

<p>REPUBLIQUE DU CAMEROUN ***** UNIVERSITE DE YAOUNDE I ***** ECOLE NORMALE SUPERIEUR D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE ***** BP 886 EBOLOWA/Tel : + 237 243 71 78 16 Site web: www.enset-ebolowa.com Mailto: ensetebwn@gmail.com DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE</p>		<p>REPUBLIC OF CAMEROON ***** UNIVERSITY OF YAOUNDE I ***** HIGHER TECHNICAL TEACHERS' TRAINING COLLEGE ***** PO BOX 886 EBOLOWA/Tel: +237 243 71 78 16 Web site: www.enset-ebolowa.com Mailto: ensetebwn@gmail.com DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING</p>
---	---	--

**ETUDE ET REALISATION D'UN FOUR DE
PRODUCTION DE POUDRE DE TOMATES**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur de
l'Enseignement Technique de 2^e Grade (DIPET II)*

Option : Construction Mécanique

Rédigé par :

BIYO'O Jocelyn Arnaud

Licence de technologie en maintenance industrielle et productive

Matricule : 19W1224

Sous supervision de :

Dr KOUMI NGOH Simon, Chargé de cours

Devant le jury constitué de :

Président :	Pr KANAA Thomas	Maitre de conférences, ENSET d'Ebolowa
Rapporteur :	Dr KOUMI NGOH Simon	Chargé de cours, ENSET d'Ebolowa
Examineurs :	Dr TOGUEU Bertrand	Assistant, ENSET d'Ebolowa
	Dr YAOU Zakari	Assistant, ENSET d'Ebolowa

Année académique : 2020 - 2021



REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

ECOLE NORMALE SUPERIEURE
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

B.P. 886 Ebolowa / Tél : +237 243 71 78 16
Site web: www.enset-ebolowa.com
Courriel : ensetebwa@gmail.com



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace – Work – Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

**HIGHER TECHNICAL TEACHER
TRAINING COLLEGE**

PO. BOX 886, Ebolowa / Tél: +237 243 71 78 16
Web site: www.enset-ebolowa.com
Mail: ensetebwa@gmail.com

Ebolowa, le

ATTESTATION DE L'ORIGINALITE DU MEMOIRE

Je soussigné, **BIYO'O Jocelyn Arnaud**, Matricule **19W1224**, atteste que le présent mémoire de DIPET 2 intitulé "***Etude et réalisation d'un four de production de poudre de tomates***" est le fruit de mes propres travaux, effectués au Département du Génie Mécanique de l'Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (*ENSET*) de l'Université de Yaoundé I sous la Direction du **Dr KOUMI Simon**, Charge de cours, en vue de l'obtention du *Diplôme de Professeur d'Enseignement Technique de second grade (DIPET 2)*, Option : ***Construction Mécanique***.

Ce mémoire est authentique et n'a pas encore été présenté pour l'acquisition de quelque grade que ce soit.

VISA DE L'AUTEUR

BIYO'O Jocelyn Arnaud

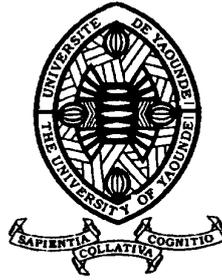
RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix - Travail – Patrie

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

DÉPARTEMENT D'INGÉNIERIE DU BOIS

BP. 886 EBOLOWA



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TECHNICAL TEACHERS'
TRAINING COLLEGE

DEPARTEMENT OF WOOD ENGINEERING

P.O BOX: 886 EBOLOWA

ATTESTATION DE CORRECTION DE MÉMOIRE (2021)

Département : GENIE MECANIQUE

Filière : CONSTRUCTION MECANIQUE

Nom et Prénoms du Candidat : BIYO'O Jocelyn Arnaud

Matricule : 19W1224

Titre du Mémoire : ETUDE ET REALISATION D'UN FOUR DE PRODUCTION DE
POUDRE DE TOMATES

Nous soussignés,

TOGUEU Bertrand (ASS)

Examineur du jury

KOUMI NGOH Simon (CC)

Rapporteur/Encadreur

Attestons que le mémoire suscité a subi toutes les corrections de formes et de fond exigées par le jury.

Fait   Ebolowa le...../...../.....

Examineur

Superviseur

RECEPISSE DE CORRECTION DE MEMOIRE

Le Directeur de l'Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET) de l'Université de Yaoundé 1   Ebolowa atteste avoir reçu deux exemplaires et un CD contenant la version électronique corrigée du Mémoire en un seul fichier PDF.

Nom et Prénoms du Candidat :

.....**Filière :**

Fait   Ebolowa le...../...../.....

Le Directeur

DEDICACES

A EKOUTOU MFOULA CLAUDINE

REMERCIEMENTS

Tout travail de recherche est une aventure vers un chemin inconnu qu'on est obligé de suivre en espérant obtenir les résultats escomptés. Au cours de ce long travail, nous avons été soutenus par les uns et les autres. Avant de présenter notre travail, il est donc impératif de s'acquitter du devoir du cœur vis-à-vis de tous ceux qui ont apporté leur modeste contribution à l'atteinte de ces résultats. Ainsi, nos sincères remerciements vont à l'endroit de :

- **Pr. NDJAKOMO ESSIANE Salomé**, Directeur de l'ENSET d'EBOLOWA qui nous a accueillis dans son Etablissement et nous a permis de mener nos études et approfondis nos connaissances dans le domaine de la Fabrication Mécanique dans des conditions largement favorables ;
- **Pr KANAA Thomas**, Chef du département de Génie Mécanique pour son encadrement, ses conseils et sa disponibilité tout au long de la formation ;
- **Dr KOUMI** pour sa supervision organisée au cours de l'élaboration de ce mémoire ;
- **Dr YAOU Zachary** et **Dr TOGUEU Bertrand** pour leur encadrement, leur disponibilité, leurs conseils prodigués et le suivi permanent de ce travail ;
- Tout le personnel administratif et tous les **enseignants** de l'ENSET d'EBOLOWA particulièrement à ceux du Génie Mécanique pour leurs encadrements et les enseignements que j'ai reçus tout au long de ma formation ;
- Ma maman **EKOUTOU MFOULA Claudine** et mon papa **ALEGA Emmanuel**, pour l'amour inconditionnel et le soutien indéfectible qu'elle m'a témoigné tout au long de ma formation ;
- Mes frères et sœurs **Laure, Christine, Véronique, Serges, Henri gaël, Julie, Yvette charlotte, Marcelle, Reine, fabien, Alice, Marthe, Cédric, Yolande, Cyrille** et la famille **AJEDY** pour leurs soutiens indéfectibles et leurs conseils ;
- Mes oncles et **tantes Cécile Manye ANGOULA, SANDEU Elias, AMONGO Jeanne, Akamessa Mireille** et **Serges ANABA** pour leurs soutiens indéfectibles et leurs conseils ;
- Mes camarades de la 3ieme promotion ;
- Tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce travail.

RESUME

Les pertes post récoltes des produits agricoles en Afrique en général demeurent un véritable problème de la filière agricole. Le séchage de ces derniers revêt un intérêt particulier dans l'industrie agroalimentaire, il permet la conservation à long terme des aliments afin de les rendre disponible même en période hors saison.

Parmi les aliments pouvant être séchés et conservés on dénote la tomate, le Cameroun produit **932 530 tonnes par an** et ce fruit est extrêmement consommé par les populations rurales et urbaines, alors ceci suscite plus d'attention au fil du temps. Son usage dans l'industrie ne passe pas inaperçu, ainsi, des études sont développées pour rendre son exploitation à l'échelle industrielle, c'est dans ce contexte que s'inscrit l'objet de notre étude, à savoir « **ETUDE ET REALISATION DUN FOUR DE PRODUCTION DE POUDRE DE TOMATE** ». Ce travail vise à contribuer aux méthodes de conservation des produits alimentaires par le séchage, grâce à la réalisation d'un four pour les produits agricoles. Le dispositif est capable de sécher (teneur en eau 8%) 2000 kg de tomate écrasée en 4h. Un extracteur d'air est imposé dans la cheminé du séchoir qui à la fois aspire l'air qui est préchauffé, mais aussi évacue l'air chargé d'humidité ayant traversé le produit. Les logiciels tels SolidWorks et AUTOCAD ont été utilisés pour le dimensionnement et les réalisations en 3D et 2D. Une étude de fabrication a été menée sur quelques pièces constituants notre système, et le guide d'utilisation a été mis à disposition. L'équipement a la capacité de sécher les graines et le coût estimatif du projet s'élève à **neuf cent treize mil (913.000) FCFA**.

Mots clés : Séchage, Tomate, Atomisation, Résistance chauffante, Four, Extracteur

ABSTRACT

Post-harvest losses of agricultural products in Africa in general remain a real problem in the agricultural sector. The drying of the latter is of particular interest in the food industry, it allows the long-term preservation of food in order to make it available even in the off-season.

Among the foods that can be dried and preserved we denote the tomato, Cameroon produces **932,530 tons** per year and this fruit is consumed extensively by both rural and urban populations, so this is gaining more attention over time. Its use in industry does not go unnoticed, thus, studies are being developed to make its exploitation on an industrial scale, it is in this context that the object of our study is inscribed, namely "*Study and realization a tomato powder production oven*". This work aims to contribute to methods of preserving food products by drying, through the construction of an oven for agricultural products. The device is capable of drying (water content 8%) 2000 kg of crushed tomato in 4 hours. An air extractor is imposed in the dryer chimney, which both sucks in the air which is preheated, but also removes the air laden with humidity that has passed through the product. Software such as SolidWorks and AUTOCAD were used for dimensioning and realizations in 3D and 2D. A manufacturing study was carried out on some of the parts that make up our system, and the user guide was made available. The equipment has the capacity to dry seeds and the estimated cost of the project is **nine hundred and thirteen mil (913,000) FCFA**.

Keywords: Drying, Tomato, Atomization, Heating element, Oven, Extractor

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	1
REMERCIEMENTS	2
RESUME	3
ABSTRACT	4
TABLE DES MATIERES	5
LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX	11
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS	12
LISTE DES SYMBOLES	12
INTRODUCTION GENERALE	15
CHAPITRE 1	16
GENERALITES SUR LE SECHAGE DES ALIMENTS	16
I.1 Généralités sur le séchage des aliments	17
I.1.1 Définition	17
I.1.2 Notion d'humidité, humidité relative d'équilibre et activité de l'eau	17
I.1.2.1 Humidité et définition	17
I.1.2.2 Taux d'humidité	17
I.1.2.3 Taux d'humidité à l'équilibre	18
I.1.2.4 État de siccité	18
I.1.2.5 Relation entre l'eau et le produit lors du séchage	19
I.1.2.6 Relation entre l'air et le produit lors du séchage	20
I.1.3 Isotherme d'adsorption et de désorption	21
I.1.3.1 Présentation des courbes iso thermiques d'adsorption et de désorption	21
I.1.3.2 Intérêt des isothermes d'adsorption en technologie alimentaire	23
I.2 PHENOMENE DU SECHAGE	23
I.2.1 L'air humide	23
I.2.2 Température de rosée	23
I.2.3 Température du thermomètre humide	24
I.2.4 Principes physiques du séchage	24
I.2.5 Séchage par ébullition	24
I.2.6 Séchage par entrainement	24
I.2.7 Les phases de séchage	24
I.2.8 Cinétique de séchage	26
I.2.9 Influence de la température de séchage sur la cinétique de séchage	26

I.2.10 Influence de l'humidité de l'air de séchage sur la cinétique de séchage	26
I.2.11 Influence de la vitesse de l'air de séchage sur la cinétique de séchage.....	27
I.3 Généralités sur la tomate	27
I.3.1 Définition	27
I.3.2 Importance économique de tomate	27
I.3.2.1 Zone de production au Cameroun.....	28
I.3.3 Composition de la tomate fraîche	29
I.3.4 Les exigences de la culture	31
I.3.4.1 La température et la lumière	31
I.3.4.2 L'eau et humidité	31
I.3.4.3 La salinité.....	31
I.3.4.4 Le sol	32
I.3.4.5 Les variétés	32
I.3.4.6 Les semis	33
I.3.4.7 La récolte	33
I.3.4.8 Les principales formes de et couleurs de tomate.....	34
I.3.4.8.1 Les formes.....	34
I.3.4.8.2 Les couleurs	34
I.4 Les types de tomates	35
I.4.1 Tomate de table.....	35
I.4.2 Tomate industrielle	35
I.5 LA TRANSFORMATION DE LA TOMATE	36
I.5.1 Le séchage en vue de l'obtention de la tomate en poudre	36
I.5.1.1 Le choix des tomates	36
Chapitre II	39
II.1 LES TYPES DE SECHOIRS	40
II.1.1 Séchoirs solaires directs	40
II.1.2 Les séchoirs solaires classique	40
II.1.2 Séchoir solaire indirect [6].....	41
II.1.3 Séchoirs solaires mixtes [23].....	42
II.1.4 Les séchoirs solaire hybrides [8]	42
II.1.4 Séchage sur claie.....	43
II.1.5 Séchoirs sur hangar	44
II.2 Autres types de séchoirs.....	44
II.2.1.1 Séchoir artisanal (à soufflet).....	45
II.2.1.2 Le convoyeur à bande	45
II.2.2 Séchoirs indirects.....	46

II.2.2.1 Séchoir multi-étage vertical	46
II.2.3 Le séchage par atomisation	47
II.3 Les conditions de séchage des produits agro-alimentaires	48
II.4 Choix de la technologie de séchage appropriée	49
II.4.1 Critères de choix	50
II.4.2 Choix proprement « dit »	50
CHAPITRE III	52
ETUDE ET CONCEPTION	52
III.1 ANALYSE FONCTIONNELLE	53
III.1.1 Saisie du besoin	53
III.1.2 Enonce du besoin	53
III.1.3 Validation du besoin	54
III.1.4 Analyse fonctionnelle du besoin	55
III.1.5 Les fonctions services	56
III.1.5.1 Les fonctions principales	56
III.1.5.2 Les fonctions contraintes	56
III.1.6 Caractérisation des besoins	57
III.1.7 Hiérarchisation des fonctions	59
III.1.8 Diagramme FAST	62
III.1.9 Diagramme SADT	65
III.1.10. Schéma technologique du four de production de poudre de tomate	70
III.1.11 Principe de fonctionnement	71
III.2 Dimensionnement de notre four	72
III.2.1 Caractéristique de l'air asséchant	72
III.2.1.1 Température de l'air asséchant	73
III.2.1.2 Masse sèche du produit et masse d'eau du produit à enlever	73
III.2.1.3 Taux d'humidité	73
III.3 CALCUL DE LA DYNAMIQUE DES FLUIDES	73
III.4 Calcul lie aux résistances chauffantes	76
III.4.1 Choix du matériau	76
III.5 Calcul thermique	78
III.5.1 La paroi de canalisation de l'air chaud	78
III.5.2 La force maximale appliquée sur les parois de l'enceinte de séchage	83
III.6.1 Modélisation	84
III.6.2 Calcul des assemblages	86
III.7 Etude graphique	87
III.7.1 Dessin d'ensemble	88

III.7.2 Dessins de définitions	89
IV.2 ETUDE ET REALISATION	92
IV.2.1 Traçage	92
IV.2.2 Découpage ou débitage	92
IV.2.3 Le ceintrage	92
IV.2.4 Le perçage	93
IV.2.5 Le soudage	93
IV.2.6 Contrôles des défauts	94
IV.3 GUIDE D'UTILISATION	95
IV.3 PLAN DE MAINTENANCE	97
IV.4 COUTS DE REALISATION DU SECHOIR	97
CONCLUSION	99
BIBLIOGRAPHIES	100
ANNEXES	102

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : A_w et risques de détérioration des denrées alimentaires	5
Figure 1.2 : Transfert entre l'air et la surface du produit.	7
Figure 1.3 : Courbe isotherme de sorption	8
Figure 1.4 : Diagramme de la teneur en eau en fonction du temps (Verreault et Bouchard 2010) ...	11
Figure 1.5 : Principaux pays producteurs de la tomate (million de tonnes) (FAO, 2011)	14
Figure 1.6 : Bassins de production de la région de l'ouest et marchés de consommation de Bafoussam (ouest) et Douala (littoral) Octobre - Novembre 2013	15
Figure 1.7 : Parties d'une plante et d'un fruit de tomate	16
Figure 1.8 : principales formes et couleurs de la tomate	21
Figure 1.9 : Etapes de transformation de la tomate	24
Figure 2.1 : Séchoir solaire directs inventoriés, Source : Tchamye (2011).....	25
Figure 2.2 : séchoir solaire classique.....	26
Figure 2.3 : Séchoir solaire indirect	26
Figure 2.4 : séchoir solaire mixte	27
Figure 2.5: Séchoir solaire hybride	27
Figure 2.6 : Séchage sur claie dans un village au centre Cameroun.....	28
Figure 2.7 : hangars de séchage	29
Figure 2.8 : Séchoir artisanal (à charbon avec soufflet).....	30
Figure 2.9 : Sécheur à bande à courant parallèle.....	31
Figure 2.10 : Sécheur à plateaux	32
Figure 2.11: Tour d'atomisation industrielle.....	33
Figure 3.1: diagramme bête a corne	39
Figure 3.2 : Diagramme pieuvre.....	41
Figure 3.3 : Histogramme de la hiérarchisation des fonctions	46
Figure 3.4 : Diagramme de Pareto.....	47
Figure 3.5 : Lecture du diagramme FAST.....	48
Figure 3.6 : Le F.A.S.T. du Four.....	49
Figure 3.7 : Actigramme S.A.D.T.	50
Figure 3.8 : Actigramme du Four niveau Ao	51
Figure 3.9 : Diagramme S.A.D.T niveau 1	52
Figure 3.10 : Diagramme S.A.D.T niveau 2.....	53
Figure 3.11 : Diagramme S.A.D.T niveau 3.....	53
Figure 3.12 : diagramme S.A.D.T niveau	54

Figure 3.12 : Diagramme S.A.D.T niveau 5.....	54
Figure 3.13 : Diagramme S.A.D.T niveau 6.....	55
Figure 3.14 : Schéma du principe.....	56
Figure 3.15: buse d'atomisation	62
Figure 3.15 : Schéma du tube transportant la tomate	64
Figure 3.15: Modélisation du transfert de chaleur dans le tube.....	67
Figure 3.15 : Ossature métallique du four	71
Figure 3.16: assemblage bâti-poteau	73
Figure 4.1 : Tronc de cône.....	79
Figure 4.2 : Développante du tronc de cône.....	79
Figure 4.3: découpage manuelle d'une feuille de tôle.....	80
Figure 4.4 : ceintage d'un tube rond	80
Figure 4.5: perçage d'une pièce	81
Figure 4.6: soudure à l'arc électrique	81
Figure 4.7 : modélisation 3D de la chambre séchage.....	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Composition de la tomate fraiche.....	27
Tableau 1.2 : Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate.....	29
Tableau 1.3 : Espacement de la plantation pour les deux types de plantes de tomates.....	31
Tableau 1.4 : Condition de séchages de certain produits agro-alimentaire.....	47
Tableau 2.1 : Caractéristiques des fonctions servi	56
Tableau 2.2 : Cableau du tri – croise	57
Tableau 2.3 : Effectifs cumules croissant des différentes fonctions.....	59
Tableau 2.4 : Coefficient de débit par type de buse.....	72
Tableau 3.1 : Gamme prévisionnelle de fabrication	91
Tableau 3.2 : Devis estimatif du four	95

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

LISTE DES SYMBOLES		
SYMBOLES	Définition	Unités
X'	Teneur en eau base humide	Kg d'eau/kg
X	Teneur en eau base sèche	Kg d'eau/kg
A_W	Activité de l'eau	
H_R	Humidité relative de l'air	
P_W	Pression partielle de vapeur d'eau	Pa
P_{W0}	Pression partielle de l'eau pure	Pa
D_e	Diffusivité massique	$\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
\dot{m}_a	Débit massique d'air	kg d'air/h
D_{ex}	Diamètre extérieur du tube	m
D_{in}	Diamètre intérieur du tube	m
v_{air}	Vitesse de l'air ambiant	m.s^{-1}
ρ	Masse volumique de l'air	Kg/m^3
L	Longueur de la paroi nécessaire pour le séchage l'air	m
T_I	Température initiale de l'air à l'intérieur	°C
T_f	Température finale de l'air (après chauffage du tube) à l'intérieur	°C
η	Rendement de la résistance chauffante	
P_u	Puissance utile	W

Q_u	Energie utile	J
P_f	Puissance fournie	W
P_p	Puissance perdue	W
ρ	Résistivité	$\Omega.m$
L_r	Longueur du tube	m
S	Section du fil de la résistance chauffante	m ²
τ	Taux de charge	W/mm ²
P_A	Pression à l'entrée du tube d'alimentation de la tomate	Pa
V_A	Vitesse à l'entrée	m. s-1
d_1	Diamètre d'entrée	m
d_2	Diamètre de sortie	m
Q_A	Débit d'écoulement de la tomate à l'entrée	m ³ .s-1
S_A	Section du tube à l'entrée	m ²
Q_B	Débit d'écoulement de la tomate à la sortie	m ³ .s-1
V_B	Vitesse à la sortie	m. s-1
P_B	Pression à la sortie du tube d'alimentation de la tomate	Pa
e_1	Epaisseur de la paroi de l'enceinte de séchage	m
P_{max}	Pression maximale appliquée sur les parois	Pa
F_{max}	Force maximale appliquée sur les parois	N
Δ_{PS}	Pertes de charges par singularité	Pa
P_{net}	Puissance net de l'extracteur	W

P	Charges d'exploitation	N
X	Coefficient de réduction au flambement	
γ_{mo}, γ_{ml}	Coefficients partiels de sécurité	
A	Section de la cornière	<i>m²</i>
τ	Composante dans le plan de la section perpendiculaire à l'axe longitudinal du cordon	N.m-2

LISTE DES ABREVIATIONS

Sigles	
FAO	Foods and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
ISO	International Organization for Standardization (Organisation Internationale de Normalisation)
FC	Fonction de Contrainte
FP	Fonction Principale
FAST	Function Analysis System Technic
SADT	Structural analysis descendant technic

INTRODUCTION GENERALE

La tomate de son nom scientifique « *Solanum lycopersicum* » est devenue un des légumes les plus importants du monde. En 2001, la production mondiale de tomates était d'environ 105 millions de tonnes de fruits frais sur une superficie évaluée à 3,9 millions d'hectares. Comme c'est une culture à cycle assez court qui donne un haut rendement, elle a de bonnes perspectives économiques et la superficie cultivée s'agrandit de jour en jour. La tomate appartient à la famille des Solanaceae. Cette famille regroupe d'autres espèces qui sont également bien connues, telles que la pomme de terre, le tabac, le poivron et l'aubergine. La tomate est originaire des Andes d'Amérique du Sud, se consommant comme un légume-fruit, crue ou cuite. De part ses vertus que se soit dans la gastronomie ou dans la médecine, elle est devenue un élément incontournable pour nombreux pays, et tout particulièrement au Cameroun. La durée de vie de la tomate varie entre 5 à 10 jours dépendant du milieu dans lequel elle se trouve, cette durée de vie peut être prolongée en conservant la tomate dans un congélateur ou en la transformant. Lors de la transformation, il faut garder le pH inférieur à 4,6 afin d'éviter la croissance des pathogènes et les microbes. La tomate en fruit est plus adaptée à la consommation si elle est produite en quantité, mais la culture de celle-ci étant saisonnière, il peut y avoir pénurie sur le marché et l'on enregistre aussi d'énorme perte lors de la récolte, de la manutention et du transport. Afin de palier à ces maux que rencontrent les producteurs et les consommateurs, nous nous proposons « *d'étudier et de réaliser un four de production de poudre de tomates* » qui nous permettra de l'avoir tout en préservant ses propriétés nutritives.

