandis que le jus circule toujours dans le réservoir externe.

✚ Nombre de Reynold

C'est un nombre adimensionnel caractérisant le type d'écoulement, en particulier son régime (laminaire, transitoire, turbulent).

$$\mathbf{Re_c} = \frac{\rho_c \times v_c \times d_{ej}}{\mu_c} \quad \mathbf{0-8}$$

$$Re_c = 318929,35$$

✚ Nombre de Prandtl

$$Pr_c = \frac{Cp_c \times \mu_c}{\lambda_c} \quad 0-9$$

$$Pr_c = 2,20$$

✚ Nombre de Nusselt

$$Nu_c = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr_c^{0,3} \quad 0-10$$

$$Nu_c = 736,90$$

✚ Calcul du coefficient d'échange interne

$$h_i = 4214 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

❖ Calcul du Coefficient d'échange global thermique

✚ résistance thermique globale

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{d_{ej}}{2 \times \lambda} \times \ln\left(\frac{d_{ej}}{d_{ij}}\right) + \frac{d_{ej}}{d_i} \times \frac{1}{h_i} \quad 0-11$$

$$\frac{1}{U} = 0,022 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

✚ Coefficient d'échange global thermique

$$U = 44,13 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

1.14.2.3 Calcul du flux de chaleur, de la surface d'échange, de la longueur et de son efficacité

✚ Flux de chaleur échangé

La chaleur se dirige toujours du fluide chaud vers le fluide froid et en faisant l'hypothèse que les échanges vers l'extérieur du système sont nuls, on peut exprimer le flux de chaleur échangé par la formule :

$$\phi = \frac{Q_f}{\Delta t} = \frac{m \times Cp_f \times \Delta T_f}{\Delta t} = \frac{Q_c}{\Delta t} = \frac{m \times Cp_c \times \Delta T_c}{\Delta t} \quad 0-12$$

La puissance échangée entre l'eau et le jus est de :

$$\phi = \dot{m}_f \times Cp_f \times (T_{sf} - T_{ef}) = \dot{m}_c \times Cp_c \times (T_{ce} - T_{cs})$$

$$\phi = 7524 \text{ W}$$

✚ Détermination de la surface d'échange de chaleur

$$\phi = U \times S_{ech} \times (T_c - T_f) \quad 0-13$$

$$S_{ech} = \frac{\phi}{U \times (T_c - T_f)}$$

$$S_{ech} = 2,43 \text{ m}^2$$

✚ Détermination de la longueur de l'échangeur

$$L = \frac{S_{ech}}{\pi \times d_{ej}} \quad 0-14$$

$$L = 2,56 \text{ m}$$

✚ l'efficacité de la surface d'échange

Pour caractériser les performances thermiques d'un échangeur, la démarche la plus naturelle paraît être la comparaison de sa puissance thermique ϕ au flux maximum ϕ_{\max} défini par la formule :

$$\phi_{\max} = q_{t\min}(T_{ce} - T_{fe}) \quad \mathbf{0-15}$$

Nous savons que quel que soit le modèle d'échangeur, aucun des fluides ne peut subir une variation de température supérieure à $(T_{ce} - T_{fe})$, car il faudra alors que le fluide froid sorte à une température supérieure à T_{ce} ou que le fluide chaud sorte à une température inférieure à T_{fe} , ce qui est physiquement impossible.

On définit ainsi « l'efficacité thermique E » de l'échangeur par :

$$E = \frac{\phi}{\phi_{\max}} \quad \mathbf{0-16}$$

D'après (10), (13) et (14) on a :

$$E = \frac{q_{tc}(T_{ce}-T_{cs})}{q_{t\min}(T_{ce}-T_{fe})} = \frac{q_{tf}(T_{fs}-T_{fe})}{q_{t\min}(T_{ce}-T_{fe})} \quad \mathbf{0-17}$$

Avec q_t : le débit thermique unitaire ou débit de capacité calorifique de formule :

$$q_t = q_m \times c_p = \dot{m} \times c_p$$

L'efficacité relative du côté fluide chaud est donné par :

$$E_c = \frac{(T_{ce}-T_{cs})}{(T_{ce}-T_{fe})} \quad \mathbf{0-18}$$

L'efficacité relative du côté fluide froid est donné par :

$$E_f = \frac{(T_{fs}-T_{fe})}{(T_{ce}-T_{fe})} \quad \mathbf{0-19}$$

Si $q_{t\min} = q_{tc}$, $E = E_c$ et si $q_{t\min} = q_{tf}$, $E = E_f$

❖ Calcul de la température de sortie de l'eau chaude

$$T_{cs} = T_{ce} - \frac{\phi}{q_{tc}} \quad \mathbf{0-20}$$

$$T_{cs} = 81 \text{ }^\circ\text{C}$$

❖ Calcul de l'efficacité

$$q_{tf} = 125,4 \text{ W/K}$$

$$q_{tc} = 789,95 \text{ W/K}$$

$$q_{tc} > q_{tf} \rightarrow q_{tf} = q_{t\min}$$

$$E = E_f = \frac{(81-80)}{(90-20)} = 79,85\%$$

1.14.3 Le cas où on a 2 cylindres coaxiaux dont le diamètre du réservoir (cylindre) de jus est inférieur à celui du réservoir d'eau chaude (jus intérieur et eau chaude extérieur)

1.14.3.1 Fonctionnement

Le jus entre par le haut et sort par le bas du réservoir interne par une circulation naturelle tandis que l'eau chaude suit une circulation forcée dans le réservoir externe comme le montre la figure 0-2.

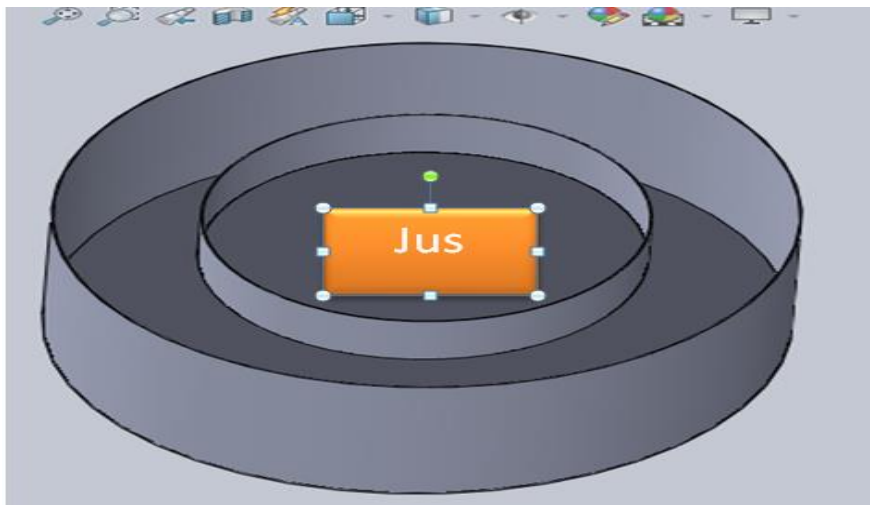


Figure 0-3 : pasteurisateur à 2 cylindres coaxiaux dont le jus circule dans le cylindre interne et l'eau chaude dans le cylindre externe.