Pour mener à bien ce travail, nous le structurons notre travail en (03), le premier chapitre nous permettra de présenter l'état de l'art sur le séchage des aliments, principes et technologies sur les séchoirs, le deuxième chapitre porte sur l'étude de conception de notre four ainsi que son analyse fonctionnelle et le troisième lui va s'appesantir sur l'étude de fabrication, coûts et devis.

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART SUR LE SECHAGE DES ALIMENTS, PRINCIPES ET TECHNOLOGIES SUR LES SECHOIRS

Dans ce chapitre il sera question pour nous de prime à bord de définir ce que c'est que le séchage tout en décrivant différentes étapes qui accompagnent le processus de séchage en insistant sur le principe d'obtention de la poudre de tomates et de recenser les types de séchoirs existants, décrire brièvement leur mode de fonctionnement, présenter leurs limites, faire une étude comparative entre ceux existant et catégoriser les produits agricoles en fonction de leur condition de séchage enfin faire le choix de la solution à adopter pour la suite de notre étude.

I.1 Généralités sur le séchage des aliments

I.1.1 Définition

Le séchage est l'une des principales opérations de conservation de nombreux produits alimentaires. C'est une opération qui consiste à retirer tout ou une partie du liquide imprégnant un corps dit « humide » par vaporisation et donc le produit final obtenu est qualifié de « sec » même s'il contient une humidité résiduelle [1]

I.1.2 Notion d'humidité, humidité relative d'équilibre et activité de l'eau

I.1.2.1 Humidité et définition

Le terme humidité renvoie à la présence de liquide dans un corps liquide, solide ou pâteux. Très généralement il s'agit de l'eau qui présente différentes propriétés physicochimiques selon ses états de liaison avec les micromolécules de l'aliment. Selon les états de liaison de l'eau avec les micromolécules de l'aliment, cette eau est présente sous trois formes à savoir :

- Eau libre qui est l'eau retenue par effet capillaire dans les pores des aliments, l'eau liée par effet osmotique, l'eau d'hydratation des macromolécules et l'eau solvant, elle est mobile et présente les propriétés de l'eau pure.
- Eau liée, elle forme une couche mono moléculaire étroitement associée par divers types de liaisons aux protéines et aux glucides. Cette eau est fixe et possède la particularité de s'échapper à la congélation car les interactions eau-macromolécules sont plus fortes que celle des molécules d'eau cristallisées entre elles. Cette eau n'est pas disponible.
- Eau de constitution qui est l'eau qui entre dans la composition chimique de l'aliment. La notion de disponibilité de l'eau dans un aliment peut être définie aux moyens du taux d'humidité, de l'humidité relative d'équilibre (HRE) et de l'activité de l'eau.

I.1.2.2 Taux d'humidité

C'est la masse du liquide contenue par unité de la masse de matière à sécher. De façon pratique, le taux d'humidité se mesure par rapport à un grain qui ne contient pas d'eau. Il sera donc donné sous la base dite sèche c'est-à-dire en prenant le rapport entre le poids de l'eau que contient le corps à sécher et le même à l'état de siccité lorsqu'il a été débarrassé de tout son humidité.

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} = \frac{M_e}{M_s} \quad (1.1)$$

- X : Taux d'humidité ;
- M_h : masse du produit humide ;
- M_s : masse du produit séché ; M_e : masse d'eau évaporé.

1.2.2.3 Taux d'humidité à l'équilibre

Il s'agit tout simplement de la valeur à laquelle se stabilise l'humidité d'un produit placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes. Elle dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température. Cela ne veut pas dire que le corps et l'air ont la même humidité mais tout simplement qu'il existe une condition d'équilibre de tel sorte qu'il n'y a pas d'échange d'humidité entre l'air ambiant et le corps.

1.2.2.4 État de siccité

C'est l'état d'un corps dont le taux d'humidité a subi une diminution considérable. Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur. Lorsque le taux d'humidité devient nul le corps est dit anhydre.

Celle-ci pouvant être calculée par rapport à la masse totale de produit à l'origine (notée alors X') ou par rapport à la masse de matière sèche (notée dans ce cas X). Les relations de passage de l'une à l'autre de ces définitions sont les suivantes [1] :

$$X = \frac{X'}{1-X'} \quad \text{or} \quad X' = \frac{X}{1+X} \quad (1.2)$$

- X' : teneur en eau base humide (kg d'eau/kg du produit) ;
- X : teneur en eau base sèche (kg d'eau/kg de produit sec) ;

La teneur en eau s'exprime plus fréquemment en pourcentages (%).

Pour les calculs sur les séchoirs, il est recommandé de travailler sur la base de matière sèche qui seule reste constante au cours du séchage.

1.2.2.5 Relation entre l'eau et le produit lors du séchage

- L'activité de l'eau

L'activité de l'eau (A_w) d'un produit est donnée par le rapport entre la pression de vapeur d'eau du produit et la pression de vapeur de l'eau pure à la même température [2].

$$A_w = \frac{P_w}{P_{w0}} = \frac{H_{RE}}{100} \quad (1.3)$$

P_w = Pression partielle de la vapeur d'eau de l'aliment à la température Θ ,

P_{w0} = Pression de la vapeur d'eau saturante à la température Θ .

H_{RE} = humidité relative d'équilibre.

L'activité A_w est une grandeur sans dimension comprise entre 0 et 1, elle est d'autant plus faible que les forces de liaisons sont intenses et tend au contraire vers l'unité lorsque l'eau se rapproche de l'état libre. Elle permet, en outre, de prévoir et d'éviter les détériorations physicochimiques, les activités enzymatiques et la prolifération des micro-organismes. En ce qui concerne ces derniers, les bactéries, les levures et les moisissures ne peuvent se développer qu'à partir des A_w supérieures respectivement à 0.91, 0.88 et 0.80. [1].

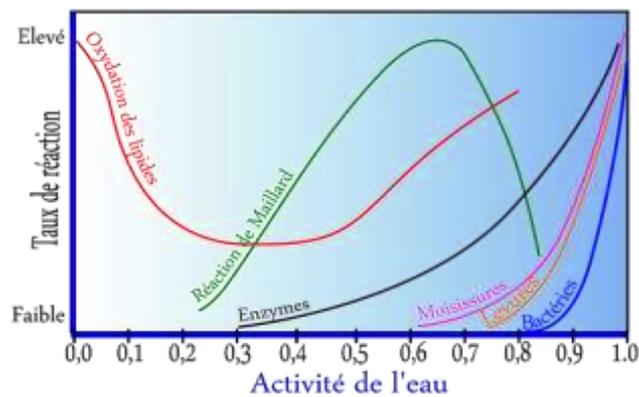


Figure 1.1 : A_w et risques de détérioration des denrées alimentaires

➤ **Quantité d'eau dans le produit**

La teneur en eau ou degré d'humidité représentant la quantité d'eau dans le produit est un paramètre non négligeable tout comme l'activité de l'eau à prendre en compte lors du processus de séchage. Il s'agit du rapport entre la masse d'eau dans le produit et la masse totale de ce produit (qui est la somme de la masse de l'eau et de la matière sèche contenu dans le produit). Ceci est résumé par l'équation :

$$T_s = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (1.4)$$

Cependant, à la fin du séchage il y'a toujours une quantité d'eau restante dans le produit qui peut être déterminée par l'équation :

$$M_e \frac{(100 - X_i)}{100 - X_f} \quad (1.5)$$

➤ **Quantité d'eau à extraire dans le produit par seconde**

Pour une masse M_s contenue dans un produit, la masse d'eau à extraire pour faire passer le produit d'une humidité X_i et X_f a pendant un temps t en heure est donné par l'équation :

$$Y = \frac{M_s (X_i - X_f)}{t \times 3600} \quad (1.6)$$

Le calcul de la puissance de la chaleur nécessaire pour l'extraction de cette quantité d'eau peut se faire sur cette base si la vitesse de séchage est suffisamment constante (cas d'un séchage en phase humide).

1.2.2.6 Relation entre l'air et le produit lors du séchage

Pendant le séchage, l'air chaud en mouvement entre en contact avec le produit (soit transversalement ou parallèlement) créant ainsi une couche d'air stationnaire à la surface du produit. Cette zone est le lieu de transfert de chaleur où nous aurions une diffusion et évaporation de l'eau libre du produit. On définit ainsi le pouvoir évaporatoire de l'air comme la capacité de l'air à absorber l'eau mis en son contact jusqu'à saturation. L'humidité absolue et l'humidité relative sont les deux paramètres qui permettent de quantifier les proportions d'air sec et de vapeur d'eau contenu dans cet air. L'humidité absolue (teneur en eau) s'exprime en gramme d'eau par kilogramme d'air sec (g/kg d'air sec) et l'humidité relative (degré hygrométrique) s'exprime en pourcentage (%) et permet de connaître le niveau de saturation de l'air en eau compte tenu de la température et de la pression.[1]

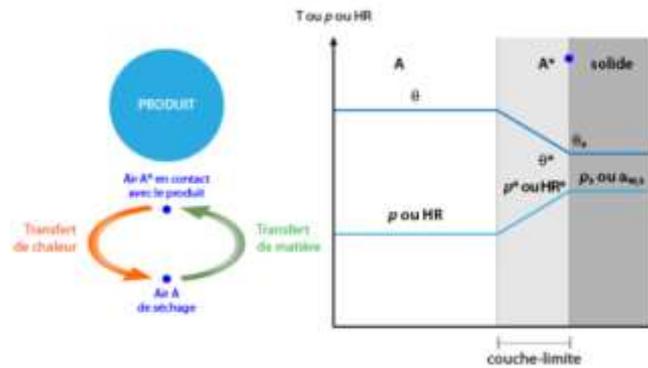


Figure 1.2 : Transfert entre l'air et la surface du produit.

I.1.3 Isotherme d'adsorption et de désorption

I.1.3.1 Présentation des courbes iso thermiques d'adsorption et de désorption

La courbe de l'activité dans un produit alimentaire dépend principalement de sa teneur en eau (X) et de sa température Θ . La courbe représentant, pour une température Θ donnée, la relation entre $\mathbf{W}=\mathbf{f}(A_W)$ ou $\mathbf{W}=\mathbf{f}(H_{RE})$ est appelée :

- Isotherme d'adsorption, si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit séché.
- Isotherme de désorption, si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau. La courbe appelée isotherme d'adsorption-désorption, obtenue en partant : En abscisse soit A_W , H_{RE} et en ordonnée la teneur en eau du produit exprimée en g d'eau pour 100g de matière sèche ($\%M_S$) est la suivante.

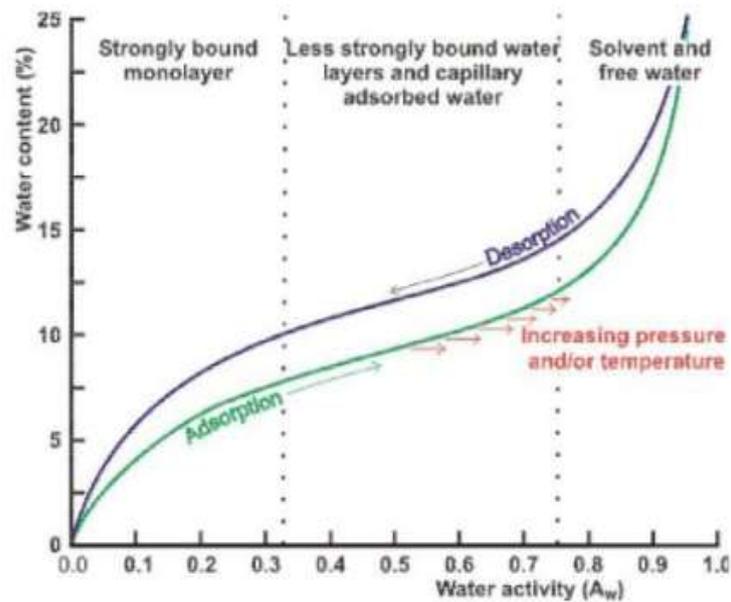


Figure 1.3 : Courbe isotherme de sorption

Dans le cadre du séchage, nous allons nous intéresser particulièrement à la courbe de désorption qui peut être divisée en trois zones :

Zone 1 : c'est la zone définie par $0 < A_w < 0.3$, présence d'une monocouche moléculaire à la surface du produit (force de Van der Waals entre le groupement hydrophiles et moléculaire d'eau). L'adsorption se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant la surface externe et les pores du produit. L'eau est dans un état lié (rigidité, fortes liaisons hydrogènes). Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée.

Zone 2 : $0.2 < A_w < 0.7$: Adsorption des molécules d'hydrogène sur la monocouche initiale, ou inclusion de molécules d'eau par capillarité. L'isotherme est linéaire dans cette zone. Il s'agit d'un état intermédiaire entre solide et liquide.

Zone 3 : $0.7 < A_w$: Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro-capillaire constitue une phase continue [2].

Un apport de chaleur a donc pour effet de diminuer l'activité de l'eau, et permet une inhibition des phénomènes microbiens et la stabilisation du produit. Il apparaît immédiatement que pour une température plus grande, la teneur en eau diminue et on obtient donc un produit plus stable ; **d'où l'intérêt central du séchage des aliments.**

I.1.3.2 Intérêt des isothermes d'adsorption en technologie alimentaire

Nous allons énumérer ces intérêts sous trois angles :

- Du point de vue thermique, les isothermes d'adsorption fournissent des informations sur l'enthalpie de « sorption » et sur le type de liaison de l'eau avec la matière sèche du produit,
- Du point de vue structurel, elles permettent de mieux comprendre le rôle de la taille des particules, de l'état amorphe, et de la surface spécifique dans les phénomènes de désorption ou adsorption de la vapeur d'eau.
- Du point de vue technologique, elles sont utiles à la prédiction de la durée de conservation des aliments, au contrôle du séchage et à la prévention de certains accidents comme le « collage ou la prise en masse des produits alimentaires pulvérulents ». [2].

I.2 PHENOMENE DU SECHAGE

Le séchage est l'une des principales opérations de conservation de nombreux produits alimentaires. C'est une opération qui consiste à retirer tout ou une partie du liquide imprégnant un corps dit « humide » par vaporisation et donc le produit final obtenu est qualifié de « sec » même s'il contient une humidité résiduelle [1]

I.2.1 L'air humide

Le diagramme enthalpique de l'air humide est un instrument pratique et efficace pour étudier et évaluer l'énergie nécessaire à la maîtrise des conditions du séchage, la mise en œuvre correcte du processus industriel. Il permet de terminer toutes les propriétés de l'air telles que :

- La température de rosée ;
- La température du thermomètre humide ;
- L'enthalpie : permet également de suivre l'évolution des paramètres listés ci-dessus au cours de l'opération du séchage sans avoir recours à des calculs fastidieux.

I.2.2 Température de rosée

La température de rosée d'un air humide est définie comme étant la température pour laquelle la pression de vapeur est égale à la pression de vapeur saturante.

I.2.3 Température du thermomètre humide

La température du thermomètre humide est définie comme la température à l'équilibre de l'air humide amené à sa saturation (formation des premières gouttes d'eau liquide) par augmentation de l'humidité absolue.

I.2.4 Principes physiques du séchage

Pour l'évacuation de l'eau d'un produit, il existe deux mécanismes qui peuvent être mis en œuvre à savoir : l'ébullition et l'entraînement.

I.2.5 Séchage par ébullition

Le séchage par ébullition consiste à transmettre au produit amené à sa température d'ébullition un flux thermique au travers une surface d'échange de chaleur latente. L'évaporation de l'eau est directement proportionnelle à l'apport d'énergie (chaleur latente de vaporisation). En pratique cet apport est effectué par conduction au travers de la surface d'échange au contact du produit par de la vapeur dont la température est comprise entre 130 et 150°C. Selon Fourier, le transfert de chaleur s'effectue de façon proportionnelle à la différence de température entre le fluide caloporteur et le liquide en ébullition à la pression considérée [1].

I.2.6 Séchage par entraînement

Le séchage par entraînement consiste à son tour à placer un corps dans un courant d'air (ou autre gaz) suffisamment chaud et sec. Dans ces conditions, il s'établit spontanément entre le corps et le gaz un écart de température et de pression partielle d'eau tel que :

- Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit, sous l'effet de la température
- Un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de la pression partielle d'eau entre l'air et la surface du produit Il est le moyen de séchage le plus universel.

I.2.7 Les phases de séchage

Le séchage étant une opération destinée à extraire l'eau libre et l'eau liée d'un produit ; il s'effectue en fonction de l'air de séchage et des caractéristiques du produit quel qu'en soit le type de séchage. Dans la plupart des cas, il s'effectue en trois phases comme le montre la Figure suivante :

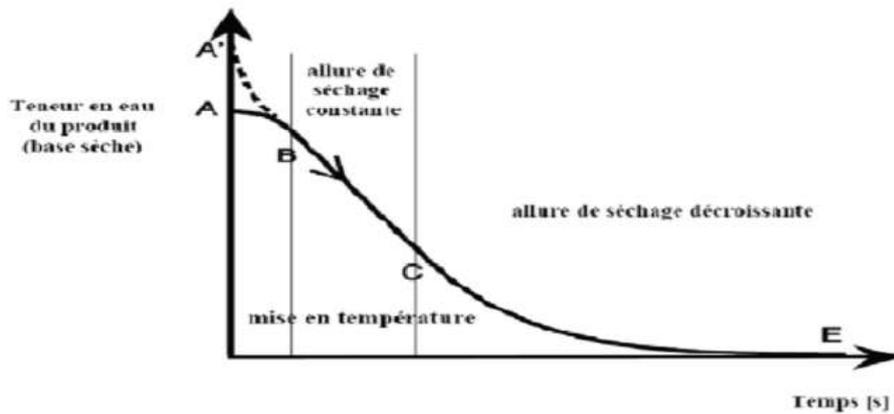


Figure 1.4 : Diagramme de la teneur en eau en fonction du temps (Verreault et Bouchard 2010)

- **La phase 0 (A-B)** : Elle est très courte et correspond à la montée en température du produit. Quand un produit d'une température de surface T_s et d'une pression partielle de vapeur d'eau est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage ce qui aboutit à un équilibre du bilan de chaleur, si par contre, la température de surface du produit est trop élevée, le déficit énergétique entraînerait un refroidissement de produit. La période de mise en température est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grandes tailles, ou si la différence de température entre l'air et le produit est important.
- **La phase 1 (B-C)** : correspond à l'évaporation de l'eau libre (= 1) en surface de produit, sans cesse renouvelée par l'eau venant de l'intérieur du produit. La vitesse de séchage de cette période est constante. Cette vitesse peut être accélérée en augmentant la vitesse de circulation de l'air au contact du produit.
- **La phase 2 (C-E)** : correspond à l'évaporation de l'eau liée. Pendant cette période, la vitesse de séchage ralentit. Plusieurs phénomènes expliquent ce ralentissement : Le ralentissement commence lorsqu'il n'y a plus d'eau libre à la surface du produit et qu'il ne reste que l'eau liée à évaporer ;
L'évaporation de l'eau dans un milieu varie avec sa teneur en eau ; en effet plus le produit est sec, moins il est perméable à l'eau ;

La résistance des parois cellulaires, lorsqu'elles n'ont pas été altérées par une cuisson ou un blanchiment, contribue sans doute à freiner l'alimentation de la surface en eau.

Le croutage : Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région B-C) et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés soluble qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

I.2.8 Cinétique de séchage

Afin de caractériser le comportement au séchage d'un produit, il est d'usage de mesurer de façon expérimentale sa cinétique de séchage. Dans le cas par exemple d'un solide séché par entraînement, on peut placer le produit dans un courant d'air dont les caractéristiques sont parfaitement maîtrisées. A des intervalles de temps réguliers, on procède à des enregistrements de la masse du produit en question. Il existe d'autres techniques pour mesurer la cinétique de séchage d'un produit, toujours est-il qu'elle dépend de la nature du produit (hygroscopique ou non), de l'épaisseur de la couche du produit, de la température, de l'humidité et de la vitesse de l'air de séchage. En général le produit est hygroscopique et le séchage se fait à couche mince, nous insistons donc sur la qualité de l'air de séchage.

I.2.9 Influence de la température de séchage sur la cinétique de séchage

La température joue un rôle très important dans la cinétique de séchage, elle doit donc faire l'objet d'un contrôle systématique afin d'obtenir un produit fini de qualité dans de bons délais. Elle ne doit être ni trop élevée ni trop basse en fonction du produit à sécher. Une trop basse peut allonger le séchage et une température trop haute le raccourcir mais avec des conséquences indésirables sur la qualité du produit fini.

I.2.10 Influence de l'humidité de l'air de séchage sur la cinétique de séchage

Rappelons que l'humidité d'un gaz correspond à la quantité d'eau contenue dans ce gaz ou mélange de gaz. Il est évident que lorsque l'air est très chargé en humidité il aura plus de peine à se déplacer et à en absorber d'avantage lorsqu'il est sec. Il est nécessaire connaître l'humidité de l'air et celle du produit afin de mieux conduire le séchage car si l'humidité de l'air est supérieure à celle du produit, on observera plutôt une réhydratation.

I.2.11 Influence de la vitesse de l'air de séchage sur la cinétique de séchage

Le séchage en couche mince est fortement affecté par la vitesse de l'air circulant lors de la phase d'évaporation superficielle et pas du tout affecté pendant les phases constantes et de ralentissement. Un accroissement de la vitesse de circulation de l'air est très efficace pour maintenir son pouvoir asséchant.

I.3 Généralités sur la tomate

I.3.1 Définition

La tomate (*Solanum Lycopersicum*) fait partie de la famille des solanacées. Avec près de 15 kg par an et par habitant, Cette plante est cultivée en plein champ ou sous presque toutes les latitudes, sur une superficie d'environ trois millions d'hectares, ce qui représente près du tiers des surfaces mondiales consacrées aux légumes. La tomate a donné lieu au développement d'une importante industrie de transformation, pour la production de concentré, de sauces, de jus et de conserves.[1] Elle se consomme comme un légume-fruit, crue ou cuite et devenue un élément incontournable de la gastronomie dans de nombreux pays, et tout particulièrement au Cameroun.

I.3.2 Importance économique de tomate

Au niveau mondial, la tomate est cultivée dans presque tous les pays du monde avec une production de plus de 140 millions de tonnes. Cette production est répartie dans tous les zones climatiques, y compris dans des régions relativement froides grâce au développement des cultures sous abri, à l'échelle mondiale, la tomate est considérée comme la 2ème culture légumière après la pomme de terre de par son volume de production. En effet, près de cinq millions d'hectares (4,98 millions ha) sont réservés annuellement à cette culture avec une production de 140 millions de tonnes et un rendement moyen de 28,3 tonnes à l'hectare.

Comme c'est une culture à cycle assez court qui donne un haut rendement, elle a de bonnes perspectives économiques et la superficie cultivée s'agrandit de jour en jour.[4][5]

La consommation des fruits de la tomate contribue à un régime sain et équilibré. Les fruits sont riches en eau (environ 90%), en minéraux, en vitamines, en acides aminés essentiels, en sucres ainsi qu'en fibres alimentaires. La tomate contient beaucoup de vitamines B et C, de fer et de phosphore. Les tomates se consomment fraîches en salade ou cuites dans des sauces, des

soupes ou des plats de viande ou de poisson. Les fruits séchés et les fruits mis en conserve sont des produits transformés qui ont également une importance économique.

Les tomates jaunes ont une teneur en vitamine A plus élevée que les tomates rouges, mais les tomates rouges contiennent du lycopène.

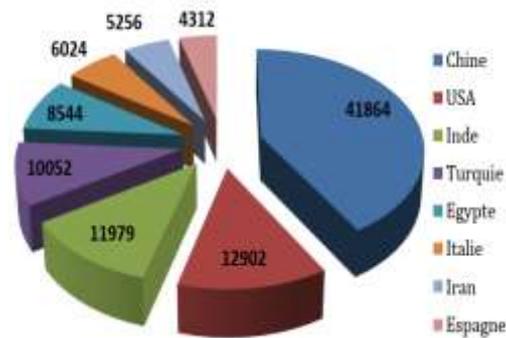


Figure 1.5 : Principaux pays producteurs de la tomate (million de tonnes) (FAO, 2011) [8]

I.3.2.1 Zone de production au Cameroun

Au Cameroun, la tomate joue un rôle important dans la consommation des fruits et légumes. Elle est d'abord produite pour la commercialisation, elle permet ainsi d'approvisionner les bassins urbains et périurbains et apporte un revenu conséquent aux producteurs. Sur le plan économique, c'est un produit agricole qui procure de nombreux emplois directs et indirects aux Camerounais. Le secteur de la production de la tomate fraîche fournit potentiellement 1 645 200 emplois. La transformation de la tomate est quasi inexistante au Cameroun, bien qu'il existe une importante demande en produits dérivés, tels que le concentré et les sauces, couverte par les importations. Par ailleurs, cette filière présente un énorme potentiel d'exportation dans la sous-région CEMAC, mais malheureusement, ces niches sont peu exploitées en raison du volume élevé des pertes après récolte notées tout au long des chaînes d'approvisionnement, accentuées par la faible organisation de la filière, l'enclavement des bassins de production et l'instabilité des circuits de commercialisation. La production nationale est supérieure à la consommation du pays qui s'élèverait à 605 054 tonnes, soit une valeur de 148,5 milliards de FCFA. Cependant, il ne s'agit que d'un excédent apparent car si l'on tient compte de toutes les pertes subies par le produit après sa récolte, l'offre de tomates fraîches au Cameroun serait totalement déficitaire. Cet important déficit est comblé en

partie par les importations de tomate concentrée qui constituent une offre de 6 000 tonnes pour une demande de 60 390 tonnes environ.[13]

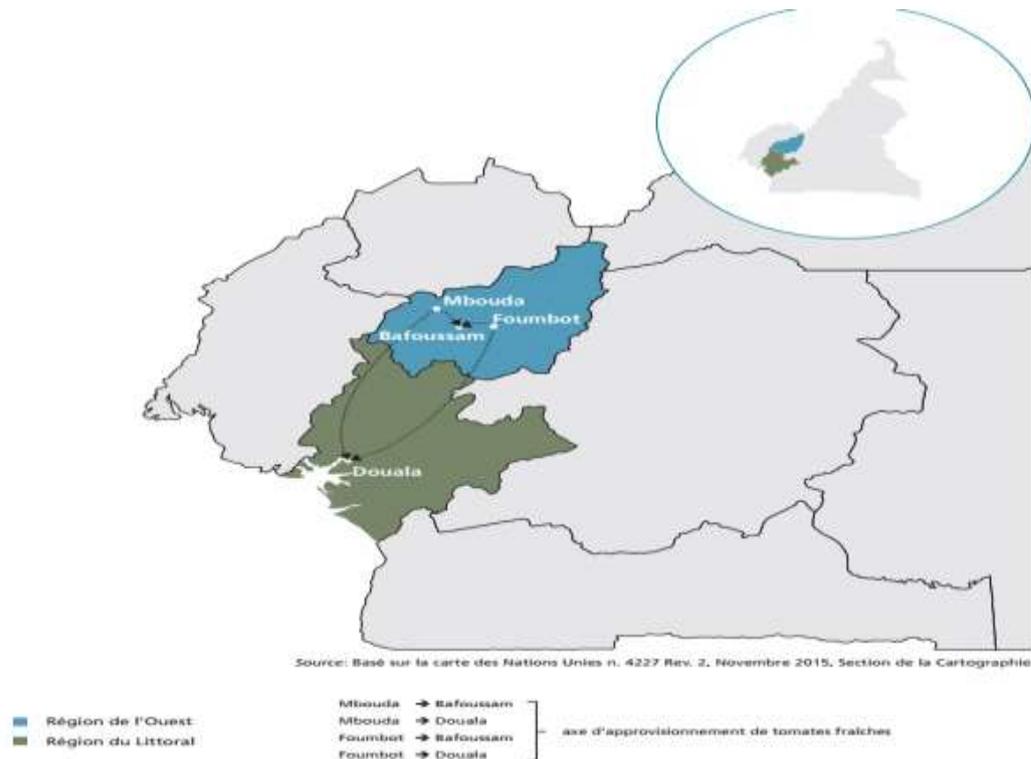


Figure 1.6 : Bassins de production de la région de l'ouest et marchés de consommation de Bafoussam (ouest) et Douala (littoral) Octobre - Novembre 2013 [8]

I.3.3 Composition de la tomate fraîche

La composition biochimique des fruits de tomate fraîche dépend de plusieurs facteurs, à savoir la variété, l'état de maturation, la lumière, la température, la saison, le sol, l'irrigation et les pratiques culturales. Le jus représente la majeure partie des constituants physiques de la tomate. La tomate est constituée de 94 à 96 % de jus, 1 à 1.5 % de pépins et 1,5 à 2,5% de pelures et fibres. Les sucres contenus dans la tomate sont essentiellement des sucres réducteurs, le glucose représente 0,88-1,25%, et le fructose 1,08-1,48%.

Tableau 1.1 : Composition de la tomate fraîche

Eau (%)	Glucides (%)	Substances Azotées (%)	Lipides (%)	Cendres (%)
93,5	3,6	0,95	0,30	0,74

La tomate est une plante annuelle, qui peut atteindre une hauteur de plus de deux mètres. Cependant, il est possible de récolter d'une même plante pendant plusieurs années d'affilée. Ses parties sont :

- **La racine** : elle est le plus souvent pivotante et pousse jusqu'à une profondeur de 50 ou plus ;
- **La tige** : elle est pleine, fortement poilue et glandulaire, elle pousse jusqu'à 2 et 4m;
- **Les fleurs** : elles sont bisexuées, régulières et entre 1,5 et 2 cm de diamètre, elles poussent opposées aux/ou entre les feuilles, le tube du calice est court et velu, les sépales sont persistants, en général il y a 6 pétales qui peuvent atteindre une longueur de 1 cm, qui sont jaunes et courbées lorsqu'elles sont mûres. Il y a 6 étamines et les anthères ont une couleur jaune vif et entourent le style qui a une extrémité stérile allongée. L'ovaire est supère avec entre 2 et 9 carpelles. En général la plante est autogame, mais la fécondation croisée peut avoir lieu. Les abeilles et les bourdons sont les principaux pollinisateurs.
- **Les feuilles** : elles sont disposées en spirale, 15 à 50 cm de long et 10 à 30 cm de large. Les folioles sont ovées à oblongues, couvertes de poils glandulaires. Les grandes folioles sont parfois pennatifides à la base. L'inflorescence est une cyme formée de 6 à 12 fleurs. Le pétiole mesure entre 3 et 6 cm ;
- **Les fruits** : baie charnue, de forme globulaire ou aplatie avec un diamètre de 2 à 15 cm. Lorsqu'il n'est pas encore mûr, le fruit est vert et poilu, la couleur des fruits mûrs varie du jaune au rouge en passant par l'orange, en général les fruits sont ronds et réguliers ou côtelés, contenant aussi des graines qui sont nombreuses, en forme de rein ou de poire, elles sont poilues, beiges, de dimension 3 à 5 mm de long et 2 à 4 mm de large, l'embryon est enroulé dans l'albumen. 1000 graines pèsent approximativement 2,5 à 3,5 g.[13]



Figure 1.7 : Parties d'une plante et d'un fruit de tomate

I.3.4 Les exigences de la culture

I.3.4.1 La température et la lumière

La tomate demande un climat relativement frais et sec pour fournir une récolte abondante et de qualité. La tomate est une plante de saison chaude. Le zéro de germination est de 12°C. L'optimum de la croissance des racines est de 15 à 18°C en phase de grossissement des fruits, l'optimum de la température ambiante est de 25°C le jour et de 15°C la nuit. La plante de tomate s'est adaptée à une grande diversité de conditions climatiques, allant du climat tempéré vers le climat tropical chaud et humide.

Tableau 1.2 : Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate [4]

Phases	Température (°C)		
	Minimum	Intervalle optimale	Maximum
Germination des graines	11	16-29	34
Croissance des semis	18	21-24	32
Mise à fruit	18	20-24	30
Développement de la couleur rouge	10	20-24	30

N.B : Dans les basses-terres des pays tropicaux, la température minimale qui survient la nuit est également à surveiller. **Des températures inférieures à 21°C peuvent provoquer l'avortement des fruits**

I.3.4.2 L'eau et humidité

L'alimentation hydrique est un facteur important du rendement et de qualité, entre autres du calibre. La tomate est gourmande en eau. Une alimentation en eau irrégulière entraîne une irrégularité du point de vue de l'alimentation en calcium et entraîne donc la nécrose apicale. Les besoins hydriques sont surtout importants à partir de la floraison du deuxième bouquet.

I.3.4.3 La salinité

Selon Brun et Montardon, 1987. Il est généralement considéré qu'un excès de vigueur du plant de tomate en début de culture retarde la précocité de la production. La modulation de la concentration saline de la solution nutritive est un des moyens utilisés pour maîtriser le développement du jeune plant.

I.3.4.4 Le sol

Les préférences en type de sol sont très larges. Le sol doit être bien aéré et drainant. L'asphyxie racinaire, même temporaire est préjudiciable à la culture. La teneur en matière organique du sol doit être assez élevée (2-3%) pour obtenir de bons rendements, La tomate pousse bien sur la plupart des sols minéraux qui ont une bonne capacité de rétention d'eau et une bonne aération.

I.3.4.5 Les variétés

On distingue cependant plusieurs catégories de tomates, selon le mode de croissance de la plante et surtout selon le type de fruit :

- Les variétés à fruit plat et côtelé, de type tomate de Marmande, dont le poids est élevé puisqu'il peut dépasser 1 kg ;
- Les variétés à fruit arrondi, dont le poids varie de 100 à 300 g, pour lesquelles il existe plus particulièrement de nombreuses variétés hybrides dont les fruits se conservent longtemps ;
- Les variétés à fruit allongé avec une extrémité arrondie, de type Roma, ou pointue, de type Chico. Ces dernières variétés sont surtout destinées à l'industrie. Elles ont toutes un port déterminé et leurs fruits répondent à un certain nombre de critères technologiques liés à leur transformation. Certaines de ces variétés se prêtent à la récolte mécanique ;
- Les variétés de petite dimension et de faible poids, tomate cerise, cocktail.

I.3.4.5.1 Les types de plantes de tomate

L'on peut distinguer deux types différents de plantes de tomates, selon le mode de croissance :

Plante croissance indéterminée

Il faut choisir une variété à croissance indéterminée lorsque l'on souhaite une longue période de récolte. Ces variétés continuent à pousser après la floraison. C'est cette caractéristique qui est désignée par le terme « croissance indéterminée ». Cependant, sous des conditions tropicales, les maladies et les attaques d'insectes freineront la croissance. En général, les tomates à croissance indéterminée ont un feuillage plus important. Il en découle

que la température au sein de la culture est relativement basse et que les fruits poussent à l'ombre des feuilles. Comme ils sont couverts, les fruits ne souffrent pas du soleil et mûrissent plus lentement. Le mûrissage lent et le rapport feuille/fruit élevé améliorent le goût des fruits, notamment le goût sucré. Les variétés à croissance indéterminée nécessitent des tuteurs, des cages ou des treillis pour les appuyer.

Plante à croissance déterminée

Les variétés à croissance déterminée se supportent elles-mêmes et n'ont généralement pas besoin de tuteur. Lorsque les conditions météorologiques sont rigoureuses, comme en cas de typhon, il est conseillé de protéger les plantes. Les variétés à croissance déterminée arrêtent leur croissance après la floraison. Elles requièrent moins de main d'œuvre, c'est pourquoi elles sont souvent choisies pour la culture commerciale. La mise à fruits à lieu dans une période plus courte qui ne dure que deux ou trois semaines et les fruits mûrissent bien plus rapidement que ceux des variétés à croissance indéterminée.

I.4.5.6 Les semis

En général l'on repique les tomates car l'on obtient de bien meilleurs résultats lorsque les semis sont levés en pépinière. En pépinière, il faut moins de graines pour produire le nombre de pieds souhaités. L'on peut y sélectionner les plantules en fonction de leur taux de croissance et de leur état de santé avant de les repiquer sur le terrain. L'on pourra y protéger convenablement les plantules. Par ailleurs, la distance de plantation est plus régulière en cas de repiquage qu'en cas d'ensemencement direct sur le terrain.

Tableau 1.3 : Espacement de plantation pour les deux types de plantes de tomates

Mode de croissance	Distance entre les lignes et les plantes
Déterminée	1m x 0,5m
Indéterminée	0,75m x 0,5m

I.3.4.7 La récolte

Il est très important de récolter au bon moment et de procéder à un traitement post récolte appropriée des fruits. La teneur en eau élevée des tomates les rend vulnérables aux pertes post-récolte. Les fruits trop mûrs sont facilement endommagés ou commencent à pourrir. La première mesure qui permet de limiter le degré des dommages post-récolte est de récolter au

bon moment. Il sera nécessaire de faire plusieurs cueillettes puisque les fruits de la tomate ne mûrissent pas tous en même temps. La première cueillette peut avoir lieu 45 à 55 jours après la floraison, ou 90 à 120 jours après les semis. La récolte s'étendra sur environ un mois en fonction du climat, des maladies et ravageurs et du cultivar planté. Au cours d'une campagne il faudra entre 4 et 15 cueillettes.

I.3.4.8 Les principales formes de et couleurs de tomate

I.3.4.8.1 Les formes

Il existe plusieurs formes de tomates, nous distinguons entre autres :

- Forme aplatie ;
- Forme légèrement aplatie ;
- Forme arrondie ;
- Forme haute et ronde ;
- Forme cylindrique ;
- Forme de poire ;
- Forme brune.

I.3.4.8.2 Les couleurs

Il existe une multitude de couleurs de tomates, nous avons entre autres :

- La couleur noir ;
- La couleur rouge ;
- La couleur jaune ;
- La couleur verte.[13]



Figure 1.8 : principales formes et couleurs de la tomate

I.4 Les types de tomates

I.4.1 Tomate de table

Elles sont grosses, elles sont moins rouges que les tomates industrielles, elles contiennent beaucoup de pépins et d'eau, leur peau est peu résistante. Elles sont utilisées pour la salade ou transformées en purée pour sauce.

- Leur rendement à l'hectare est faible comparé à la tomate industrielle ;
- Elles ne peuvent donc pas faire l'objet d'une transformation industrielle.

I.4.2 Tomate industrielle

De dimensions souvent plus petites et parfois allongées, aspect très rouge désiré pour les sauces, elles ont un taux de matières sèches plus élevées aussi elles ont une peau résistante. Ce sont ces tomates qui se prêtent à une transformation industrielle comme leur nom l'indique. Sa culture est inconnue des paysans mais pratiquée, par quelques rares maraîchers. C'est dire donc que toute action tendant à résoudre le problème de la conservation doit tenir compte de la variété de tomates produites. Or les variétés produites (tomates de tables) ne répondent pas du tout aux techniques actuelles de conservation ou de transformation. Il faut résoudre un premier problème qui est agronomique en changeant de variétés de tomates.