1.14.3.2 calcul du Coefficient convectif externe h_e , interne h_i et le coefficient global U

En suivant la méthode de la section précédente, nous déterminons tous les coefficients.

❖ **Les paramètres adimensionnels et le Coefficient de convection externe h_e**

✚ **Nombre de Reynolds**

Le nombre de Reynolds ici est de $Re_c=321055,50$, ce qui est largement supérieur à 2 000 d'où un régime d'écoulement turbulent.

✚ **Nombre de Prandtl**

$$Pr_c = 2,20$$

✚ **Nombre Nusselt**

$$Nu_c = 68,44$$

✚ **Coefficient externe h_e**

$$h_e = 1471,85 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

❖ **Les paramètres adimensionnels et le Coefficient de convection interne h_i**

✚ **Le nombre de Grashof**

$$Gr = 81648556.3$$

✚ **Nombre de Prandtl**

$$Pr_f = 6,96$$

✚ **Nombre de Rayleigh**

$$Ra = 568273951,8$$

✚ **Nombre de Nusselt**

$$Nu_f = 75,96$$

✚ **Calcul du coefficient d'échange interne**

$$h_i = 151,92 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

❖ **Calcul du Coefficient d'échange global thermique**

✚ **résistance thermique globale**

$$\frac{1}{U} = 0,0219 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

✚ **Coefficient d'échange global thermique**

$$U = 45,55 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

1.14.3.3 Calcul du flux de chaleur, de la surface d'échange, de la longueur et de son efficacité

✚ **Flux de chaleur échangé**

La puissance échangée entre l'eau et le jus est de: $\phi = 7524 \text{ W}$.

✚ **Détermination de la surface d'échange de chaleur**

$$S_{ech} = 2,35 \text{ m}^2$$

✚ **Détermination de la longueur d'échange**

$$L = 2,47 \text{ m}$$

✚ **l'efficacité de la surface d'échange**

❖ **Calcul de la température de sortie de l'eau chaude**

$$T_{cs} = 81 \text{ }^\circ\text{C}$$

✚ **Calcul de l'efficacité**

$$E = 79,85\%$$

1.14.4 Cas où l'échangeur est un serpentin plongé dans une cuve dont le jus est versé dans la cuve et l'eau chaude circule dans le serpentin

1.14.4.1 Fonctionnement

Notre pasteurisateur est essentiellement composé de deux parties (Figure 0-4) ; un réservoir supérieur contenant de l'eau chaude, et un réservoir inférieur à l'intérieur duquel se trouve un échangeur en serpentin immergé dans un fluide froid (jus).



Figure 0-5 : Schéma du principe de fonctionnement [11].

1.14.4.2 Calcul du Coefficient convectif externe h_e , interne h_i et le coefficient global U

Certains calculs sont nécessaires avant la détermination de notre coefficient global convectif. Ce sont : la section de passage et la vitesse d'écoulement du jus.

Tableau 0-4 : les données de la surface d'échange.

Désignations sur le serpentin	Symboles	Valeurs	Unités
Diamètre interne	d_i	0,02	m
Diamètre externe	d_e	0,022	m

✚ Section de passage :

$$S_p = \frac{\pi \times d_i^2}{4} \quad \text{0-21}$$

$$S_p = 0,000315 \text{ m}^2$$

✚ Vitesse de circulation (naturelle) du jus

$$V_f = 0,088 \text{ m/s}$$

❖ les paramètres adimensionnels et le coefficient convectif externe

✚ Nombre de Grashoff

$$Gr = 20807,894$$

✚ Nombre de Prandtl

$$Pr_f = 6,966$$

✚ Nombre de Nusselt

$$Nu_f = 9,600$$

✚ Coefficient externe h_e

$$h_e = 261,827 \text{ W/m}^2\text{K}$$

❖ les paramètres adimensionnels et le coefficient convectif interne

✚ Nombre de Reynolds

$$Re_c = 24509,460$$

✚ Nombre de Prandtl

$$Pr_C = 2,207$$

✚ Nombre de Nusselt

$$Nu_c = 94,696$$

✚ Coefficient externe h_i

$$h_i = 2840,905 \text{ W/m}^2\text{K}$$

❖ Calcul du Coefficient d'échange global thermique

✚ résistance thermique globale

$$\frac{1}{U} = 0,00579 \text{ m}^2\text{K/W}$$

✚ Coefficient d'échange global thermique

$$U = 172,56 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

1.14.4.3 Calcul du flux de chaleur, des dimensions du serpentin et de son efficacité

✚ Flux de chaleur échangé

La puissance échangée entre l'eau et le jus est de : $\phi = 7524 \text{ W}$

✚ Détermination de la surface d'échange

$$S_{ech} = 4,360 \text{ m}^2$$

✚ Détermination de la longueur du serpentin

$$L = 63,08 \text{ m}$$

✚ Nombre de spire

On pose diamètre spire $d_{sp} = 0,4 \text{ m}$

$$n = \frac{L}{\pi \times d_{sp}} \quad \text{0-22}$$

$$n = 50$$

✚ Hauteur du serpentin

$$h_s = (2 \times n - 1) \times d_e \quad 0-23$$

$$h_s = 2,178 \text{ m}$$

✚ l'efficacité de la surface d'échange

❖ Calcul de la température de sortie de l'eau chaude

$$T_{cs} = 81 \text{ °C}$$

✚ Calcul de l'efficacité

$$E = 79,95 \%$$

1.14.5 Cas où l'échangeur est un serpentin plongé dans un cylindre dont le jus circule dans le serpentin et l'eau chaude dans le réservoir externe

1.14.5.1 Fonctionnement

C'est le même principe que le cas précédent. Cependant le jus circule dans le serpentin et l'eau chaude dans le réservoir inférieur selon la figure 3.4 suivante.