Les avantages sont évidents :

- Meilleur rendement pour la culture
- Possibilité de transformer la production

I.5 LA TRANSFORMATION DE LA TOMATE

La transformation de la tomate est effectuée en tant que méthode de conservation pour les tomates de table fraîches. Elle peut être effectuée pour autoconsommation sur l'exploitation tout comme pour des fins de commercialisation, elle permet un régime plus varié et la disponibilité du produit hors saison pour le ménage agricole. Dans le cas de commercialisation, cela permet de générer des revenus supplémentaires ainsi que d'offrir un assortiment plus varié aux acheteurs. Cela permet une diversification des revenus, car l'agriculteur pourra vendre des tomates fraîches pour les revenus en saison de récolte, mais hors saison il aura également des produits à vendre et donc des revenus. Mais la valeur nutritive des tomates est plus élevée lorsqu'on les consomme à l'état frais, ceci vaut surtout pour la teneur en vitamines qui sont solubles dans l'eau. [11]

I.5.1 Le séchage en vue de l'obtention de la tomate en poudre

Le procédé pour obtenir de la tomate en poudre est le suivant :

I.5.1.1 Le choix des tomates

Choisissez des tomates mûres, rouges, avec une texture ferme, sans maladie ni moisissure.[7]

- **Le lavage** : Lavez les tomates fraîchement récoltées avec de l'eau propre, dans un grand récipient.
- **Le tranchage** : Coupez les tomates en tranches de 0,5 cm d'épaisseur.
- **Le séchage** : Etalez les tranches de tomate sur une plate-forme surélevée et propre pour les sécher, pour la production commerciale, on recommande le séchage des tomates au moyen d'un séchoir à air chaud.
- **Le moulage** : Moulez les tomates sèches à l'aide d'un moulin avec un broyeur à marteau muni d'un tamis avec des mailles appropriées.
- **Le conditionnement** : La poudre de tomate est ensachée dans des sacs étanches à l'humidité. On peut y inscrire la date de fabrication et la date de péremption sachant que la poudre a une durée de vie de 3 mois au moins lorsqu'elle est bien conservée.
- **Fabrication de la pulpe de tomate** : Afin d'obtenir de la pulpe de tomate, il faut :

-Le choix des tomates Choisissez des tomates mûres, rouges, avec une texture ferme, sans maladie ni moisissure.

-Le lavage Lavez les tomates fraîchement récoltées avec de l'eau propre, dans un grand récipient.

- L'ébouillantage Mettez les tomates dans une marmite, ajoutez-y de l'eau et faites-les bouillir jusqu'à ce qu'elles deviennent tendres et que leur peau puisse se détacher facilement, mais ne les épluchez pas.

➤ **Le dépulpage** : Il s'effectue en quatre étapes :

- Retirez les tomates de l'eau à l'aide d'une grande louche perforée et mettez-les dans un autre récipient ;

- Ecrasez-les à l'aide d'une grande cuillère en bois ;

- Utilisez une passoire de cuisine pour séparer la pulpe des graines et des peaux ;

- Jetez les graines et les peaux et gardez seulement la pulpe.

Pour une production à des fins commerciales, un d'épulpeur de fruit (mécanique) allégera le travail et augmentera le rendement.

N.B : Avec de la pulpe de tomate, on peut fabriquer la confiture de tomate et le ketchup de tomate.[13]

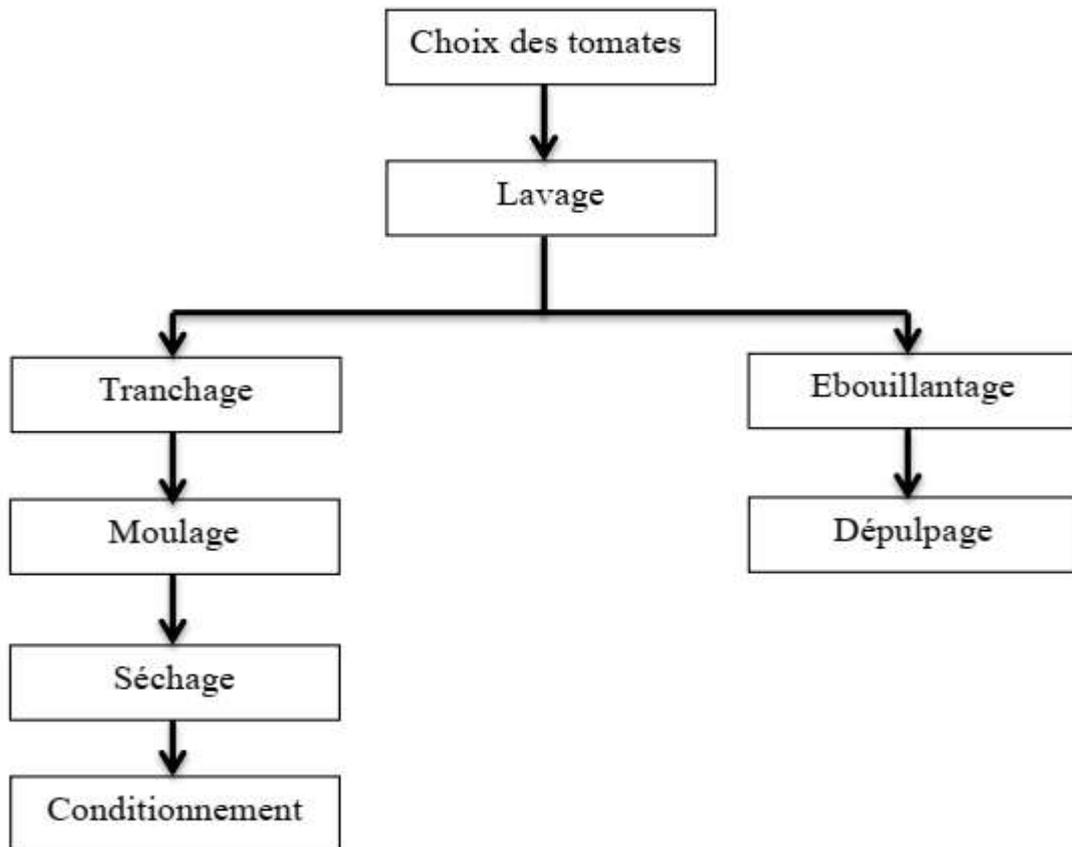


Figure 1.9 : Etapes de transformation de la tomate

II. LES TYPES DE SECHOIRS

Notre four ici a pour rôle de sécher la tomate alors nous allons nous appesantir sur les types de séchoirs afin de mieux faire une analyse critique.

II.1 Séchoirs solaires directs

Trois types de séchoirs solaires directs ont été répertoriés : le séchoir tente, le séchoir armoire directe, et le séchoir type. Ils ont tous une structure en bois. La tente et la serre sont recouvertes d'un film plastique en polyéthylène et l'armoire indirecte d'une plaque en verre.

Leurs capacités inférieures à celles du séchage traditionnel sont comprises entre 5 à 20 kg. [6]

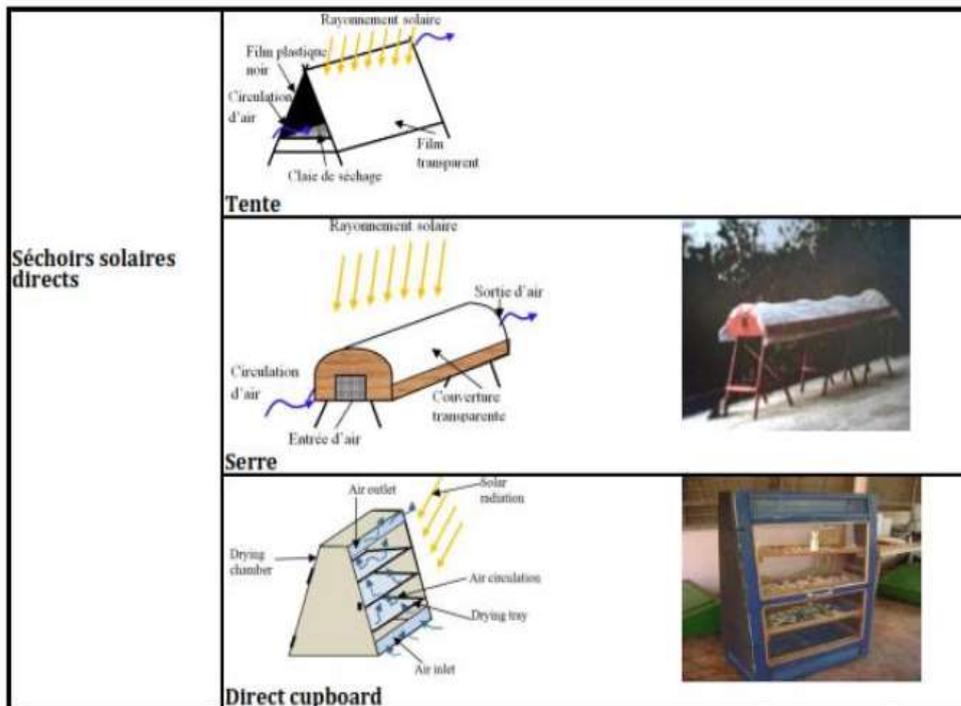


Figure 2.1 : Séchoir solaire directs inventoriés, Source : Tchamye (2011)

Avantages :

- Séchage rapide ;
- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes ;
- Peu onéreux ;

Inconvénients :

- Destruction de certaines vitamines ;
- Risque de dépassement de la température de séchage maximale admissible par le produit ;
- Mauvaise circulation de l'air ;
- Productivité assez faible.

II.1.2 Les séchoirs solaires classique

Les aliments sont étalés au soleil sur des nattes, des claies, des plateformes voire à même le sol et séchés à l'air libre. Cette méthode empirique intéresse la plupart de produits récoltés (fruits, céréales, légumes, poissons...) et est peu coûteuse à mettre en œuvre ; elle traite donc des quantités importantes de produits mais nécessite beaucoup de manipulation humaine. Elle dépend de la température, l'humidité et la ventilation naturelle de l'air. Le séchage traditionnel présente cependant quelques limites :

- Manipulation fastidieuse du fait des intermittences du climat ;
- Perte de certaines vitamines par l'exposition directe au soleil ;

- Produits exposés aux infestations (insectes, oiseaux, poussières, etc...) [6].



Figure 2.2 : séchoir solaire classique

II.1.3 Séchoir solaire indirect

Dans les séchoirs indirects, le rayonnement n'arrive pas directement sur le produit, il est préchauffé dans une chauffe air (capteur) puis redirigé (par ventilation) dans la chambre de séchage pour déshydrater le produit. Afin d'obtenir un produit séché de qualité et dans des délais favorables, on a généralement recours à la ventilation forcée. Le produit est disposé sur des claies dans l'enceinte de séchage en fonction de la quantité à sécher. [6]



Figure 2.3 : Séchoir solaire indirect

Avantages :

- Séchage rapide ;
- Bonne qualité du produit ;
- Produit parfaitement protégé et non dégradé ;
- Peu coûteux.

Inconvénients :

- Coûts d'installation élevé ;
- Mise en œuvre complexe ;
- Faible débit du produit.

II.1.4 Séchoirs solaires mixtes

Dans ce dispositif, il est possible de combiner l'action des rayonnements solaires arrivant directement sur le produit à ceux recueillis et préchauffés par des capteurs. Les

calculs d'échanges de chaleur et de matière dans ce type de dispositif sont cependant mal connus. [23]



Figure 2.4 : séchoir solaire mixte

Avantages :

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques ;
- Forte augmentation de la productivité ;
- Bonne qualité du produit.

Inconvénients :

- Cout de production et d'investissement élevé ;
- Le personnel de maintenance doit être qualifié.
- Absence de source d'énergie en saison de pluie

II.1.5 Les séchoirs solaire hybrides

Afin de pallier aux limites imposées par les séchoirs solaires, une énergie d'appoint est souvent associée à l'énergie solaire (fuel, électricité, bois, charbon...) pour assurer un niveau de séchage élevé et la ventilation notamment en période non ou peu ensoleillée. Cette solution est très onéreuse et est adaptée pour des productions à grande échelle et où le séchage ne doit pas dépendre des conditions climatiques. [8]



Figure 2.5: Séchoir solaire hybride

Avantages :

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques ;
- Forte augmentation de la productivité ;
- Bonne qualité du produit.

Inconvénients :

- Cout de production et d'investissement élevé ;
- Le personnel de maintenance doit être qualifié.
- Absence de source d'énergie en saison de pluie.

II.1.6 Séchage sur claie



Figure 2.6 : Séchage sur claie dans un village au centre Cameroun

Avantage :

- Facile à mettre en œuvre ;
- Le coût lui aussi n'étant pas élevé.
- Il pour la particularité le fait que le produit ne se retrouve pas au sol.

Inconvénient :

- Le véritable problème avec le séchage sur claies est la pluie.

II.1.7 Séchoirs sur hangar

C'est une technique efficace qui consiste en la construction d'aires de séchages sous serres ; les produits sont protégés contre les poussières, insectes, intempéries...etc. Cependant, lorsque la période de récolte correspond avec celle de la saison des pluies comme c'est le cas en Afrique, il est difficile d'arriver à une teneur en eau finale de 7,5 et l'utilisation du séchoir thermique artificiel s'avère nécessaire. [22].



Figure 2.7 : hangars de séchage

Avantages

- Facile à mettre en œuvre ;
- Coût peu élevé ;
- Il a pour particularité le fait que le produit ne se retrouve pas au sol ;
- Le produit est à l'abri des poussières, insectes, oiseaux, intempéries...etc.

Inconvénients :

- Séchage non contrôlé ;
- Durée de séchage élevé ;
- Insécurité du produit en cas de pluie ;
- Risque de moisissure élevé ;
- Aire de séchage importante.

II.1.8 Autres types de séchoirs

Dans cette catégorie de séchoirs, nous avons à faire aux séchoirs beaucoup plus industriels. Les procédés se divisent en deux grands types : les sècheurs directs (ou séchage convectif) et indirects. Dans les premiers, les aliments sont mis en contact direct avec la source de chaleur qui peut être de l'air chaud ou de la vapeur surchauffée. Dans les seconds, les aliments sont séparés de la source de chaleur qui est constituée de parois chauffées par un fluide caloporteur. Il existe également des procédés pour lesquels les étapes de séchage et d'incinération se produisent successivement au sein du même appareil [23].

II.2 Séchoir direct

Les différents types de sècheurs directs se distinguent par la manière dont l'agent séchant est mis en contact avec le produit. Ils sont surtout utilisés pour obtenir un séchage quasi total. La technologie a l'avantage d'être simple. Cependant, les équipements périphériques peuvent être sophistiqués et volumineux : traitement des gaz, séparation gaz-solide... [24].

II.2.1 Séchoir artisanal (à soufflet)

Ce sont des séchoirs fait à base des matériaux de récupérations, ils sont utilisés pour le séchage du poisson et des produits agricoles. Ils sont constitués d'une partie supérieure (claires) sur laquelle on dispose les produits à sécher et d'une partie inférieure (chambre de production de la chaleur dont le combustible utilisé est essentiellement le charbon) Du charbon de bois est utilisé pour alimenter les foyers. Cependant pour atteindre des températures élevées, l'air est pompé dans le foyer à l'aide d'un ventilateur (moins économique) pour attiser la braise.[13]

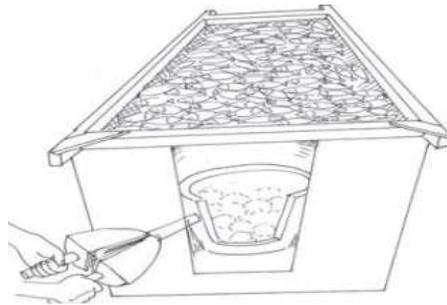


Figure 2.8 : Séchoir artisanal (à charbon avec soufflet).

Avantages :

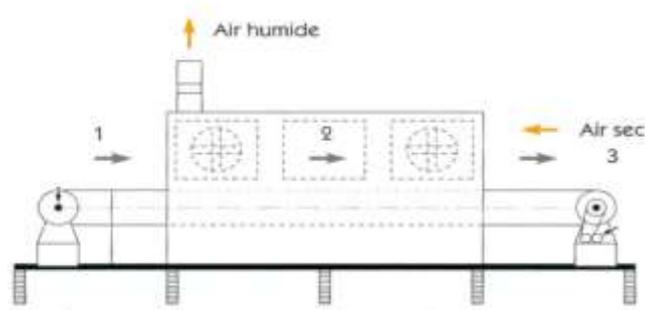
- Peu encombrant ;
- Débit de séchage important ;
- Faible main d'œuvre ;
- Moins onéreux ;
- Simplicité de la technologie.

Inconvénients :

- Pas ergonomique ;
- Détérioration de la qualité du produit après séchage ;
- Nécessite une source d'énergie pour le fonctionnement du soufflet.

II.2.2 Le convoyeur à bande

Après une opération de **granulation** qui permet d'augmenter la surface exposée à l'air chaud, la boue est distribuée sur une bande métallique perforée. Cette bande passe au travers de différentes chambres de séchage dans lesquelles de l'air chaud circule à courant parallèle ou à courant croisé. L'agent séchant peut-être produit par combustion (gaz naturel, biogaz) ou par passage dans des échangeurs de chaleur. Selon les chambres, la vitesse, la température et le taux de recirculation de l'agent séchant peuvent être modulés afin d'assurer un séchage optimum. Dans certaines configurations, la bande effectue plusieurs trajets dans les chambres.[27]



1. Entrée du produit humide ; 2. Produit en défilement ; 3. Sortie du produit sec.

Figure 2.9 : Sécheur à bande à courant parallèle

Avantages :

- Bonne qualité du produit séché ;
- Peu encombrant ;
- Simplicité de la technologie ;
- Mise en forme aisée : granulation ou extrusion ;
- Faibles durées de séchage.

Inconvénients :

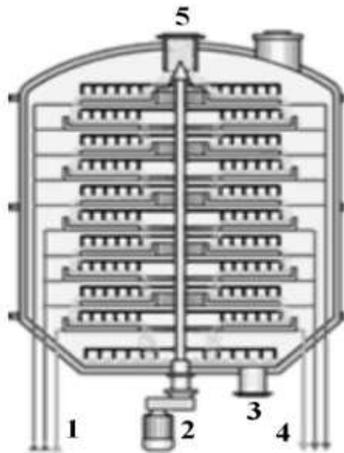
- Coûteux ;
- Généralement réservés à des applications à grande échelle, ou à des applications commerciales pour lesquelles la qualité et le débit du produit fini ne peuvent dépendre des conditions climatiques.

II.2.3 Séchoirs indirects

Le transfert de chaleur peut s'effectuer par conduction ou rayonnement, selon les positions relatives du solide et des surfaces chaudes. Contrairement aux sécheurs directs, l'enceinte de séchage est sophistiquée alors que les périphériques sont plus simples.

II.2.3.1 Séchoir multi-étage vertical

Ce sécheur à axe vertical renferme une série de plateaux circulaires sur lesquels la boue est déposée. Ces plateaux sont munis de jaquettes dans lesquelles circule un fluide chaud (huile thermique ou vapeur surchauffée). Des bras racleurs permettent le passage de la boue vers l'étage inférieur grâce à des rainures présentes dans chaque plateau. Au bas du sécheur, le produit séché est récupéré grâce à un grattoir.[27]



1. Entrée des fluides thermiques ; 2. Motorisation de l'axe vertical ; 3. Sortie du produit sec ;
4. Sortie des fluides thermiques ; 5. Entrée du solide humide.

Figure 2.10 : Sécheur à plateaux

Avantages :

- Bonne qualité du produit séché ;
- Robustesse ;
- Simplicité des périphériques ;
- Plus facilement sécurisable ;
- Faibles débits gazeux à traiter ;
- Pas de risque de contamination du produit à sécher ;
- Pas besoin de d'importante

Inconvénients :

- Durée de séchage longue ;
- Technologie complexe ;
- Coût de production et d'investissement élevés ;
- Nécessité d'approvisionnement en carburant, électricité, gaz ;
- Le personnel de maintenance doit être qualifié.