Figure 0-6 : fonctionnement du pasteurisateur

1.14.5.2 Calcul du Coefficient convectif externe h_e , interne h_i et le coefficient global

❖ paramètres adimensionnels, coefficient convectif externe h_e

On considère qu'on a un écoulement forcé pour les deux fluides

✚ Nombre de Reynolds

$$Re_c = 24509,460$$

✚ Nombre de Prandtl

$$Pr_f = 2,207$$

✚ Nombre de Nusselt

$$Nu_c = 94,696$$

✚ Coefficient externe h_e

$$h_e = 2582,618 \text{ W/m}^2\text{K}$$

❖ Paramètres adimensionnels et h_i

✚ Nombre de Reynolds

$$Re_f = 6926,12$$

✚ Nombre de Prandtl

$$Pr_f = 6,966$$

✚ Nombre de Nusselt

$$Nu_f = 48,64$$

✚ Coefficient externe h_i

$$h_i = 1459,2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

❖ Calcul du coefficient thermique global

✚ Résistance thermique global

$$1/U = 0,0011 \text{ m}^2\text{K/W}$$

✚ Coefficient d'échange global thermique

$$U = 909,090 \text{ W/m}^2\text{K}$$

1.14.5.3 Détermination du Flux de chaleur échange, des dimensions du serpentin et des réservoirs d'eau chaude et du jus et l'efficacité du serpentin

✚ Le flux

$$\phi = 7524 \text{ W}$$

✚ La surface d'échange

$$S_{ech} = 0,082 \text{ m}^2$$

✚ La longueur de la surface d'échange

$$L = 11,86 \text{ m}$$

✚ Nombre de spire

$$\text{Soit } d_{sp} = 0,4 \text{ m}$$

$n = 18,87$; on prend $n = 20$ spires

Hauteur du serpentin

$h_s = 0,858$ m ; soit 85,8 cm

Dimensionnement du réservoir d'eau chaude et du jus

On pose $d_{ri} = 0,4$ m et $v_{ri} = 0,1$ m³.

Hauteur du réservoir d'eau et de jus

$h_{res} = 0,79$ m

Calcul de l'efficacité de la surface d'échange

❖ **Calcul de la température de sortie de l'eau chaude**

$T_{cs} = 81$ °C

❖ **Calcul de l'efficacité**

$E = 79,85$ %

1.15 Choix du meilleur pasteurisateur pour notre étude

Le tableau 3.5 ci-dessous résume les calculs de dimensionnement pour les quatre cas de dimensionnement.

Tableau 0-5 : Etude comparative du dimensionnement des quatre surfaces d'échanges.

		Cylindres coaxiaux		Cylindre contenant un serpentin	
désignations	unités	Jus circulant dans le cylindre interne	Jus circulant dans le cylindre externe	Jus circulant dans le serpentin	Jus circulant dans la cuve contenant le serpent.
Flux de chaleur échangé	W	7524			
Section de passage	m ²	0,0005	0,0005	0,00008	0,00008

Vitesse d'écoulement jus	m/s	0,4	0,4	0,347	0,347
Coefficient d'échange global	W/m ² .K	45,55	44,13	909,090	172,56
Surface de l'échangeur	m ²	2,35	2,43	0,82	4,360
Longueur de l'échangeur	m	2,47	2,56	11,86	63,08
Nombre de spires				20	50
Efficacité de la surface d'échange	%	79,85			

Pour un même flux de chaleur à échanger, un même volume de fluide caloporteur et pour une même efficacité des échangeurs, nous avons un coefficient d'échange global plus important dans le cas où le jus circule dans le serpent. Nous constatons aussi que ce coefficient d'échange est plus important lorsque l'échange de chaleur se fait de l'extérieur vers l'intérieur.

Ces coefficients calculés respectent bien l'ordre de grandeurs des coefficients globaux des fluides en fonction de leurs viscosités pour le cas où le jus circule dans le serpent. Pour les autres cas, ils sont inférieurs à l'intervalle de grandeur présenté. Cela est sans doute dû au fait que la quantité de chaleur est supérieure lorsque le transfert se fait de l'extérieur vers l'intérieur.

En effet la surface extérieure étant plus importante, le volume d'eau chaude extérieur est plus important d'où l'augmentation du coefficient d'échange global. Le tableau 3.6 ci-dessous présente l'ordre de grandeur du coefficient d'échange global.

Tableau 0-6 : Ordre de grandeur du coefficient global d'échange [11].

Fluide chaud	Fluide froid	U_s (W/m ² ·K)
Gaz	Gaz	10 – 50
Gaz	Liquide visqueux	20 – 50
Gaz	Liquide peu visqueux	20 – 80
Liquide visqueux	Gaz	20 – 50
Liquide peu visqueux	Gaz	20 – 80
Liquide visqueux	Liquide visqueux	100 – 200
Liquide visqueux	Liquide peu visqueux	100 – 300
Liquide peu visqueux	Liquide peu visqueux	700 – 1800
Vapeur se condensant	Liquide visqueux	200 – 400
Vapeur se condensant	Liquide peu visqueux	1000 – 2000
Vapeur se condensant	Liquide en ébullition	700 – 1500

Le tableau ci-dessus montre l'ordre de grandeur des coefficients globaux des fluides en fonction de leurs viscosités. En ce qui concerne l'échange de chaleur entre (liquide peu visqueux- liquide peu visqueux), le coefficient d'échange global varie entre 700 W/m².K et 1800 W/m².K. Ce qui correspond bien à notre cas d'étude.

Notre choix du pasteurisateur va donc porter sur le quatrième cas pour la suite de notre étude.

La figure 3.5 suivante obtenue par le logiciel solideworks en est une parfaite illustration.

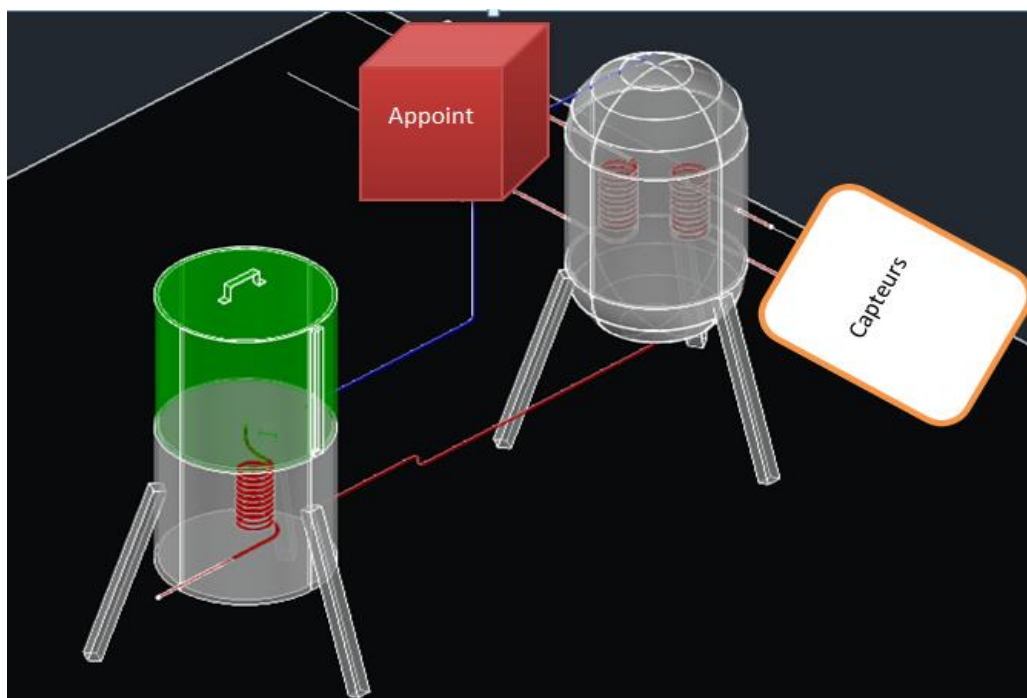


Figure 0-7 : fonctionnement du pasteurisateur (dessin fait sur solideworks)

1.16 Dimensionnement des capteurs

Pour l'estimation de l'énergie reçue par le capteur, un bilan thermique pour chaque composant s'avère nécessaire en évaluant les gains et les pertes. Dans cette étude nous allons utiliser les capteurs plans dont leur rendement varie entre 40% et 60%.

❖ Calcul de la puissance solaire incidente transmise à l'absorbeur

$$P_i = \frac{\phi}{\eta_{th}} \quad \mathbf{0-24}$$

Avec :

$\eta_{th} = 60 \%$: Le rendement thermique du capteur ;

$\phi = 7524 \text{ W}$: La puissance nécessaire pour la pasteurisation.

$$P_i = \mathbf{12540 \text{ W}}$$

On suppose que la puissance solaire incidente reçue par l'absorbeur est entièrement restituée au fluide caloporteur.

❖ Calcul de la surface de captation

La Surface de capteur nécessaire pour produire la puissance totale requise est de :

$$S = \frac{P_i}{E_s} \quad \mathbf{0-25}$$

Avec :

$E_s = 700 \text{ W/m}^2$: Ensoleillement ou puissance de rayonnement disponible.

$$S = \mathbf{17,91 \text{ m}^2}, \text{ Soient six (6) capteurs de } \mathbf{3 \text{ m}^2}.$$

1.17 Choix des autres équipements et accessoires

Les équipements et accessoires de notre pasteurisateur ont été définis en fonction de leur disponibilité et en fonction de plusieurs paramètres tels que : température de fonctionnement, pertes de charges et du débit du liquide.

1.18 Simulation numérique

Dans cette partie nous avons étudié le phénomène de transfert thermique s'effectuant à travers notre serpentin en faisant la simulation numérique grâce au logiciel ANSYS FLUENT.

1.18.1 Présentation du logiciel de simulation

ANSYS FLUENT est un logiciel qui permet de résoudre et simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques par la méthode des volumes finis à travers des codes CFD (Computational Fluid Dynamics). Ces codes CDF communément désignés en

français par le terme Mécanique des Fluides Numériques (MNF) sont structurés autour des algorithmes numériques qui permettent aux utilisateurs d'introduire les paramètres d'entrée du problème (les inputs) afin d'examiner les résultats (les outputs).

En toute généralité le mode de fonctionnement de ces codes passe par trois étapes essentielles: le prétraitement, la résolution et pour finir le post-traitement axé sur la visualisation des résultats comme le montre la figure 3-6.

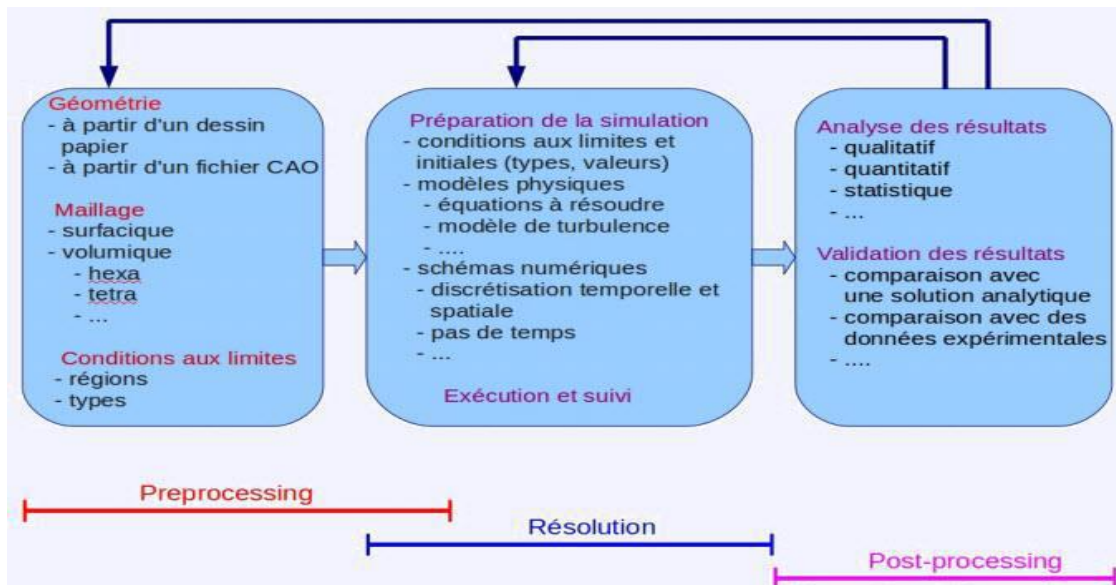


Figure 0-8 : Les étapes de la simulation numérique [20].

1.18.2 Resultats et discussions

1.18.2.1 Le maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu son influence sur la solution calculée. Un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. La qualité du maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul. Un bon maillage doit également être suffisamment lisse comme le montre la figure 3.7.

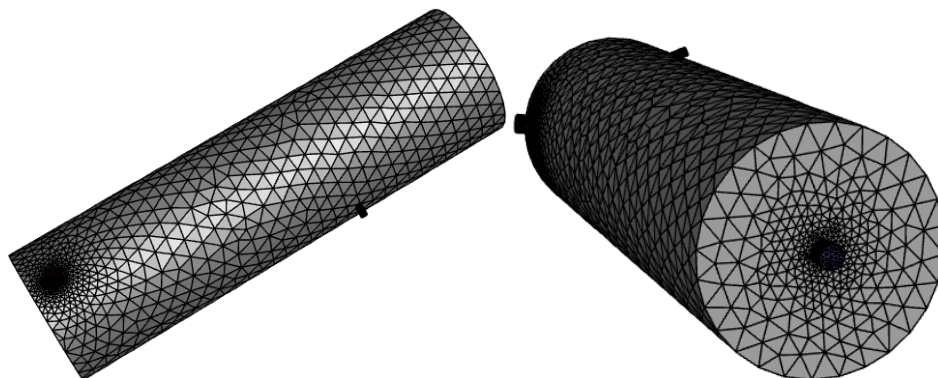


Figure 0-9 : Maillage

1.18.2.2 Variation des températures

La température du jus varie en fonction de sa vitesse d'écoulement et de la vitesse de circulation de l'eau chaude. Les figures suivantes en sont une parfaite illustration :