II.2.3.2 Le séchage par atomisation

Le procédé de séchage par atomisation (spray drying) consiste à produire une poudre très fine, obtenue à partir d'un circuit de produit liquide, par évaporation d'un solvant. Ceci est réalisé en mélangeant, dans une enceinte de séchage, de l'air chaud avec un liquide atomisé (pulvérisé) ayant des gouttelettes de même taille et avec un rapport surface/masse élevé. Ainsi le solvant s'évapore rapidement et de façon uniforme par contact direct. [3]

Le séchage par atomisation comprend **quatre (04) étapes** principales, à savoir :
La préparation à l'atomisation : le produit à sécher est présenté sous la forme d'une solution liquide homogène sans impureté ou d'une pâte

- **L'atomisation** : passage de l'air chaud à travers une turbine centrifuge tournant à très grande vitesse ou une buse ;
- **Le séchage** : évaporation du brouillard et apparition de la phase solide (dans le cas d'une solution, le liquide s'évapore et le solide se cristallise) ;
- **Séparation poudre sèche et air humide** : la poudre formée est entraînée par l'air humide puis séparée de celui-ci au moyen d'un cyclone.[3]



Figure 2.11: Tour d'atomisation industrielle

Avantages

- Récupération de solvants volatils et/ou des mauvaises odeurs ;
- Elimination des risques de feu et d'explosions ;
- Bonne qualité du produit séché.

Inconvénients

- Difficulté à traiter certains produits thermosensibles ;
- Coût élevé de l'équipement ;
- Applicable uniquement au produit pompable.

II.3 Les conditions de séchage des produits agro-alimentaires

Sécher un produit consiste à extraire une grande partie de l'eau qu'il contient jusqu'à le porter à un état jugé suffisamment sec de façon à lui permettre sa bonne préservation. Le séchage permet donc, de réduire, voire supprimer les pertes de récoltes par dégradation, ainsi, d'atteindre une autonomie dans le temps pour les produits saisonniers. Ce pendant tous les produits agricoles ne peuvent être séchés dans les mêmes conditions car chaque produit possède des caractéristiques physico-chimiques particulières. Le tableau 2.1 regroupe les conditions de séchage de certains produits agricoles.

Tableau 2.1 : condition de séchage de certains produits agro-alimentaires

Produits Séchés	Teneur en eau initiale Xi (Base sèche, %)	Teneur en eau finale Xf (Base sèche, %)	T° max de séchage (°C)	Forme	Diamètre (mm)	Epaisseur (mm)
Céréale						
Maïs	32-54	14-18	60	Graines	/	3 - 7.5
Riz	32	12	50	Graines	/	< 2.5
Sorgho, Mil	27	16	60	Graines	/	1.5 - 6.5
Tubercule						
Igname	233-400	11-16	65	Tranche	/	4 - 7.5
Manioc	163-233	11-20	65	Tranche	/	4 - 7
Fruit						
Ananas	400-567	14-11	65	Tranche	/	3 - 7
Banane	257-400	14-18	75	Tranche	3-3.5	0.5 - 4
Mangue	400	14-19	70	Tranche	0.5 – 1.5	/
Papaye	400	14-19	70	Tranche	/	/
Légumes						
Carottes	233	5	75	Tranche	2.5	2
Choux	400	5	60-65	Tranche	/	/
Tomates	1900	8	50-70	Tranche	/	4-5
Piment, poivron	245-567	5-15	70	Tranche, pièce	1.5-4	2.5
Ail, Oignon	400-565	4	55	Tranche	3-7.5	/
Haricot vert	233	5	75	Tranche, pièce	4.5-7	0.4 - 0.7
Gombo	400-669	12-18	66	Tranche	2.5-4	3 - 4.5
Gingembre	400	11	60	Tranche	/	/
Légumes feuilles	400	11	60	Feuille	/	< 4
Spiruline	400	9	40-60	Fibre	/	/

Source : Tchamye (2011)

II.4 Choix de la technologie de séchage appropriée

Le choix d'une technologie de séchage est une tâche très méticuleuse qui exige donc beaucoup d'attention de la part du ou des concepteur(s) en charge de celle-ci. La moindre négligence peut conduire à des pertes de temps considérable lors de l'opération de séchage proprement dit causant ainsi des pertes financières importantes que devons supporter l'entreprise ou le propriétaire de la machine finale. Il est donc important de maîtriser les critères ou les facteurs qui influencent le choix de la technologie de séchage la plus adéquate.

II.4.1 Critères de choix

En effet le domaine du séchage est un domaine très vaste avec de nombreuses variables à prendre en compte lors de la conception d'un séchoir. Parmi ces variables nous pouvons citer entre autres :

- La capacité de production du séchoir voulu par les clients peut varier de 0.1kg/h à 100T/h ou plus et le temps de séchage (temps que le produit mets dans la chambre de séchage) varie entre quelques heures et 3 mois ;
- La température de séchage pouvant se trouver à des points en dessous du point triple de l'eau (point du diagramme de phase pour lequel les trois états de la matière coexistent en équilibre). Elle est égale à $T=273,16^{\circ}\text{K}=0,01^{\circ}\text{C}$ et $P=611\text{Pa}=0.0006\text{atm}$ et variant jusqu'à des points supérieurs au point critique ($T=374^{\circ}\text{C}$ à $P=221\text{ bars}$) ;
- La taille des produits varie de quelques microns à des dizaines de centimètre (épaisseur ou grosseur) ; La porosité des produits variant de 0 à 99.9% ;
- De nombreuses contraintes physiques et chimiques des produits à sécher qui rendent donc difficile le travail de conception ;
- La qualité du produit à sécher (liquide, solide, semi-solide, pâteux, boue, gluant, collant...) ;
- Le mode de transfert d'énergie lors du séchage (conduction, convection, radiation) ;
- Les sources d'énergie disponible.

Chaque propriété qui caractérise un séchoir sera toujours soit d'une grande importance ou alors négligeable. Pour un produit particulier, des conditions spécifiques de séchage sont requises dans l'optique d'obtenir un séchage optimal tout en combinant coût et temps. Cependant plusieurs séchoirs peuvent faire l'affaire (sécher le produit), mais il y aura toujours une différence dans la qualité, le temps et le prix.

II.4.2 Choix proprement « dit »

L'énergie, l'environnement, la sécurité, la qualité du produit séché et le coût sont des facteurs importants qui influencent considérablement le choix d'une technologie appropriée de séchage. Il faut donc faire attention de ne pas copier une technologie utilisée ailleurs pour l'implanter chez soi sans au préalable l'avoir étudié. L'avant et l'après séchage sont parfois plus coûteux que l'opération séchoir. Cependant dans les critères de choix, c'est le coût de l'opération de séchage proprement dit qui est pris en considération. Pour réduire au maximum le stress

qu'on souvent les concepteurs lorsqu'il faut choisir parmi toutes les caractéristiques des séchoirs existants, certains chercheurs ont développé certaines méthodes de sélection. Ces méthodes lorsqu'elles sont bien exploitées donnent des résultats concluants.

CHAPITRE II : ETUDE CONCEPTUELLE

Il est question pour nous dans ce chapitre de faire une analyse externe suivi d'une analyse interne de notre four de production de poudre de tomate, ceci dans le but d'évaluer la faisabilité et le cycle de vie de notre machine.

III.1 ANALYSE FONCTIONNELLE

L'analyse fonctionnelle est un outil fondamental dans le processus de conception car elle permet d'explorer de nouveaux concepts et de définir leurs architectures. Elle permet d'améliorer ou d'affiner les nouvelles exigences fonctionnelles du produit (machines, système de production...), d'associer ces fonctions aux composantes physiques, de s'assurer que toutes les fonctions nécessaires sont prises en comptes et qu'aucune fonction non nécessaire se glisse dans la liste. En fin elle permet de cerner les relations existantes entre les composantes du produit [18].

III.1.1 Saisie du besoin

Suite à la croissance de la filière tomate dans le secteur agricole, et aux vues de l'importance de la tomate de par sa valeur nutritive et pharmaceutique, les personnes et les particuliers investissent de plus en plus dans ce secteur. La qualité du produit devient donc un atout majeur pour les paniers des ménagères ainsi que certaines industries pharmaceutiques notamment le bon conditionnement. Or ces personnes et particuliers ne possèdent pas pour la plupart des dispositifs appropriés pour conditionner la tomate elle se fait encore plus particulièrement en Afrique de manière traditionnelle. D'où la nécessité pour nous de mettre sur pied un four de production de poudre de tomate avec un temps de séchage optimal et a la sortie un produit bio de qualité.[17]

III.1.2 Enonce du besoin

Important dans la suite de la démarche de conception c'est la première étape de l'analyse fonctionnelle. Elle permet de spécifier ou d'identifier clairement le besoin afin de toujours l'avoir à l'esprit tout au long du développement du produit. Pour accomplir sans ambiguïté cette opération on utilise très généralement un outil appelé diagramme bête à corne en répondant aux questions suivantes :

- **A qui le produit rend-il service ?**

Réponse : le produit rend service aux producteurs, aux commerçants, aux ménages et aux restaurants.

- **Sur quoi le produit agit-il ?**

Réponse : le produit agit sur le fruit de tomate.

- **Dans quel but le produit existe-t-il ?**

Réponse : le produit existe dans le but de produire de la poudre de tomate (en réduisant considérablement la teneur en eau de la tomate).

Ainsi nous pouvons donc construire le diagramme « **bête à cornes** » suivant :

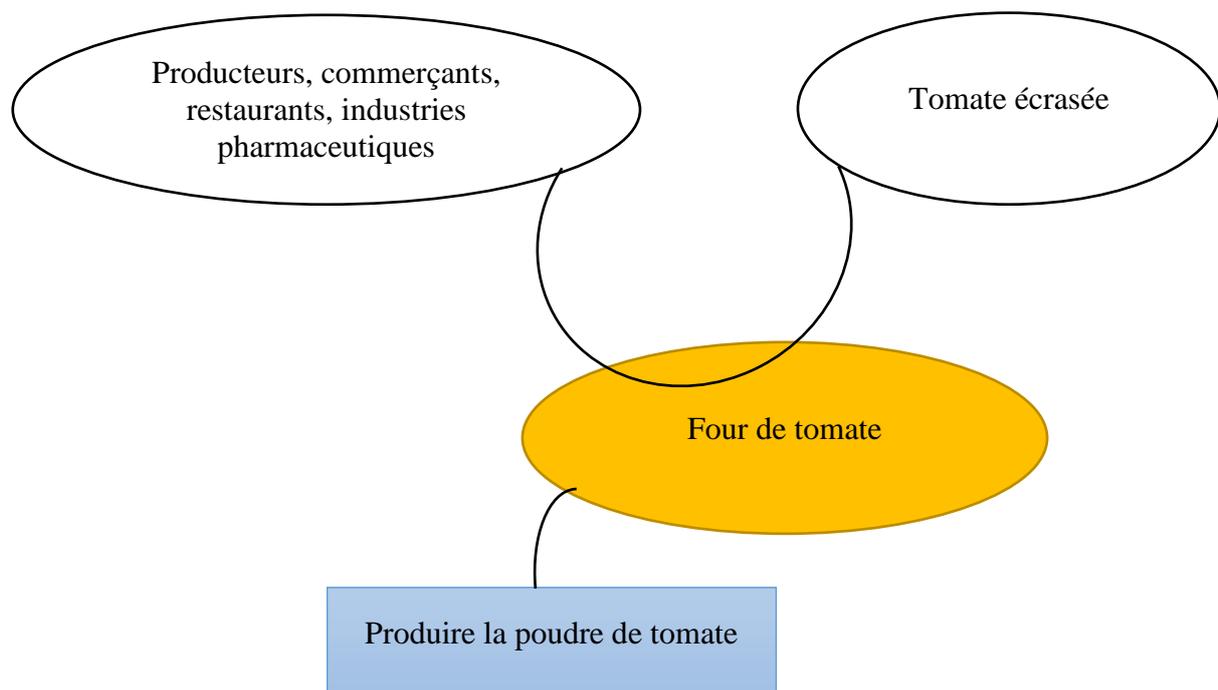


Figure 3.1: diagramme bête a corne

III.1.3 Validation du besoin

Tout aussi importante, cette étape permet au concepteur de ne pas se lancer à l'aveuglette dans le développement d'un produit qui pourra très vite être dépassé ou alors sans utilité certaines. Tout comme dans le cas précédant il faut répondre à trois questions assez simples.

- **Pourquoi** le besoin existe-il c'est-à-dire pourquoi le besoin de réaliser un four de production de poudre de tomate existe-il ?

Réponse 1 : Pour réduire les pertes des producteurs de tomates ;

Réponse 2 : Pour réduire les pénuries de tomate sur le marché à toutes les périodes de l'année au même prix ;

Réponse 3 : Pour une meilleure méthode de conservation en augmentant la durée de vie de la tomate tout en réduisant au maximum sa teneur en eau.

- **Pourquoi** (dans quel but) le besoin existe-t-il ?

Réponse : Le dispositif est conçu pour produire de la tomate en poudre(séchée) et permettre aux producteurs de minimiser les pertes grâce à sa conservation.

- Qu'est ce qui pourrait le faire évoluer ?

Réponse 1 : Non, car la tomate séchée est **bio** c'est-à-dire qu'elle garde sensiblement les mêmes constituants nutritifs ;

Réponse 2 : Non, elle a une faible teneur en eau ce qui facilite sa conservation sur une longue durée.

III.1.4 Analyse fonctionnelle du besoin

Elle nous permet de décrire les fonctions de service et les contraintes extérieures au fonctionnement du dispositif à l'aide du diagramme pieuvre (C'est le graphe des interacteurs car il permet de mettre en relation des éléments du milieu environnant qui se trouve en situation d'interagir avec le produit).

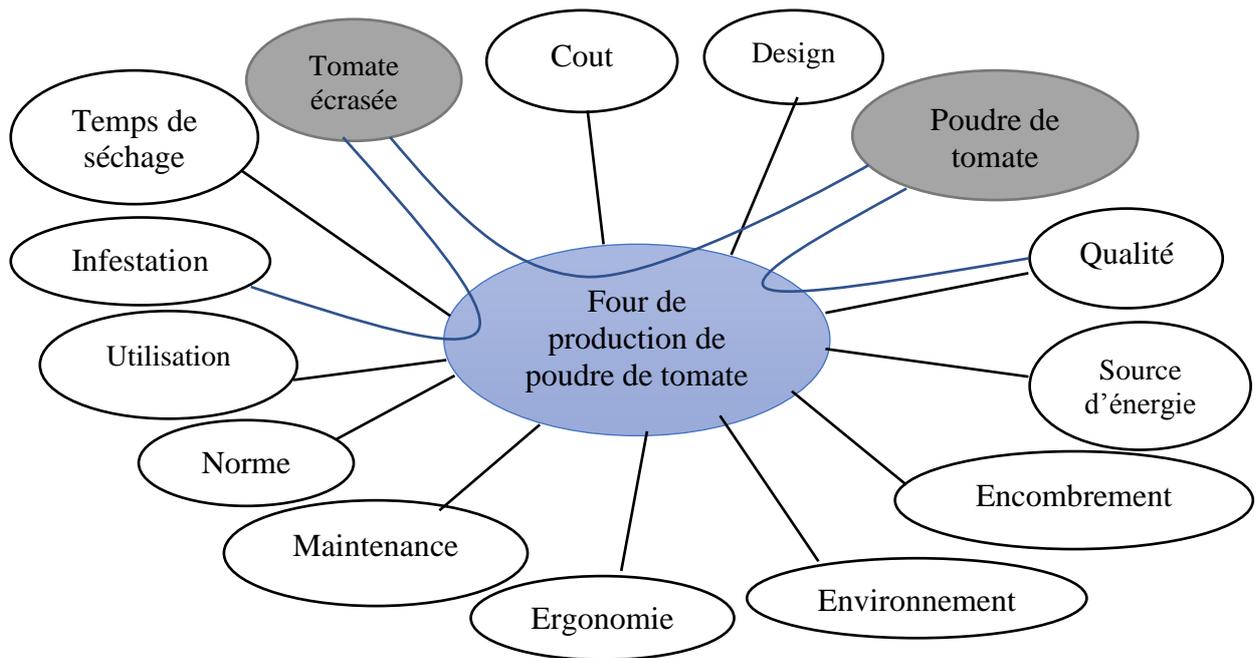


Figure 3.2 : Diagramme pieuvre

Ainsi donc nous pouvons recenser comme fonction de service :

III.1.5 Les fonctions services

Une fonction de service est action attendue d'un produit (ou réalisée par lui) pour répondre au besoin d'un utilisateur donné. Il en existe deux types à savoir :

III.1.5.1 Les fonctions principales

Elles mettent en évidence les relations créées par le produit entre les éléments de son milieu extérieur. Pour notre dispositif nous avons comme fonctions principales :

- FP1** : Permettre à l'utilisation de produire la poudre de la tomate ;
- FP2** : Protéger la tomate contre les infestations et les intempéries ;
- FP3** : Produire une poudre de tomate de bonne qualité respectant la norme.

III.1.5.2 Les fonctions contraintes

Elles représentent l'action ou la réaction du produit par rapport au milieu extérieur. Pour notre dispositif nous avons les fonctions de contraintes suivantes :

- FC1** : Afficher en temps réel les paramètres de fonctionnement de notre four ;

- FC2** : Être de faible cout ;
- FC3** : Respecter les normes de qualité et de sécurité ;
- FC4** : Être facilement maintenable ;
- FC5** : Être ergonomique ;
- FC6** : Ne dégrade pas le milieu environnant ;
- FC7** : Être de dimension optimale ;
- FC8** : Utiliser la source d'énergie disponible ;
- FC9** : Avoir un temps de séchage optimal ;
- FC10** : Être esthétique.

III.1.6 Caractérisation des besoins

Le but principal est qu'elle exprime les performances attendues par l'utilisateur de chacune des fonctions de service. Il faut donc pour chaque fonction de service définir des critères d'appréciation. C'est à base de ces critères que l'on apprécie la manière dont une fonction doit être respectée. Les critères sont formulés de façon à faire apparaître le niveau d'exigence souhaité par l'utilisateur et chaque niveau doit être affecté d'une indication de flexibilité. Ainsi on les classe de manière suivante [19] :

- **F0** : Niveau impératif (flexibilité nulle) ;
- **F1** : Niveau très peu négociable ;
- **F2** : Niveau négociable ;
- **F3** : Niveau très négociable.

Tableau 3.1 : Caractérisation des fonctions de service

REP	FOCTION	CRITERE	NIVEAU	FLEXIBILITE	F
FP1	Permettre à l'utilisateur de produire la poudre de tomate	Température de séchage	80-150	+ ou - 10%	FO
		Taux d'humidité	8%	+ ou - 2%	
FP2	Protéger la tomate contre les infestations et intempéries	Reduction des pertes de la tomate	< Ou égal à 1%	+ou - 0,5%	F1
FP3	Produire la poudre de tomate de bonne	Couleur et odeur	Rouge et sans odeur	/	F0
		Texture	Sans motif	/	

	qualité respectant la norme				
FC1	Afficher les paramètres en temps réel de fonctionnement du four	Taux d'humidité de la tomate : Température dans le four : Paramétrage/réglage : Simplicité d'utilisation : Manuel d'utilisation	Relatif Absolu Absolu Absolu	/ / / /	F0
FC2	Être de faible cout	Prix de mise en œuvre	< 700000	/	F2
FC3	Respecter les normes de qualités et de sécurités	Norme électrique et mécanique		/	F2
FC4	Facilement maintenable	Système démontable (boulonnage ; vis)	75%	/	F2
FC5	Être ergonomique	Adaptabilité des conditions d'utilisations		/	F1
FC6	Ne pas dégrader le milieu environnant	Intensité sonore Pollution	<60db <3%	/	F1
FC7	Être de dimension optimale	Encombrement	$Pi \cdot R^2 \cdot H$	/	F3
FC8	S'adapter à la source d'énergie disponible	Tension électrique Intensité du courant	200-230 V 10-20 A	/	F1
FC9	Avoir un temps de séchage bien précis	Capacite de séchage	100 Kg	+ou -5%	F1
FC10	Être esthétique	Facilite de montage et démontage	/	/	F1

III.1.7 Hiérarchisation des fonctions

Le principe est de comparer les fonctions une à une à l'aide d'une matrice et d'attribuer une note de 0 à 3. La méthode utilisée ici dite du **tri croisé** qui permet de classer les fonctions par ordre d'importance décroissant et quantifie suivant :

Légende :

0 : niveau égale

1 : niveau légèrement supérieur

2 : niveau moyennement supérieur

3 : niveau nettement supérieur

Tableau 3.2 : tableau du tri-croisé (hiérarchisation des fonctions)

FP1	FP2	FP3	FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	FC6	FC7	FC8	FC9	FC10	POIDS	%
FP1	FP1/1	FP1/2	FP1/1	FC2/0	FP1/3	FP1/2	FP1/1	FP1/1	FP1/2	FP1/3	FP1/3	FP1/1	20	17,24
	FP2	FP2/1	FP2/2	FC2/1	FP2/3	FC4/2	FP2/1	FC6/3	FP2/2	FP2/1	FP2/3	FP2/0	13	11,2
		FP3	FP3/3	FC2/0	FP3/3	FC4/3	FP3/1	FP3/1	FC7/1	FP3/1	FP3/1	FC10/1	10	8,62
			FC1	FC2/1	FC1/0	FC4/1	FC1/0	FC1/1	FC1/1	FC2/1	FC9/2	FC10/2	4	3,44
				FC2	FC3/2	FC4/1	FC2/1	FC2/2	FC2/1	FC2/1	FC9/1	FC2/1	7	6,03
					FC3	FC3/1	FC5/0	FC3/1	FC3/0	FC3/2	FC9/1	FC10/1	6	5,17
						FC4	FC4/1	FC6/0	FC4/2	FC4/1	FC9/1	FC10/2	11	9,48
							FC5	FC6/2	FC7/1	FC8/0	FC9/3	FC10/3	0	0
								FC6	FC6/2	FC6/2	FC6/3	FC6/3	15	12,93
									FC7	FC8/1	FC9/2	FC7/1	3	2,58
										FC8	FC8/3	FC8/2	6	5,17
											FC9	FC9/1	12	10,34
												FC10	9	7,75
												TOTAL	116	100

À l'aide des données obtenues sur la matrice des tri-croisés on trace l'histogramme de fonction (afin de mieux visualiser les résultats).