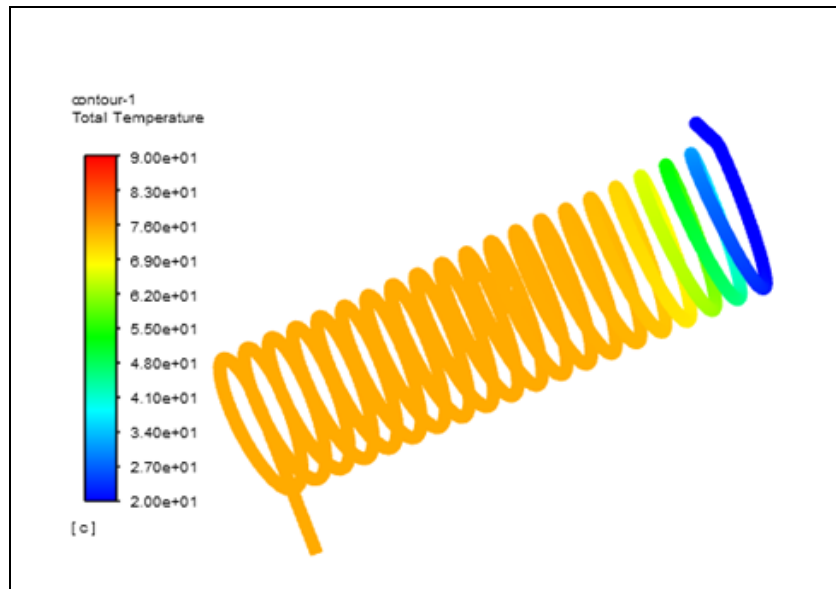


Figure 0-10 : Variation de la température pour une vitesse du jus $V = 0.347$ m/s

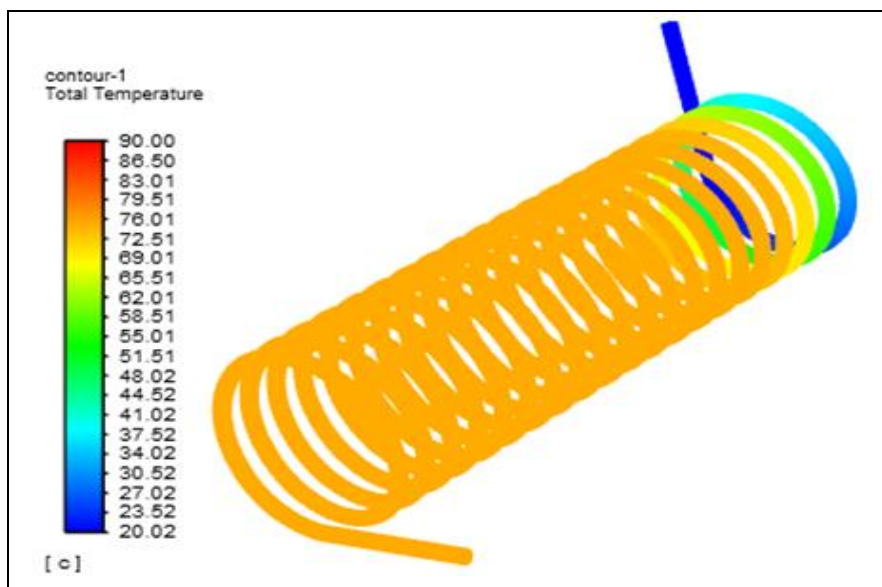


Figure 0-11 : variation de la température pour une vitesse du jus $V = 0.1$ m/s

Après simulation, on a constaté que la température de sortie du jus est de $T_s = 76$ °C pour une vitesse de jus $v_j = 0.347$ m/s et $T_s = 80$ °C pour une vitesse de jus $v_j = 0.1$ m/s. De plus on constate aussi que le jus atteint ces premiers pics de chaleur (en bleue) dès son entrée dans le serpentin lorsqu'on augmente la vitesse de circulation de l'eau chaude. La température de sortie du jus augmente considérablement lorsqu'on diminue la vitesse de circulation du jus.

En effet plus la circulation de l'eau chaude est rapide et plus l'écoulement du jus est attardé, plus le jus gagne en chaleur en une durée réduite.

1.19 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les dimensions de notre pasteurisateur solaire et étudié le phénomène d'échanges thermiques ayant lieu au sein du système. Les codes CDF nous ont permis d'introduire les paramètres d'entrée du problème (les inputs) afin d'examiner les résultats (les outputs). Les résultats obtenus montrent que la température de sortie du jus peut atteindre la température de stérilisation (supérieur à 100 °C) lorsqu'on diminue la vitesse de circulation du jus et augmente celle du fluide caloporteur. Ceci montre que notre pasteurisateur peut aussi fonctionner comme un stérilisateur.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de notre étude, nous notons que, le serpentin utilisé comme échangeur de chaleur semble être le compromis idéal pour le fonctionnement de notre pasteurisateur. Il nécessite moins de matière à la réalisation, plus accessible que le cylindre et est moins coûteux.

Le coût global de fabrication de notre prototype est donc estimé à **2915750 FCFA** (voir annexe). Sa production est fixée à 100 L/h avec un temps de conservation du jus estimée à plus d'un an. Cependant, il convient de noter que la conception de notre machine étant terminée, sa réalisation et son essai devraient faire l'objet d'une seconde étude afin de vérifier nos résultats théoriques.

Ce procédé reste intéressant aussi bien pour les petites et moyennes entreprises que pour les grandes entreprises industrielles, de par son utilisation et sa maintenance aisées. De plus, il sera doté d'une technologie automatique, un véritable atout pour les entreprises évoluant dans le secteur. En ce qui nous concerne, notre séjour au CERER et notre visite au GIE DEMIR de Ziguinchor ont été d'un grand intérêt car ils nous ont permis de pouvoir concilier les connaissances théoriques acquises au cours de notre formation et les connaissances pratiques acquises sur le terrain. Ce stage nous a permis également d'acquérir une expérience dans le domaine des transferts thermiques, de connaître les logiciels tels que Solideworks et Ansys et de nous confronter aux réalités du milieu professionnel. Au vu des résultats de notre étude, nous pouvons dire que la commercialisation de notre pasteurisateur serait un atout en termes d'hygiène et de sécurité alimentaire, mais aussi il permettra d'alléger les charges liées à la conservation des jus, notamment dans les chambres froides, et réduira ainsi les factures d'électricité des producteurs. Cependant, il convient de se poser la question suivante : « **les coûts actuels des matières et les charges liées à la conception de ce prototype peuvent-ils réellement le rendre accessible ?** »

Pour un jeune entrepreneur, vendre le pasteurisateur serait une mauvaise idée. Le prix ne sera pas accessible pour bon nombre d'entreprise surtout les GIE de femme évoluant dans la transformation des produits agroalimentaires. Il serait plus judicieux d'ouvrir des unités de vente de service. Ainsi ceux qui veulent pasteuriser leurs produits pourraient venir et ensuite payer le service. De plus, pour augmenter de la valeur ajoutée à cette entreprise, on pourrait créer un autre service comme le séchage des produits agroalimentaires. Cependant l'idée de concevoir des pasteurisateurs et de les vendre ne sera pas exclue.