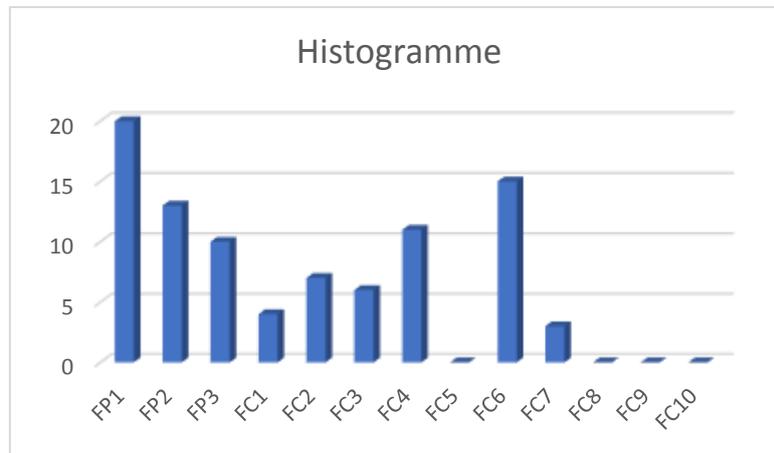


Figure 3.3 : Histogramme de la hiérarchisation des fonctions

➤ **Interprétation des résultats**

La fonction FP1 justifie l'existence du projet, elle répond au besoin des clients potentiels (entreprises) et à l'objectif visé par la conception de ce four suivie de la fonction FC6 qui elle incarne en son sein le volet environnemental de notre four. Les fonctions FP2 et FC9 occupant la troisième position montre bien que faire de la qualité avec un temps de séchage réduit reste un souci majeur direct dont le dispositif en dépend.

➤ **Diagramme de PARETO**

Tableau 3.3 : Effectifs cumulés croissants des différentes fonctions

F	FP1	FC6	FP2	FC9	FC4	FP3	FC10	FC2	FC3	FC8	FC1	FC7	FC5
%	17,2	12,9	11,2	10,34	9,48	8,62	7,75	6,03	5,17	5,17	3,44	2,58	0
%c	17,2	30,2	41,37	51,71	61,19	69,81	77,56	83,59	88,8	93,93	97,37	100	100

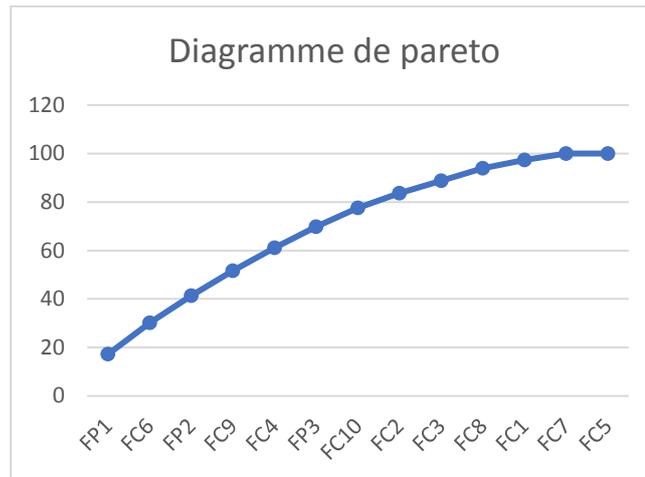


Figure 3.4 : Diagramme de Pareto

➤ Interprétation du diagramme de Pareto

Zone A : croissance rapide ; 41,30 % des fonctions de services à savoir FP1, FC6, et FP2 représentent 88,77% du coût de mise en œuvre. Il sera donc judicieux de recenser le maximum de solution technologique pour ses fonctions.

Zone B : changement de concavité ; 52,56% des fonctions de service à savoir FC9, FC4, FP3, FC2, FC3, FC8 et FC10 représentent 53,63% du coût du prix de mise en œuvre ; il sera aussi important de les prendre en compte pour des solutions technologiques.

Zone C : constante ; 6,02% des fonctions de service à savoir FC1 et FC5 représentent 6,07% du coût de mise en œuvre. Il apparaît moins important d'insister sur ces fonctions lors du choix technologique

III.1.8 Diagramme FAST

La méthode F.A.S.T. est un outil graphique qui permet de détailler les fonctions de services et les solutions associées. Organisé de la gauche vers la droite, partant d'une fonction de service, le diagramme F.A.S.T. recense toutes les fonctions techniques et pour finir il présente les solutions technologiques associées. Sa lecture est fondée sur une technique interrogative comme élargi par la figure ci-dessous.

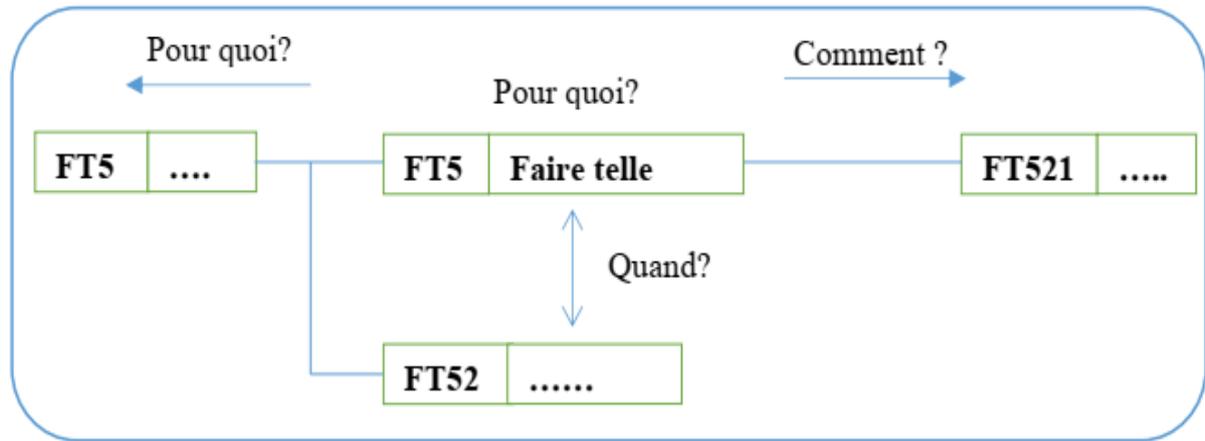


Figure 3.5 : Lecture du diagramme FAST

- Pourquoi FT521 existe-t-elle ? → Pour réaliser FT52 (et seulement FT52) ;
- Comment FT521 est-elle réalisée ? → Grâce à FT5211 (il peut y en avoir d'autres) ;
- « Quand » FT521 intervient-elle ? → « En même temps que » FT522.

Ainsi pour notre dispositif de séchage, nous avons la figure ci-dessous représentant l'ordonnancement globale des fonctions techniques les plus importantes.

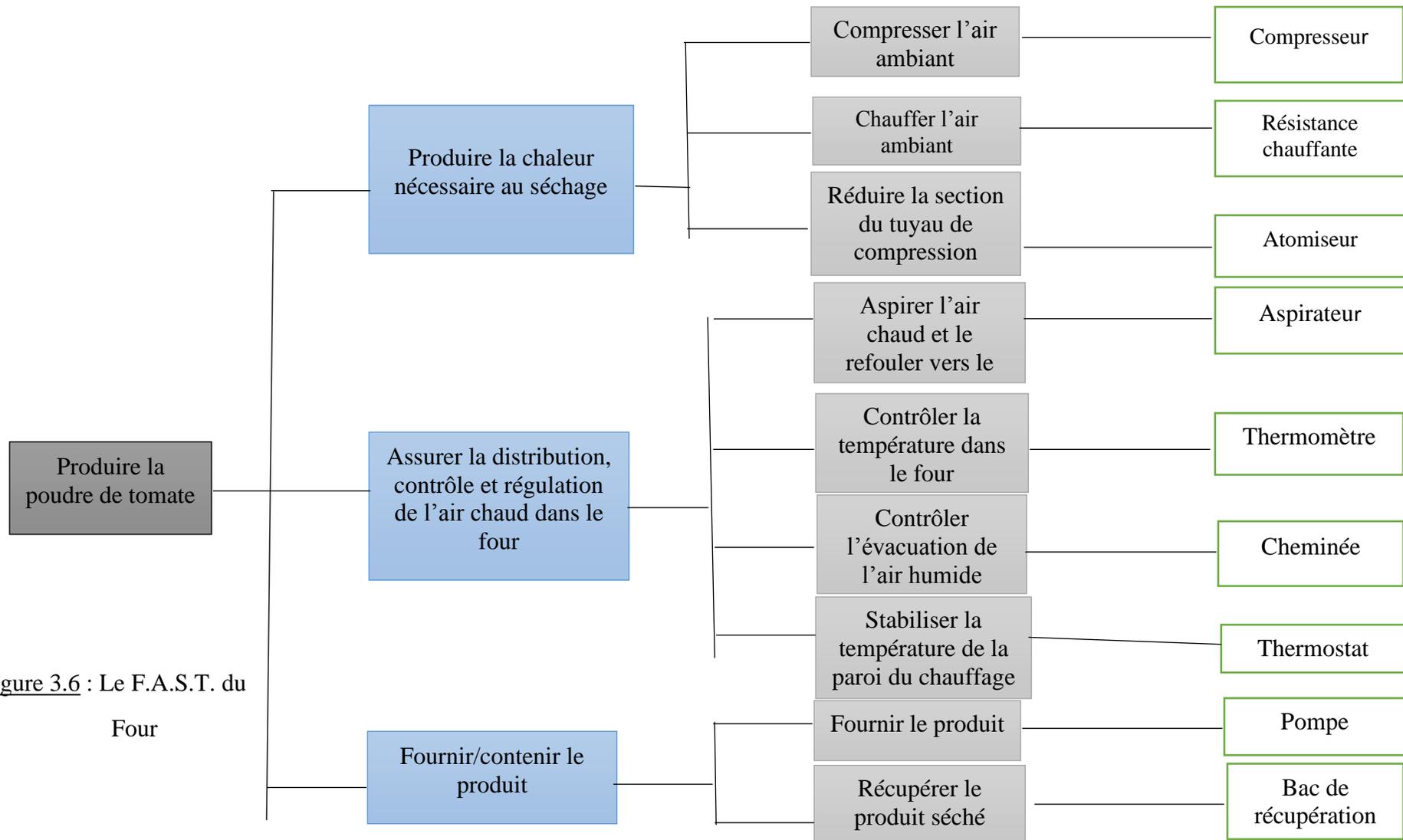


Figure 3.6 : Le F.A.S.T. du Four

III.1.9 Diagramme SADT

Le diagramme SADT permet de décrire des systèmes où coexistent des flux de matières d'œuvre (produits, énergies et informations). Elle s'appuie sur la mise en relation de ces différents flux avec les fonctions que remplit le système. Le modèle de représentation prend la forme d'actigrammes, rectangles basés sur les activités ou les fonctions du système. Cette méthode graphique permet d'aller du général au particulier.[18]

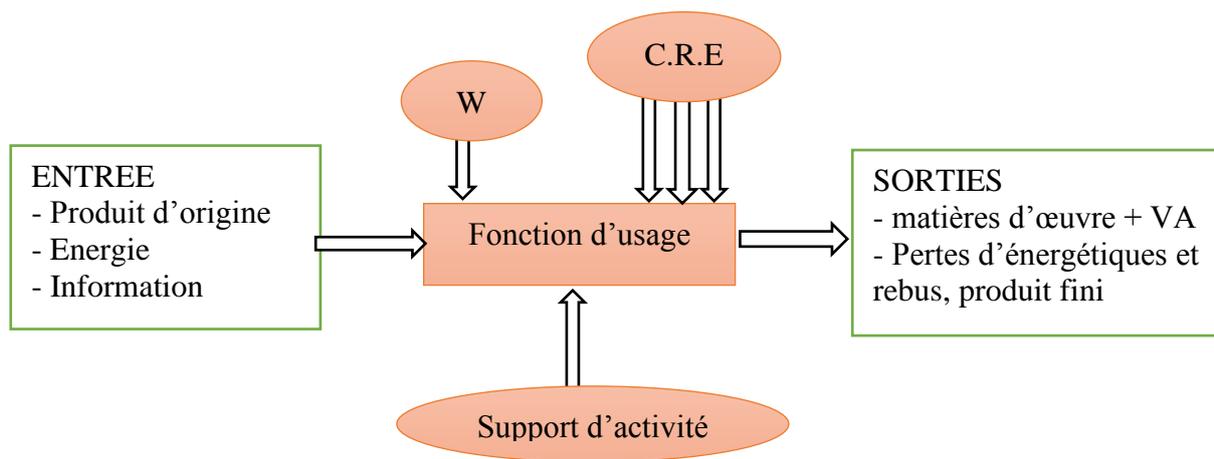


Figure 3.7 : Actigramme S.A.D.T.

Données de contrôles :

Les données de contrôle sont nécessaires car c'est elle qui permette d'agir sur la matière d'œuvre. Elles influent sur le comportement du système, celui-ci n'a pas été créé pour les transformer.

Nous recensons comme données de contrôle :

- **Energie (W) :** Présence d'énergie pour effectuer l'action ;
- **Configuration (C) :** Modes de marches (manuel, automatique, pas à pas, ...)
- **Réglage (R) :** Paramètres de vitesse, seuils de déclenchement,
- **Exploitation (E) :** Départ de cycle, arrêt.

Matières d'œuvre :

La matière d'œuvre, c'est ce sur quoi agit le produit ; d'une manière générale, on rencontre trois types de matière d'œuvre : la matière, l'énergie, l'information.

Fonction d'usage :

C'est la fonction réalisée par le produit pour répondre au besoin d'un utilisateur donné.

Produit :

Le produit, c'est ce qui est (ou sera) fourni à un utilisateur pour répondre à son besoin, selon les spécifications du cahier des charges. Sur cette base notre **actigrammes global** se présente comme suit :