PERSPECTIVES

Il est vrai que cette innovation demeure une alternative aux problèmes de conservations des jus. Mais, il faut noter que certain aspect tel que le coût d'investissement demeure une problématique à sa vulgarisation. Ainsi, nous recommandons la réalisation physique du prototype, son expérimentation et la confrontation de ces mesures avec nos résultats théoriques afin d'améliorer sa conception. Des expérimentations sur les jus, principalement le jus de pomme de cajou sont envisagées afin d'avoir des données réelles sur le produit à pasteuriser. Aussi des études poussées doivent être prévues pour la pasteurisation des produits visqueux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **C. FADIA**, «Recherche et caractérisation des bacilles thermophiles dans le lait pasteurisé de vache et le lait recombinaé,» Mémoire de master, Université Aboubekr BELKAID Tlemcen, Tlemcen(Algérie), 2013, 62p.
- [2] **P. CHILLET**. Opérations unitaires en génie biologique. Bordeaux : CRDP d'Aquitaine, 2011, 19p.
- [3] **M. AAMIR**,¹ **M. OVISSIPOUR**,¹ **S. S. SABLANI**,² and **B. RASCOL**. Predicting the Quality of Pasteurized Vegetables Using Kinetic Models: A Review. In : Hindawi Publishing Corporation. International Journal of Food Science, Volume 2013, Article. ID 271271, 29 pages. Disponible sur <http://dx.doi.org/10.1155/2013/271271>.
- [4] **K. REINEKE**, **A. MATHYS** and **D. KNORR**. Shift of pH Value During Thermal Treatments in Buffer Solutions and Selected Foods. In : International Journal of Food Properties, 14:870–881, 2011, Copyright © Taylor & Francis Group, LLC, ISSN: 1094-2912 print / 1532-2386 online, DOI: 10.1080/10942910903456978.
- [5] **A. BOUTAKIOUT**, Etude physico-chimique, biochimique et stabilité d'un nouveau produit : jus de cladode du figuier de Barbarie marocain (*Opuntia ficus-indica* et *Opuntia megacantha*). Thèse de doctorat : Agroalimentaire. Maroc: Université de Sultan Moulay Slimane, 2015, 212p.
- [6] **H. G. FREITAS**, «Technologie des chauffe-eaux solaires industriels pour la pasteurisation du lait,» Mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Burkina, 2012, 60p.
- [7] **G. CORNIER**, **D. COLIN**, **L. GUIHIARD**, **A. LE BAIL**, **M. LEROY**, **Y. ORCIL**, **M.H. RANNOU**, **J.L. VALLE**. Etude, conception et expérimentation d'un pasteurisateur industriel pour la préparation des plats cuisinés en cycle court, 1994, 86p.
- [8] « Conservation-des-aliments: toutes les techniques ». [https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Publications/Vie/-pratique/Fiches pratiques/Conservation-des-aliments](https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Publications/Vie/-pratique/Fiches_pratiques/Conservation-des-aliments) (consulté le mars 13, 2021).
- [9] « La pasteurisation ». <https://www.jus-de-pomme.org/index.php/comprendre/la-pasteurisation> (consulté le mai 10, 2021).

- [10] « Capteurs chauffe-eau solaire production d'eau chaude : Principe ». <https://www.picbleu.fr/page/chauffage-production-eau-chaude-panneaux-solaires-principes> (consulté le mai 23, 2021).
- [11] **A. A. FOFANA** « Conception d'un pasteurisateur de jus: cas du jus de pomme de cajou,» Mémoire de Master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie), cote d'ivoire, 2017, 72p.
- [12] « Snapshot ». Consulté le: mai 20, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://journals.openedition.org/vertigo/28723>
- [13] **A. MARC**, «caractérisation physico-chimique et toxicologique et étude de la stabilité des jus de différentes variétés de pommes d'anacarde (anacardium occidentale.) Issu de trois zones écologiques de la cote d'ivoire» Thèse de doctorat : Biochimie et Technologie des Aliments. Abidjan (côte d'ivoire): Université Nangui Abrogoua, 2013, 202p
- [14] **J¹. Dossou, R.H. ^{2,3} Ahouansou, C. A. K¹ Sanya, V. Ahyi ⁴**. Etude des performances techniques d'un filtre-presse pour la filtration du jus de pomme d'anacarde (Anacardium occidentale L.) In : African Journal of Food Agriculture. Nutrition and Development, Volume 2019, 19(3): 14690-14707 DOI: 10.18697/ajfand.86.17380.
- [15] « Capteurs chauffe-eau solaire production d'eau chaude : Principe ». <https://www.picbleu.fr/page/chauffage-production-eau-chaude-panneaux-solaires-principes> (consulté le mai 23, 2021).
- [16] **F. VEYNANDT, R. MOSCHIK**. Capteurs solaires. France : AEE - Institute for Sustainable Technologies (AEE INTEC), 75p.
- [17] **N. DIOP**, «conception d'un séchoir solaire hybride pour le séchage de la papaye,» Mémoire de Master en Génies et Energies Renouvelables, Ecole Polytechnique de Thiès, Thiès, 2020, 97p.
- [18] « Water - Density Viscosity Specific Weight | Engineering Reference and Online Tools ». https://www.engineersedge.com/physics/water__density_viscosity_specific_weight_13146.htm (consulté le sept. 13, 2021).
- [19] **P. MARTY** « Transferts thermiques convectifs ». Grenoble : Université Joseph FOURRIER . Version modifiée le 9 Juillet 2012, 30p.
- [20] « Dwyer Hot Water Thermometer, HWT250, 30-250°F (0-120°C), 2" Dial: Science Lab Bi Metal Thermometers: Amazon.com: Industrial & Scientific ».

<https://www.amazon.com/Dwyer-COMINHKPR58802-Hot-Water-Thermometer/dp/B00F34S4DI> (consulté le sept. 13, 2021).

[21] **O. TALLA** «Etude, conception et simulation d'un distillateur solaire symétrique à effet de serre,» Mémoire de Master en ingénierie de conception, Institut Supérieur de Technologique Industrielle, Dakar, 2019, 140p.

Annexes

Annexe A: Aspects socio-économiques et environnementaux du projet

- Aspects économiques
- ❖ Détermination du prix commercial du pasteurisateur

Le prix des différents constituants du pasteurisateur sont donnés dans le tableau A.1. Si on admet que la production journalière est de **600 l/jour** pendant toute l'année (pendant la période hivernale la production est négligeable), on trouve que la production annuelle (**M**) est de 162000 l (9 mois de l'année). Le coût total initial (**P**) de notre pasteurisateur est de **2915750 FCFA**. Si on fixe une marge de 30 % sur le cout initial, cela nous amènera à commercialiser le pasteurisateur à un prix de **3790475 FCFA**.