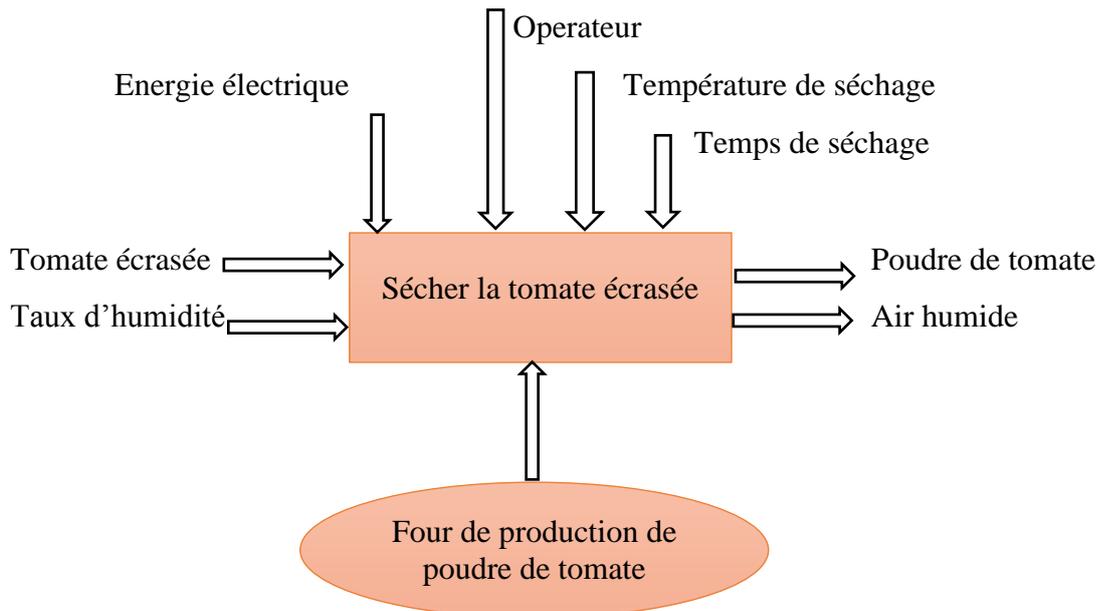


Figure 3.8 : Actigramme du Four niveau Ao

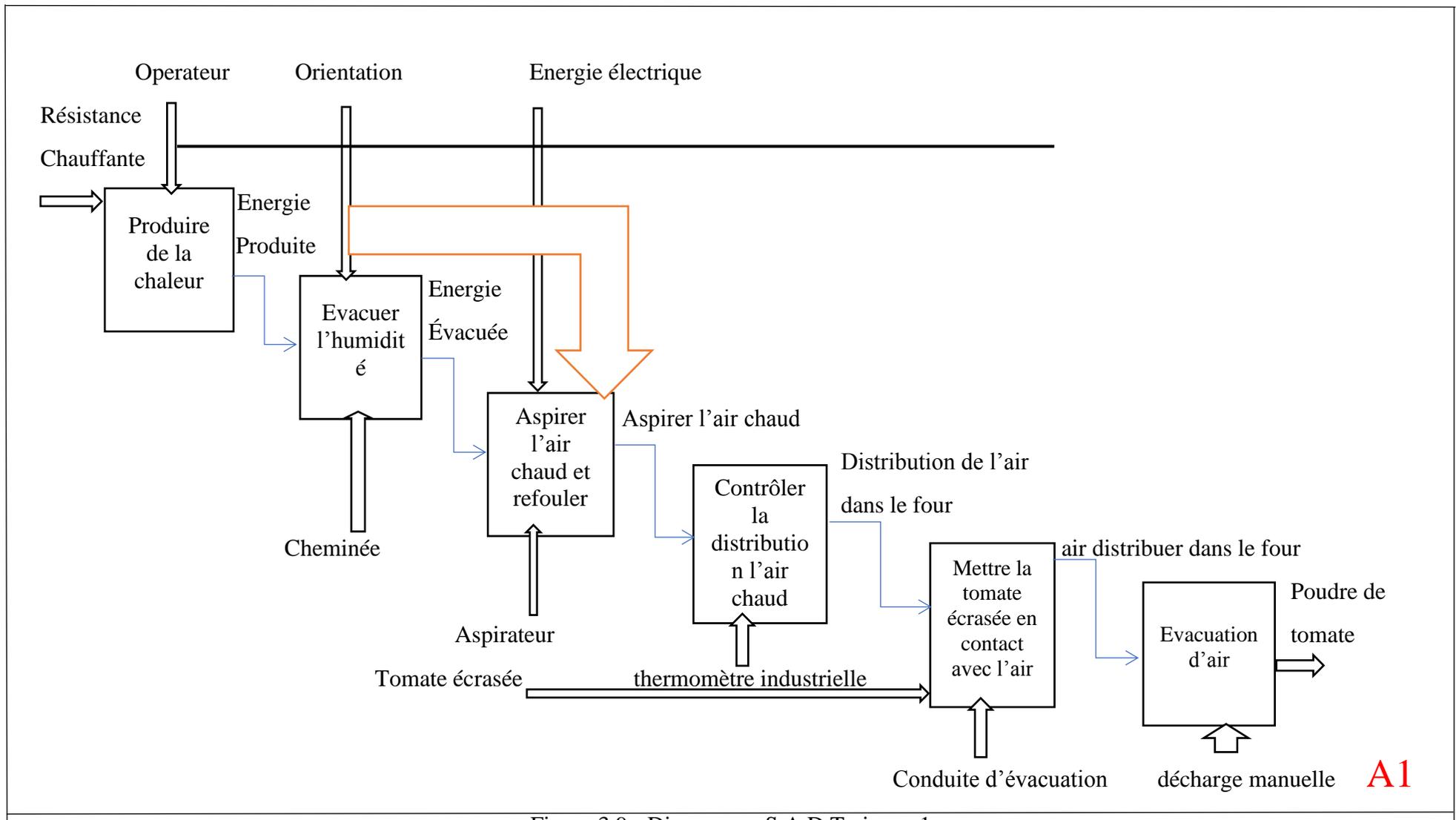


Figure 3.9 : Diagramme S.A.D.T niveau 1

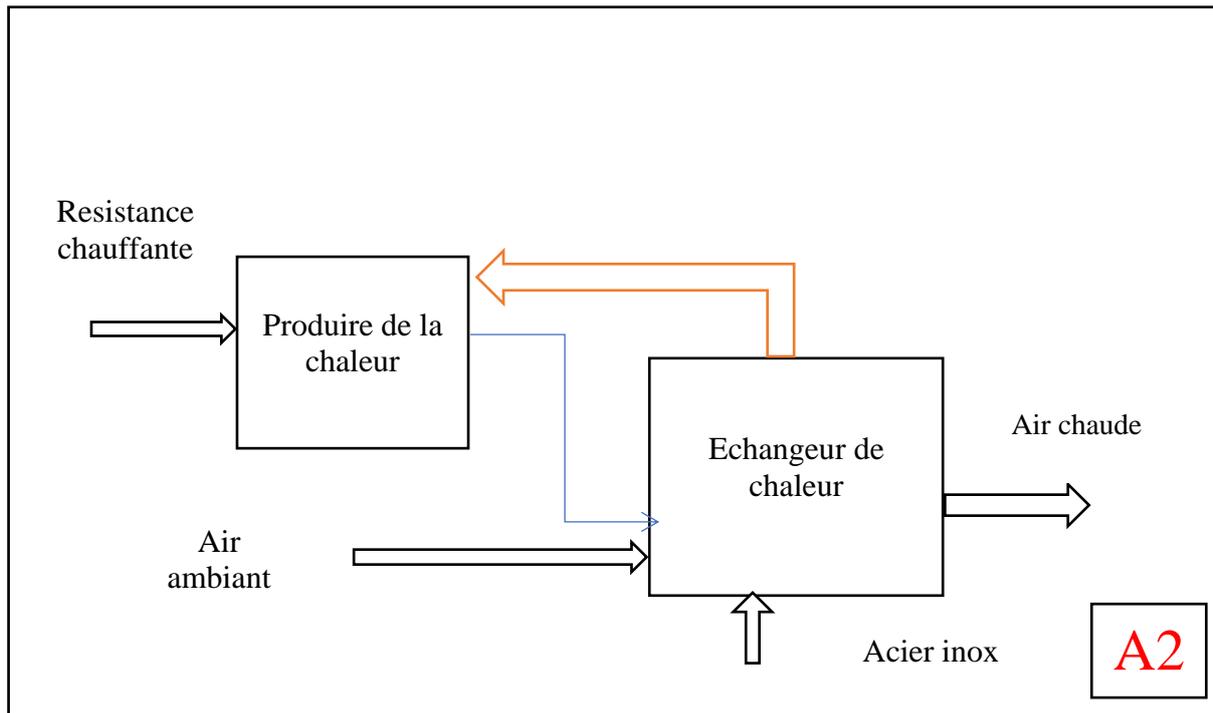


Figure 3.10 : Diagramme S.A.D.T niveau 2

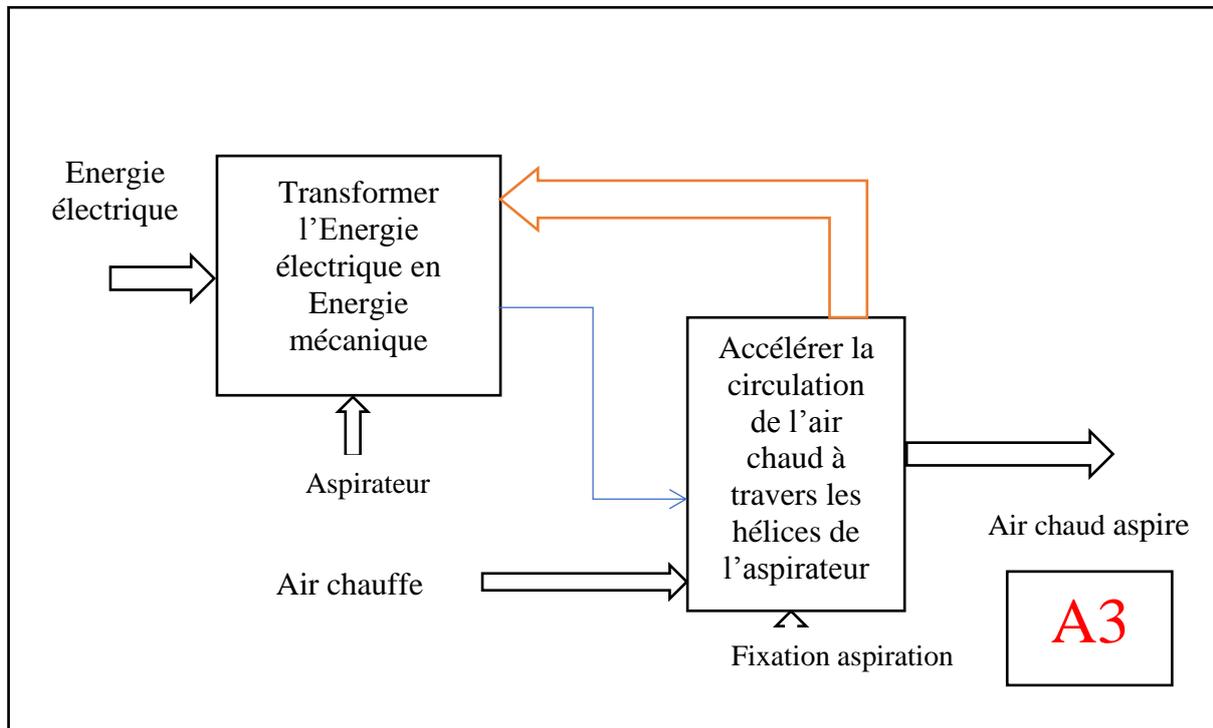


Figure 3.11 : Diagramme S.A.D.T niveau 3

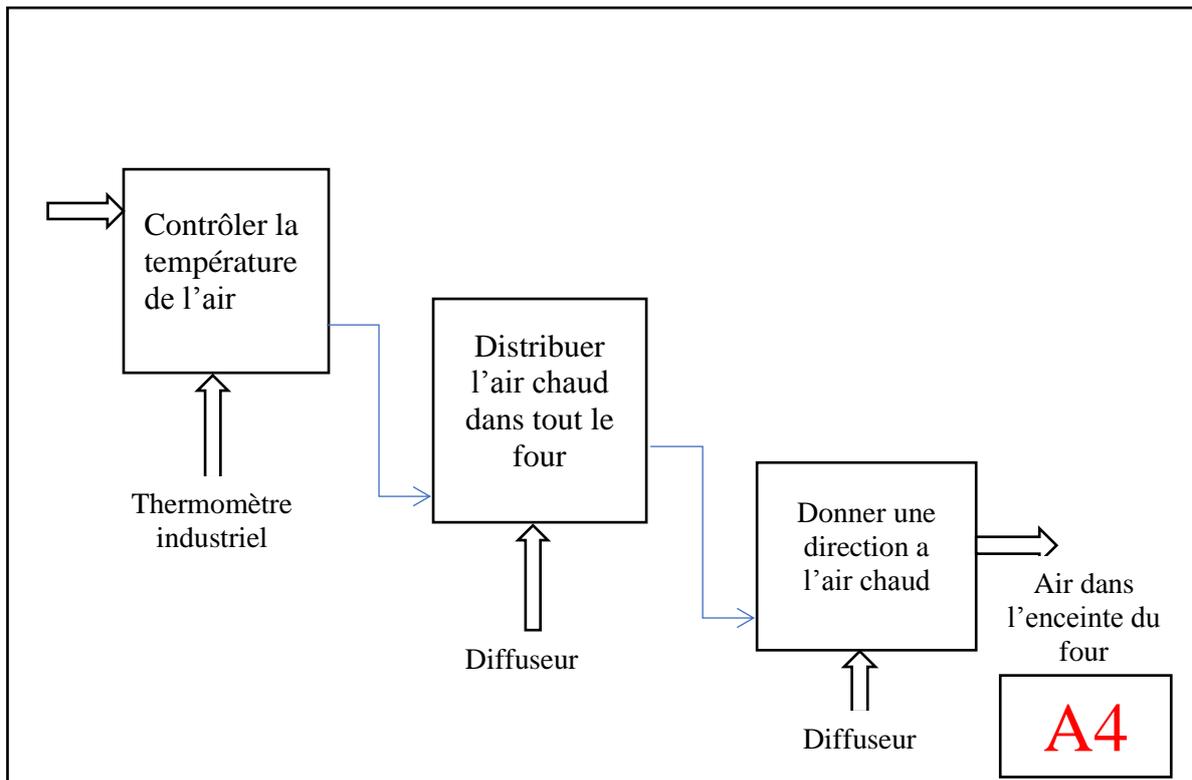


Figure 3.12 : diagramme S.A.D.T niveau 4

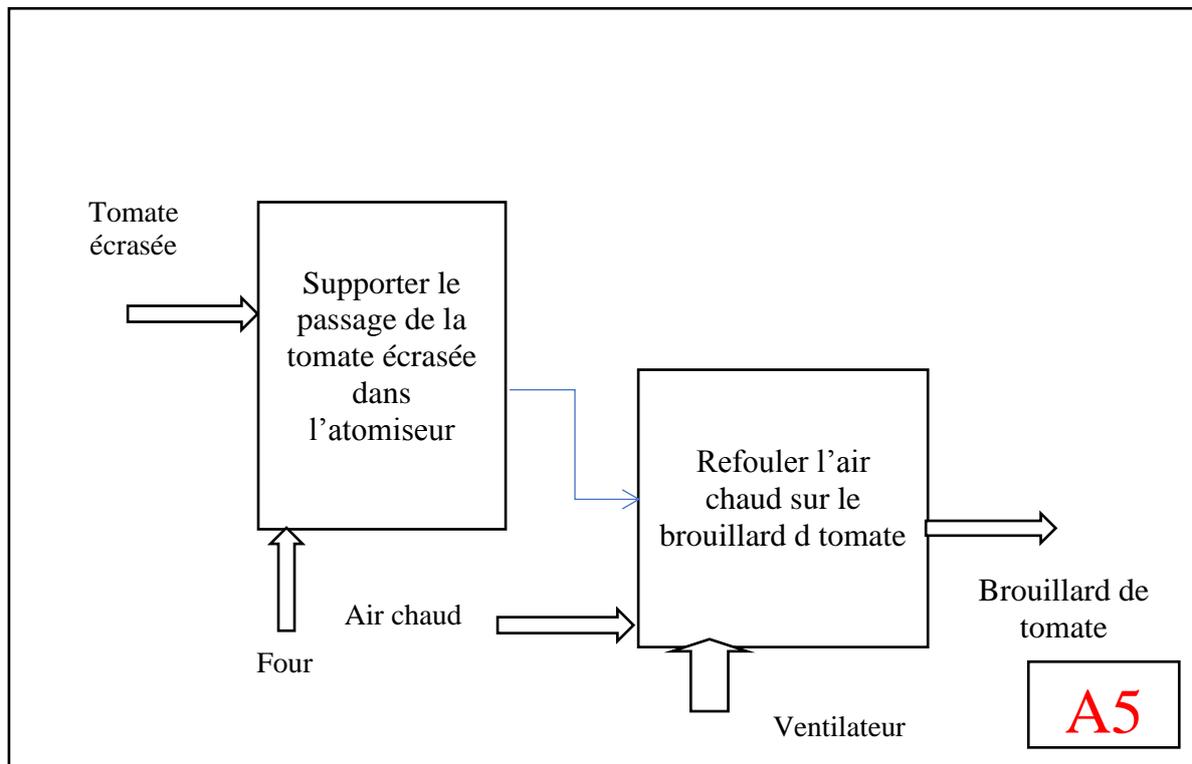


Figure 3.12 : Diagramme S.A.D.T niveau 5

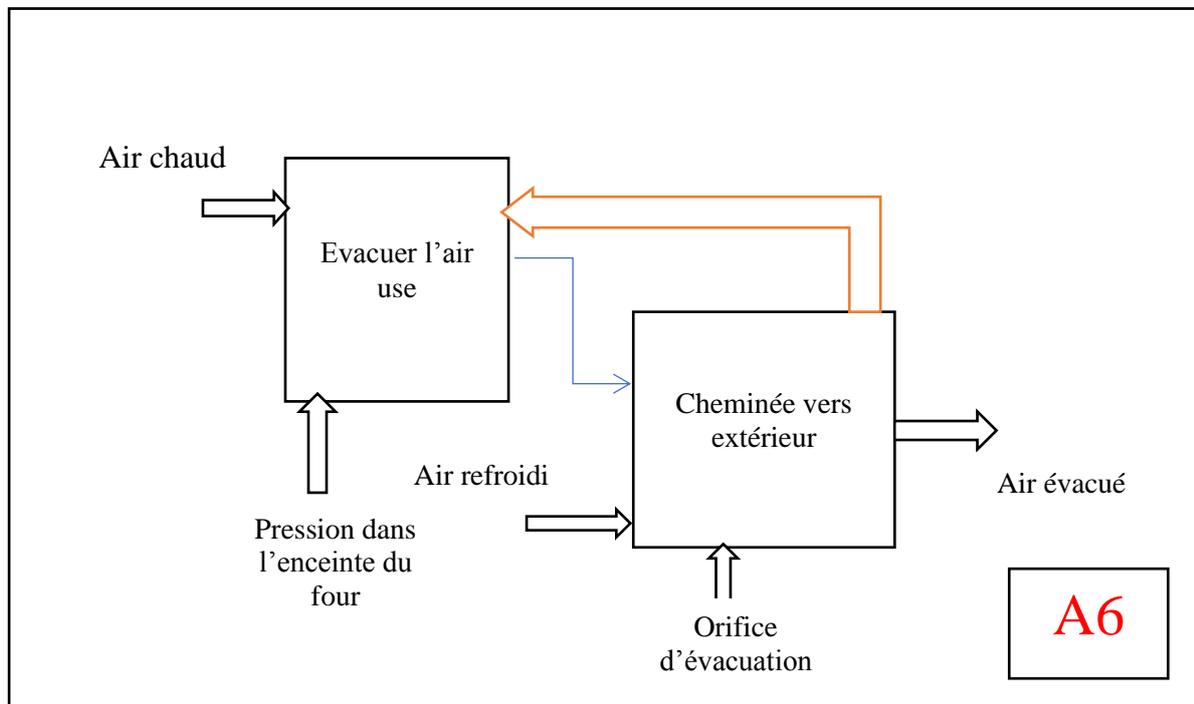
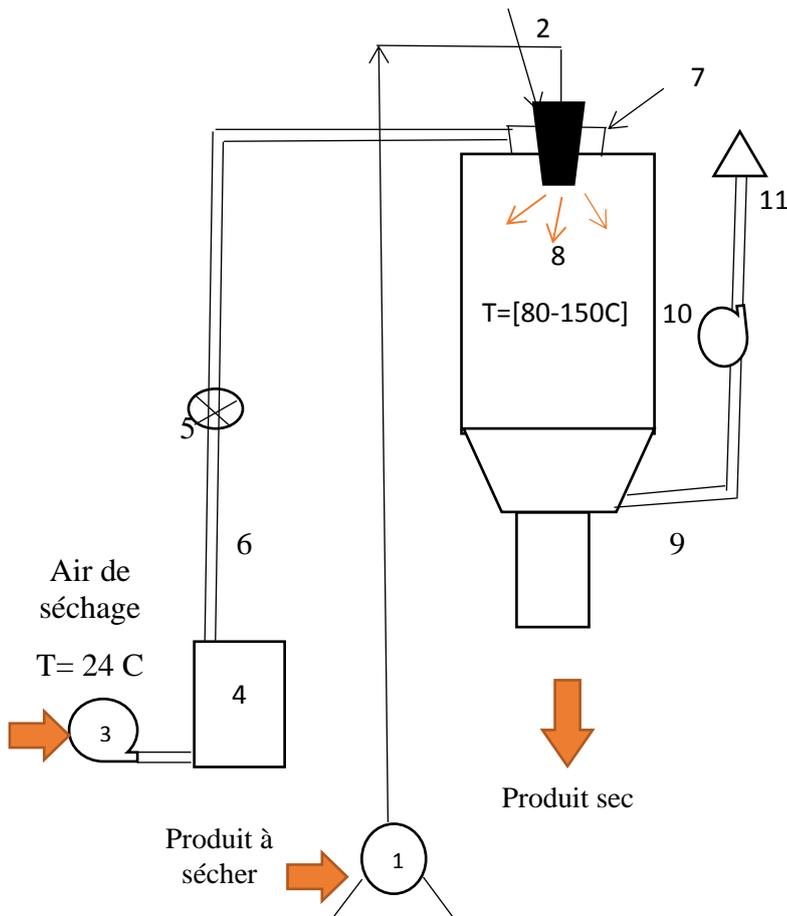


Figure 3.13 : Diagramme S.A.D.T niveau 6

III.1.10. Schéma technologique du four de production de poudre de tomate



- 1 : Pompe d'alimentation de la solution
- 2 : Atomiseur (turbine ou pulvérisateur)
- 3 : Ventilateur d'entrée d'air
- 4 : Réchauffeur d'air
- 5 : Vanne a ailette
- 6 : Conduite d'air chaud
- 7 : Diffuseur d'air
- 8 : Chambre de séchage
- 9 : Prise d'extraction air humide
- 10 : Ventilateur d'extraction d'air
- 11 : Cheminée évacuation

Figure 3.14 : Schéma du principe du Four propose

III.1.11 Principe de fonctionnement

Après allumage du réchauffeur d'air ayant pour rôle chauffer le tuyau de canalisation dans lequel l'air aspirer va passer afin d'éliminer l'humidité contenu dans l'air et ensuite on démarre la pompe qui a pour rôle d'acheminer la tomate vers le pulvérisateur, l'air est compressé et envoyé dans le tuyau, l'air chaud est projeté sur la tomate grâce au diffuseur d'air ensuite atomisée à l'aide d'un pulvérisateur dans la chambre de séchage permettant de séparer les particules solides (poudre) des particules liquides (généralement l'eau) ensuite envoyé dans le cyclone par la prise d'extraction et sera dépourvue de tout l'humidité grâce au ventilateur cet humidité sera ensuite évacuée grâce à la cheminée ainsi à la sortie du cyclone nous aurons notre poudre de tomate. Le bon contrôle de la circulation de l'air dans le four garantit un rendement élevé, de plus l'opérateur est à l'abri des risques de brûlure.

Le procédé de séchage par atomisation comprend donc trois étapes :

- Atomisation de la phase liquide : par passage à travers une turbine centrifuge tournant à très grande vitesse ou une buse.

- Évaporation du brouillard et apparition de la phase solide : dans le cas d'une solution, le liquide s'évapore et le solide cristallise.
- Séparation poudre sèche et air humide : la poudre formée est entraînée par l'air humide, puis séparée de celui-ci au moyen d'un cyclone.

La forme et la taille des particules solides obtenues dépendent du produit atomisé et des conditions de séchage (pression, température, humidité résiduelle). Le faible temps de séjour du produit dans la chambre d'atomisation permet de sécher des produits thermosensibles.

III.2 Dimensionnement de notre four

Pour mieux procéder au dimensionnement de notre four et au paramètre de fonctionnement, les données suivantes nous permettront de définir :

- La détermination des caractéristiques de l'air asséchant ;
- Une étude thermique de la chambre de séchage ;
- Une étude de la résistance chauffante ;
- Une étude technique du four.

III.2.1 Caractéristique de l'air asséchant

Hypothèse

- Teneur initiale en eau de la tomate : $X_i = 80\%$;
- Teneur final en eau de la tomate : $X_f = 8\%$;
- Masse initiale de la tomate : $M_p = 2000 \text{ Kg}$;
- Masse volumique de la tomate écrasée : $\rho_p = 1,035 \text{ Kg/l}$;
- Débit de séchage $G_s = 20 \text{ Kg/ cycle}$;
- Pression de l'air ambiant $P = 1018000 \text{ Pa}$;
- Région du sud avec une humidité relative de $T_{séch} = 99\%$;
- Température de l'air ambiante $T_1 = 24^\circ\text{C}$ cette température est celle la plus défavorable prise dans le tableau des températures mensuel dans la région du sud car c'est la région cible ;
- Température de séchage $T_2 = 100^\circ\text{C}$;[3]
- Temps de séchage dure **4 heures** s suivant le taux humidité ;[3]

- Efficacité thermique $\eta = 0,8$.