Tableau A.1 : cout de débit matière

Désignations	UM	nombre	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)
Matières				
Tôle plane Inox (TPI), feuille de 2000x1000x2	feuille	4	77000	308000
Tôle plane Inox (TPI), feuille de 2000x1000x3	feuille	3	115000	345000
Tôle plane Aluminium, feuille de 2000x1000x8/10è	feuille	4	20000	80000
Vitre plane épr.2 (dimension: 200x40)	feuille	1	9000	9000
Rond Inox Ø12 - barre de 6 m/l	barre	2	25000	50000
Rond Inox Ø 20 - barre de 6 m/l	barre	1	77000	75000
Rond Inox Ø 30 - barre de 6 m/l	barre	2	200000	400000
Tube acier Inox Øext 12; ép. 1 - barre de 6 m/l	barre	4	5000	20000

Tige filetée M8 - barre de 1m/l	barre	1	20000	20000
Laine de roche - rouleau de 5m/l	rouleau	2	9000	18000
Cout matières				1325000
Fournitures				
Thermomètre à sonde : 0 - 100° C	-	1	21000	21000
Robinet à boisseau sphérique DN 8 (ou disponible)	-	1	12000	12000
Vannes coudée en inox avec thermo débitmètre	-	1	28000	28000
Ballon de stockage d'eau chaude	-	1	370000	370000
Capteurs solaires	-	3	250000	250000
Résistance chauffante pour appoint (8000w)	Watt	1	260000	260000
Circulateur			170000	170000
Régulateur	-	1	16000	16000
Cout fournitures				1127000
Main d'œuvre				
Main d'œuvre(35% cout matieres)	-	1	463750	463750
COUT TOTAL				2915750

❖ Analyse économique du projet

Les coûts d'investissement et de fonctionnement d'une unité de pasteurisation sont influencés par la taille de l'unité, l'emplacement du site, les propriétés physico-chimiques du produit à pasteuriser, la disponibilité d'un personnel qualifié, etc. Le meilleur **retour économique de l'investissement** dépend du coût de production du produit pasteurisé et de son écoulement[33]. L'analyse économique de l'unité de pasteurisation est la suivante : Le **CFR** (facteur de recouvrement du capital), le **FAC** (coût annuel fixe), le **SFF** (facteur de fonds d'amortissement), l'**ASV** (valeur de récupération annuelle), **M** (production annuelle) et l'**AC** (coût annuel) sont les principaux paramètres de calcul utilisés dans l'analyse des coûts de l'unité de pasteurisation. L'**AMC** (coût d'exploitation annuel de maintenance) du pasteurisateur solaire est nécessaire pour le remplissage régulier du jus à état brut. Au fur et à mesure

que la vie du système passe, la maintenance augmente également. Par conséquent, 15 % du coût actuel fixe a été considéré comme un coût d'entretien. Enfin, le **CPL** (coût du jus pasteurisé par litre) peut être calculé en divisant le coût annuel du système (**AC**) par le rendement annuel du pasteurisateur solaire (**M**). Les paramètres de calcul mentionnés ci-dessus sont donnés dans le tableau **A.2** où **n** représente la durée de vie du pasteurisateur estimée à **10 ans (durée de vie de vie de la laine de verre)** et **i** le taux d'intérêt annuel fixé à **8 %** (Banque BICIS) [21].

Tableau A.2 : Calcul des paramètres d'analyse économique du pasteurisateur solaire.

Paramètres	Formules	Valeurs Unitaires	Valeurs à l'échelle de 50 (Production de 600 l/j)
CRF (facteur de recouvrement du capital)	$CRF = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$	0.15	-
SFF (facteur de fonds d'amortissement)	$SFF = \frac{i}{(1+i)^n - 1}$	0.07	-
P (coût total initial du pasteurisateur)	Coût matériels + fournitures + Main d'œuvre	2915750	145787500
FAC (coût annuel fixe)	$FAC = CRF \times P$	43736.5	218682.5
S (valeur de récupération)	$S = 0,2 \times P$	583150	29157500
M (productivité annuelle moyenne soit 9 mois)	$M = Production journalière \times nombre de jour = 600 \times 270$	162000 l/an	8100000
AMC (coût d'exploitation annuel de maintenance)	$AMC = 0,15 \times FAC$	65604.375	3280218.75
ASV (valeur de récupération annuelle)	$ASV = SFF \times S$	40820.5	2041025
AC (coût annuel) : cout de fonctionnement annuel	$AC = FAC + AMC - ASV$	462146.375	23107318.75
CPL (coût du jus pasteurisé par litre)	$CPL = AC / M$	2.85	142.5

D'après l'analyse économique donnée par le tableau IV-1, on conclut que le coût de fonctionnement annuel du pasteurisateur à l'unité est de 462146.375CFA et de 23107318.75FCFA dans le cas d'une

production à échelle de 50 unités, ce qui implique un coût de 2.85 **FCFA pour chaque litre de jus pasteurisé**. Par contre, si le taux d'intérêt annuel (i) est fixé à **3%**, les coûts annuels (AC) vont diminuer de **34%**. Cependant, le **coût du parc** (le terrain) et le **coût d'acquisition** de la matière première ne sont pas pris en compte.

- ❖ Calcul de la rentabilité du projet
- Etude comparative entre un pasteurisateur électrique et un pasteurisateur solaire

La majeure partie des industries agroalimentaires utilisent les technologies électriques pour faire leur pasteurisation. Ainsi on va essayer donc de faire une étude comparative entre cette technologie et celle du chauffe-eau solaire afin d'en tirer la plus rentable.

Tableau A.0-1 : Etude comparative

Désignation	Caractéristiques				Estimation du cout de l'énergie avec 90 FCFA le kWh			Cout d'investissement	
	Capa. (L)	Puiss. (watts)	Mise en tempé. (h)	Cons. énergétique (kWh) journalière	Cout journ. (FCFA)	Cout mens. (FCFA)	Cout Annuel en énergie (FCFA)	Prix des pasteurisateurs (FCFA)	Cout total
Pasteurisateur électrique	100	7524	6	45.144	13050	391500	4698000	1220000	5898000
Pasteurisateur solaire (pendant les 3 mois d'hivernages)	100	7524	6	45.144	13050	391500	1174500	3800000	4974500
Economie (%)						0	25		
Temps de retour sur investissement (investissement/économie) (3800000/1174500)									
3,2 ans environ 3ans 5 mois									

Du point de vue énergétique nous constatons bien une économie annuelle de 25% avec le pasteurisateur solaire. Ainsi on peut dire qu'en termes d'énergie, la technologie du chauffe-eau solaire industrielle est plus rentable que celle du chauffe-eau électrique.

L'investissement total minimal étant de 3800000 f CFA, la rentabilité ne serait possible que dans **(3800000/1174500)** ans. Soit dans 3 ans et 5 mois. Nous estimons donc que ce projet est aussi bien rentable pour des petites unités de production que pour les grandes industries.

- Valeur Ajoutée Comptable

En comptabilité, la valeur ajoutée (VA) est un indicateur économique qui mesure la richesse créée par un agent économique (entreprise, organisation...) au cours d'une période donnée. La valeur ajoutée est une donnée intéressante pour l'entreprise, car elle montre le niveau de richesse qu'elle crée, l'excédent d'argent qu'elle perçoit par rapport à son coût de production.

Le jus de cajou est commercialisé à 500 FCFA la bouteille de 33cl dans certaines entreprises comme le GIE DEMIR à Ziguinchor. La figure A.1 illustre un exemplaire de jus de cajou commercialisé dans les grandes surfaces. Dans notre étude, on fixe le prix d'un litre à 1500 FCFA.



Figure A.0-1 : bouteille de jus de cajou chez Zena[12].

Le projet est rentable si la Valeur Ajoutée Comptable (VAC) est **positive**. La VAC est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$VAC = \sum \text{ventes} - \sum \text{Dépenses} - \text{Investissement} \quad (1)$$

$$\text{Avec} \quad (2)$$

$$\sum \text{Ventes} = \sum_{n=1}^{10} (\text{Vente annuelle} \times \frac{(1+j)^n}{(1+i)^n})$$

j : représente le taux d'inflation, on suppose que le prix des matériaux ne varie pas (j = 0).

i : représente le taux intérêt annuel fixé à 8 %.

Les dépenses annuelles correspondent au coût annuel (AC) sont données dans le tableau A.3.

Le tableau A.2 donne le calcul de la rentabilité du projet. La valeur ajoutée comptable (VAC) est de 162 588 458FCA sur une année de production unitaire. Cependant, une diminution du taux d'intérêt entrainerait une augmentation du VAC ce qui pourrait compenser d'avantage les dépenses imprévues.

Tableau A.0-2 : Calcul de la rentabilité du projet

Année	Vente Annuelle	
	Production Unitaire (somme des ventes) (F CFA)	Production à échelle de cinquante (50) (F CFA)
1	225 000 000	11 250 000 000

2	208 333 333	10 416 666 667
3	192 901 235	9 645 061 728
4	178 612 254	8 930 612 711
5	165 381 717	8 269 085 844
6	153 131 219	7 656 560 967
7	141 788 166	7 089 408 302
8	131 285 339	6 564 266 947
9	121 560 499	6 078 024 951
10	112 556 018	5 627 800 880
Somme des Ventes (sur 10 ans)	1 630 549 780	81 527 488 997
Coût annuel (AC)	462 146.375	23107318.75
AC (sur 10 ans)	4621463.75	231073187.5
Investissement	43736.5	218682.5
Valeur Ajoutée Comptable (VAC)	1625884580	81296197130000000000
VAC sur une année	162 588 458	8 129 619 713 000 000 000

Nous constatons bien que la VAC trouvée est bien positive ; nous pouvons donc conclure que le projet est bien rentable.

Annexe B : Importance de la pasteurisation sur la société, avantages et limites

La pasteurisation est un processus par lequel certains aliments sont rapidement chauffés pendant une courte durée afin de tuer les bactéries qui pourraient vous rendre malade. Elles conservent la salubrité des aliments sans altérer les nutriments qu'ils contiennent. Le fait de consommer des aliments non pasteurisés pourrait provoquer de la fièvre, des vomissements et une diarrhée. Dans certains cas, cela peut notamment entraîner une insuffisance rénale, une fausse couche et même la mort. Les enfants, les

femmes enceintes, les personnes âgées et les personnes ayant un système immunitaire affaibli sont les plus à risque d'être malades après avoir consommé des aliments non pasteurisés.

La faisabilité technico-économique ne suffit pas à justifier la réalisation d'une machine, il faudrait en plus avoir un grand regard sur son impact.

Notre pasteurisateur bien qu'étant conçu pour répondre à des questions d'hygiène alimentaire, environnementales et d'efficacité énergétique, comporte aussi des limites au niveau de son utilisation.

➤ **Avantages**

Comme avantages, nous pouvons citer entre autres :

- source d'énergie variée pour le chauffage de l'eau (solaire à concentration, combustion biomasse et fossile, résistance électrique....),
- respect des normes d'hygiène alimentaire et de pasteurisation,
- utilisation et maintenance aisées,
- durée de vie estimée à dix ans (durée de vie de la laine de verre),
- indépendance à l'électricité et aux autres sources d'énergies fossiles.
- température de sortie du jus stable (car automatisé).

➤ **Limites**

Notre pasteurisateur a aussi des limites à savoir :

- inefficacité pour les aliments très visqueux (confiture, nectar, concentré...);
- conditionnement du jus à chaud;
- adapté aux productions industrielles et artisanales.

RESUME

La pasteurisation est un processus de conservation d'aliments qui consiste à les chauffer à une température donnée durant une durée bien déterminée avant un refroidissement brusque, de manière à éliminer un bon nombre de micro-organismes.

Dans cette étude, nous avons travaillé avec le CERER (centre d'études et de recherches sur les énergies renouvelables) où nous avons conçu et simulé un **pasteurisateur solaire** utilisant la technologie du chauffe-eau solaire à coût réduit. Cet appareil est destiné à pasteuriser les jus de fruits pour les industries ainsi que pour les consommateurs ruraux et urbains. D'un rendement de 100 L/h, cette machine sera entièrement en inox, compte tenu des normes de sécurité alimentaire et elle sera indépendante de l'énergie électrique pour son fonctionnement avec possibilité de **stockage thermique**.

Il est question de proposer, une solution basée sur la technologie solaire, pour qu'elle soit substituée au gaz (butane) ou à l'électricité, actuellement utilisés pour la pasteurisation pour la majeure partie des **agro-industries**. Cette technologie est celle des chauffe-eaux solaires, qui produira de **l'eau chaude** nécessaire à la pasteurisation.

Quatre cas d'études ont été menés dans les mêmes conditions de fonctionnement (débit, température, volume, section de passage du jus), à savoir :

- deux cylindres coaxiaux dont le jus circule à l'intérieur et l'eau chaude dans l'extérieur et vice versa ;
- un cylindre et un serpentin dont le jus circule à l'intérieur du serpentin et l'eau chaude à l'extérieur et vice versa.

Un programme de simulation numérique a été développé sur Ansys Fluent 2020 R1 pour étudier l'évolution de la température du jus à travers notre surface d'échange. Le cas où le jus circule dans le serpentin offre des résultats plus satisfaisants. Il est beaucoup plus accessible que les autres avec un coefficient d'échange global thermique $U = 901,57 \text{ W/m}^2\text{K}$. Soit le seul qui respecte bien l'ordre de grandeurs des coefficients globaux des fluides en fonction de leurs viscosités. De plus les résultats de la simulation montrent que la température de sortie du jus peut atteindre 83 °C. Ce qui veut dire que notre pasteurisateur respecte bien les normes nutritionnelles car au-delà de 90 °C on attaque l'intégrité chimique de certains éléments de l'aliment. Le coût de fabrication (en annexe) de ce pasteurisateur est de **2915750 FCFA** pour une durée de vie estimée à 10 ans.

Mots Clés : Agro-industrie ; eau chaude ; pasteurisateur solaire ; stockage thermique ; surface d'échange.