III.2.1.1 Température de l'air asséchant

$$\eta = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_1} \quad (3.1)$$

$$T_3 = T_2 - \eta (T_2 - T_1)$$

$$T_3 = 39,2^\circ\text{C}$$

III.2.1.2 Masse sèche du produit et masse d'eau du produit à enlever

La masse sèche du produit se calcul de la façon suivante :

$$M_{ps} = \frac{100 - X_f}{100 - X_i} M_p \quad (3.2)$$

$$M_{ps} = 992,79 \text{ Kg}$$

Pour obtenir la masse d'eau contenue dans 2000 Kg de tomates on effectue la soustraction suivante :

$$M_e = M_p - M_{ps} \quad (3.3)$$

$$M_e = 1007,79 \text{ Kg}$$

III.2.1.3 Taux d'humidité

$$W = \frac{M_e}{M_{ps}} \quad (3.4)$$

$$W = 1015,10 \text{ Kg eau/Kg prod}$$

II.2.1.4 Données obtenues à l'aide du diagramme psychométrique

- Humidité absolue d'air ambiante à 24° est : $X_a = 0,017 \text{ Kg/kg d'air sec}$;
- Humidité absolue d'air à la sortie du séchoir à $39,2^\circ$ est : $X_s = 0,028 \text{ kg/kg d'air sec}$;
- Masse volumique de l'air asséchant v_m =
 $1/\rho_{air} = 0,87 \text{ m}^3/\text{kg air sec}$;
- Enthalpies $H_1(24^\circ\text{C}) = 68 \text{ KJ/ Kg d'air sec}$;
- Enthalpies $H_2(39,2^\circ\text{C}) = 110,5 \text{ KJ/ Kg d'air sec}$.

Voir diagramme air humide (**annexe 4**).

III.2.1.5 Quantité et volume d'air nécessaire pour sécher 2000kg de tomate humide

Cette dernière se trouve en faisant la division la quantité d'eau à enlever de la quantité initiale de tomates par la différence d'humidité absolue lue sur le diagramme de l'air humide ci-dessus lorsque les températures sont respectivement à 39,2 et 24°C.

$$M_{air} = \frac{M_e}{X_s - X_a} \quad (3.5)$$

$$M_{air} = 91617,27 \text{ Kg}$$

D'où

$$V_{air} = M_{air} \times v_m$$

$$V_{air} = 79707,02 \text{ m}^3$$

III.2.1.6 Quantité de chaleur utile pour le séchage

Elle se trouve tout simplement en multipliant la masse d'air nécessaire pour le retrait de l'eau dans la tomate par la différence d'enthalpie lue sur le diagramme de l'air humide.

$$Q = M_{air} (H_2 - H_1) \quad (3.6)$$

$H_2 = 110,5$ et $H_1 = 68$ Où H_2 et H_1 sont respectivement l'enthalpie de l'air à 80 et 31 °C.

$$Q = 3893733,97 \text{ KJ}$$

III.2.1.7 Calcul du débit d'air à fournir

Le rapport entre le volume d'air à fournir et le temps de séchage qui est dans ce cas précis fixé à 15 heures de temps.

$$q_{air} = \frac{v_{air}}{t} \quad (3.7)$$

$$q_{air} = 23569,06$$

III.2.1.7 choix du ventilateur

L'air de séchage est chauffé puis canalisé jusqu'au corps à sécher grâce au ventilateur. La relation (3.7), nous détermine le débit d'air chaud (q_{air}) à introduire dans la chambre de séchage. L'entraînement se fait par un moteur électrique qui entraîne les ailettes fixées sur l'arbre dont le mouvement rapide de rotation motive une prise de vitesse de l'air (saisi par les ailettes) laquelle vitesse transformée en pression (charge utile) provoque une poussée de l'air qui traverse le cylindre en rotation. Cette pression permet de donner à l'air la vitesse qu'il doit avoir au niveau des trous d'évacuation.

Le ventilateur choisi est de marque **SODECA CA-160-2T-2**, ayant les caractéristiques suivantes [14] :

- Puissance en (KW) : **1,5 KW**
- Débit d'air en (m^3/h) : **4200 - 8000**
- Alimentation (volts/Hz/A) : **220/50/7**
- Vitesse en (tr/min) : **750 – 1500.**

Nous pouvons aussi utiliser le charbon ayant pour pouvoir calorifique inférieur de **8,9 KWh** pour **1 Kg** pour préchauffer notre chambre de séchage cela entraîne l'économies en énergie et favorise la population rurale a ce lancer dans ce secteur.

III.2.1.8 Etude thermique chambre séchage

Hypothèses de calcul.

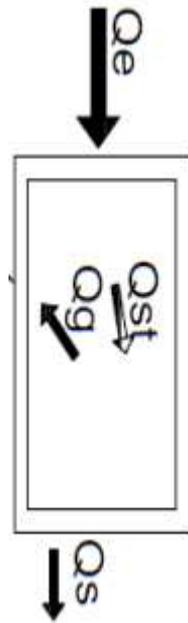
- Rayonnement négligé ;
- Température à l'intérieur du séchoir $T_{int} = 100^{\circ}\text{C}$;
- Température de l'air ambiant $T_{ext} = 24^{\circ}\text{C}$;
- Régime permanent ;
- Coefficient global d'échange constant
- La température d'un fluide est constante dans une section transversale ;
- Les débits massiques des deux fluides sont constants ;
- La chaleur spécifique du fluide constante ;
- Les caractéristiques physiques des matériaux sont constantes tout au long du séchoir.

➤ **Choix de l'isolant**

En nous servant des exigences de notre séchoir, nous opterons **pour la laine de verre** comme isolant thermique car elle a très faible conductivité thermique de $0,032 - 0,042 \text{ W/m}^0\text{C}$, son prix peu onéreux, sa disponibilité sur le marché et sa bonne flexibilité.

➤ **Bilan énergétique du four**

Pour un bon chauffage et refroidissement de notre four nous fixons le rendement a **0,8**.



Q_e : Energie entrant dans le four ;

Q_{st} : Energie utile pour le séchage ;

Q_g : Energie générée par le four nul ;

Q_s : Energie sortant du four ;

Q_{con} : Energie perdue par conduction sur les parois du four ;

Q_{conv} : Energie perdu par convection ;

Q_{airH} : Energie perdu par la sortie d'air humidifiée.

- Chaleur utile Q_{st}

La chaleur utile est celle déterminée plus haut $Q_{st} = 3893733,97 \text{ KJ}$;

- Chaleur reçu Q

Avec $\eta = 0,8$ on a : $\eta = \frac{Q_{st}}{Q_e}$ (3.8)

$$Q_e = \frac{Q_{st}}{\eta}$$

$$Q_e = 4867167,4 \text{ KJ}$$

D'où la chaleur perdue est : $Q_s = Q_e - Q_{st}$

$$Q_s = 973433,5 \text{ KJ}$$

Ensuite déterminons la chaleur perdue par la sortie de l'air humidifié Q_{airH}

:

$$Q_{airH} = C_p(T_3 - T_{ext}) q_{air} \quad (3.9)$$

Chaleur massique de l'air sec : $C_p = 1005 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{k}$

$$Q_{airH} = 360040,50 \text{ KJ}$$

III.3 CALCUL DE LA DYNAMIQUE DES FLUIDES

➤ Buse d'atomisation (hydraulique et brumisation)

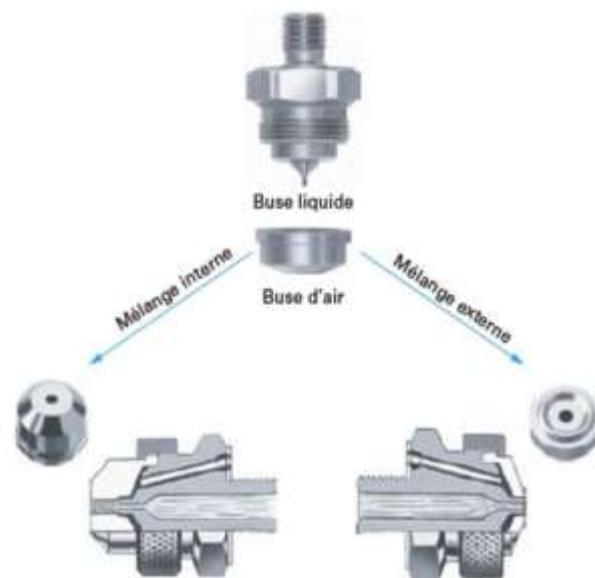


Figure 3.15: buse d'atomisation

Ces buses produisent une atomisation fine à faible débit sous forme de cône creux. Ainsi la formule suivante nous permettra de faire le choix de la buse :

$$Q_2 = \frac{P_1^n}{P_2^n} \quad (3.10)$$

$$Q_2 = \frac{3^{0,46}}{10^{0,46}}$$

$$Q_2 = 0,57$$

D'où ce résultat nous permet de déterminer le choix de la buse grâce au tableau suivant :

Tableau 3.4: coefficient de débit par type de buse

Type de buse	Coefficient « n »
Buses à cône creux	
Buses à cône plein	
Buses à jet plat	0,50
Buses à jet rectiligne	
Buses en spirales	
Buses à cône plein, standard, carre, ovale et gros débit	0,46

Buses à cône plein jet large et jet carre

0,44

Pour les liquides lourds, la densité relative est de 1,4 ce qui entraîne que :

- Débit d'eau à 10 bars = 13,2 l/min

- Liquide lourd : $Q_2 = Q_2(\text{eau}) \times 1/\sqrt{1,4}$ (3.11)

$$Q_2 = 13,2 \times 1/\sqrt{1,4}$$

$$Q_2 = 11,15 \text{ l/min}$$

➤ Angle de pulvérisation et recouvrement

Les angles de pulvérisation dans le tableau indiquent la couverture approximative du jet sur la base de la pulvérisation ou de la distribution d'eau. En pulvérisation réelle, l'angle de pulvérisation varie en fonction de la distance de pulvérisation. Les liquides plus visqueux que l'eau forment des angles de pulvérisation relativement petits (voire même un jet rectiligne) en fonction de leur viscosité, du débit de la buse et de la pression de pulvérisation. Des liquides dont la tension superficielle est inférieure à celle de l'eau produiront des angles de pulvérisation relativement plus larges que ceux mentionnés pour l'eau. Ce tableau donne le recouvrement théorique du cône de pulvérisation calculé sur la base de l'angle de pulvérisation donné et de la distance de l'orifice de la buse. Les valeurs sont basées sur l'hypothèse que l'angle de pulvérisation reste constant sur la distance de pulvérisation complète. Dans la pratique, l'angle de pulvérisation donnée dans le tableau n'est pas maintenu pour les longues distances de pulvérisation. Si le recouvrement est un paramètre critique, demandez les fiches d'informations sur des recouvrements de pulvérisation spécifiques. (Voir annexe 1)

➤ Calcul du tube pour transport de tomate

Hypothèse

-Diamètre d'entrée : $d_1 = 50 \text{ mm}$;

-Diamètre de sortie : $d_2 = 3 \text{ mm}$;

-Pression à la sortie : $P_A = 100 \text{ Pa}$;

-Vitesse à l'entrée : $V_A = 10 \text{ m. s}^{-1}$;

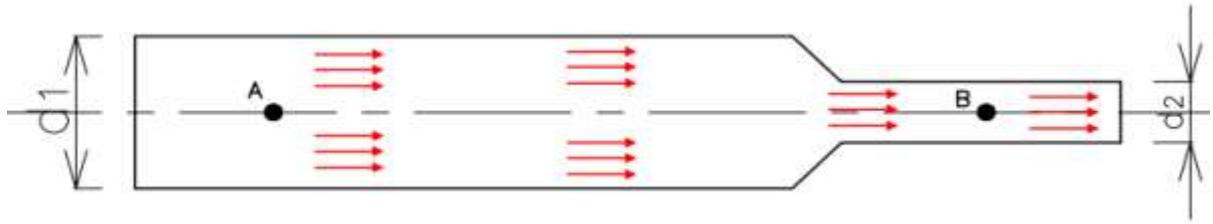


Figure 3.15 : Schéma du tube transportant la tomate

- Calcul du débit d'écoulement de la tomate à l'entrée

Posons : $Q_A = S_A \cdot V_A$ (3.12)

Or $S_A = \pi \cdot r^2$ d'où $S_A = \pi \times 0,025^2$

$$S_A = 7,85 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$$

$$Q_A = 7,85 \times 10^{-4} \times 10$$

$$Q_A = 7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}$$

- Calcul de la Vitesse de sortie de la tomate

On sait que : $Q_A = Q_B$ or $Q_B = S_B \cdot V_B$

$$V_B = \frac{Q_A}{S_B}$$

$$V_B = \frac{7,85 \times 10^{-3}}{\pi \times 0,003^2}$$

$$V_B = 278 \text{ m.s}$$

- Calcul de la pression de sortie de la tomate

Selon le théorème de BERNOULLI on a :

$$P_A - P_B + \frac{1}{2} \rho (V_B - V_A) + \rho g (Z_A - Z_B) + \Delta P_P = \frac{P}{m_a} \quad (3.13)$$

En considérant les pertes de pression négligeables ($P = 0$ et $\Delta P_P = 0$) et que $Z_A = Z_B$, la masse volumique de la tomate en patte pour 1 g en millilitre est $\rho = 0,9 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

L'équation devient : $P_A - P_B + \frac{1}{2} \rho (V_B - V_A) = 0$

$$P_B = P_A + \frac{1}{2} \rho (V_B - V_A)$$

$$P_B = 100 + \frac{0,9(278^2 - 10^2)}{2}$$

$$P_B = 38692 \text{ Pa}$$

III.4 Calcul lie aux résistances chauffantes

III.4.1 Choix du matériau

Les facteurs qui dépendent du choix de la résistance chauffante sont les suivantes :

- La température de fusion doit largement dépasser la température d'emploi (ici 156 °C) ;
- Résistance mécanique élevée ;
- Résistivité variant peu avec la température ;
- Résistivité stable dans le temps afin de limiter le vieillissement ;
- Bonne résistance physico-chimique (notamment à la corrosion).[11]

Les résistances les plus utilisées forment deux grands groupes : les alliages **nickel-chrome** et les **alliages fer-chrome-aluminium**.

Pour la suite, Nous choisissons l'**alliage Ni Cr 80/20**. Pour cet alliage on a les données suivantes [12] :

- Résistivité : $\rho = 40 \times 10^{-8} \Omega.m$;
- Température de fusion : **1390 °C** ;
- Température max d'utilisation : **1200 °C** ;
- Densité : **8,4 g/cm³** ;
- La puissance électrique : **PE = 20 kW** ;
- La tension électrique : **U = 220 V**.

Nous allons déterminer le **diamètre**, la **longueur** et le **taux de travail du fil**.

➤ Le diamètre

Afin de faciliter le montage des résistances, prenons : **D = 2 mm** car pour une bonne durée de vie des résistances, le diamètre du fil ne doit pas être trop petit (>1.8mm) connaissant que le critère principal de la résistance chauffante est sa température maximale.

➤ La longueur du fil

La loi de joule nous enseigne que :

$$R = \frac{U^2}{P} \quad (3.14)$$

$$R = \frac{220^2}{15}$$

$$R = 3,22\Omega$$

La même résistance est liée à la résistivité

$$R = \rho \frac{L_r}{S} \quad (3.15)$$

$$L_r = \frac{RS}{\rho} \quad \text{or} \quad S = \pi D^2/4$$

$$L_r = \frac{3,22 \times 3,14 \times 10^{-6}}{40 \times 10^{-8}}$$

$$L_r = 25.3 \text{ m}$$

➤ Le taux de charge

Le taux de travail, c'est la puissance par unité de surface. Il est donné par la relation suivante :

$$\tau = \frac{P}{S} \quad (3.16)$$

$$\text{Or } S = \pi D^2 L_r \quad \text{d'ou } S = \pi \times 4 \times 25300 = 317768 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{15000}{317768}$$

$$\tau = 0,047 \text{ W/mm}^2$$

III.5 Calcul thermique

III.5.1 La paroi de canalisation de l'air chaud

Nous choisirons un **tube rond en acier doux** ayant les caractéristiques suivantes

- Vitesse de l'air ambiant : $v_{air} = 100 \text{ m/s}$;
- Masse volumique de l'air : $\rho_{air} = 0,986 \text{ Kg/m}^3$;
- Longueur de la paroi nécessaire pour le séchage l'air : $L = 1,5 \text{ m}$;
- Température initiale de l'air à l'intérieur : $T_i = 24^\circ\text{C}$;
- Température finale de l'air (après chauffage du tube) à l'intérieur : $T_f = 100^\circ\text{C}$
- Emissivité de l'acier : $\epsilon_p = 0,2$;
- Conductivité thermique : $\lambda_p = 45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$
- Constance de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$;
- Diamètre extérieur du tube : $D_{ext} = 50 \text{ mm}$;
- Epaisseur du tube : $e = 2 \text{ mm}$;
- Diamètre intérieur du tube : $D_{int} = 46 \text{ mm}$;
- Capacité thermique de l'air : $C_{air} = 1004 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1}$.

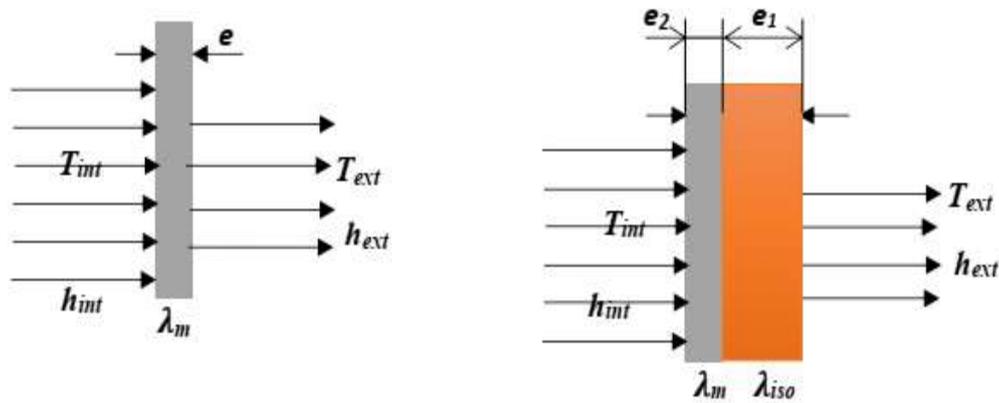


Figure 3.15: Modélisation du transfert de chaleur dans le tube

La densité du flux de chaleur traversant les tôles d'acier est :

$$\varphi = \frac{T_{in} - T_{ext}}{\frac{1}{h_{ext} S} + \frac{1}{h_{int} S}} \quad (3.17)$$

En superposant l'isolant thermique, nous avons une densité :

$$\varphi = \frac{T_{in} - T_{ext}}{\frac{1}{h_{mS}} + \frac{e_1}{\lambda_{iso} S} + \frac{e_2}{\lambda_{mS}} + \frac{1}{h_{iso} S}}$$

h_{ext} : Coefficient d'échange convectif entre l'air ambiant et la paroi extérieure du four ;

h_{int} : Coefficient d'échange convectif entre la paroi intérieure et l'air chaud.

Les coefficients d'échange convectif de l'air de l'intérieur à l'extérieur du séchoir λ_{int} et λ_{ext} sont fonction de la température de et de la nature de l'écoulement de l'air sur la tôle d'acier.

Epaisseur de la paroi :

Elle est constituée de :

- La laine de verre d'épaisseur à déterminer ;
- 3 mm de tôle d'acier.

Nous estimons les pertes à travers les parois à 10% des pertes totales, soit :

$$Pv = \frac{10}{100} \times 1233,3$$

$$Pv = 123,33 \text{ W} \quad (3.18)$$

Pour calculer l'épaisseur de la laine de verre, nous que les pertes ont lieu tout autour des parois du four, donc les pertes à travers une face valent :

$$P'_{ve} = 30,832 \text{ W}$$

Trouvons le coefficient d'échange de chaleur paroi/air ambiant h_{ext}

$$h_{ext} = \frac{\lambda_a \times Nu}{D_h} \quad (3.19)$$

Le nombre de Nusselt Nu est donné par :

$$Nu = C (GrPr)^n \quad (3.20)$$

$$Re = \frac{D_h \times V \times \rho}{\mu}$$

Dans l'hypothèse que l'air est un gaz parfait on a :

$$\rho = \frac{P}{R \times T} \quad (3.21)$$

La température moyenne de l'air dans les régions du centre et sud vaut :

$$T = 24^\circ \text{C}$$

A la pression ambiante, on a :

$$\rho = \frac{101726}{287 \times 298,5} = 1,19 \text{ Kg/m}^3$$

Le diamètre hydraulique, $D_H = h = 1\text{m}$ et la vitesse moyenne de l'air est de $V = 1,66 \text{ m/s}$

$$Re = \frac{1,66 \times 1,19 \times 1}{1,8 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 109744$$

L'écoulement est turbulent, on prend $n = 1/3$ et $C = 0,13$

$$Gr = \frac{1}{2} Re^2 \quad (3.22)$$

$$Gr = \frac{1}{2} \times 109744^2 = 6021921543$$

$$Pr = \frac{\mu \times C_p}{\lambda} = \frac{1000 \times 1,8 \times 10^{-5}}{0,0262} = 7,1 \times 10^{-1}$$

On déduit donc le nombre de Nusselt :

$$Nu = 0,13 (6021921543 \times 7,1 \times 10^{-1})^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 210,98$$

$$\text{Donc : } h_{ext} = \frac{0,0262 \times 210}{1} = 5,53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$$

➤ **Evaluation de h_{int}**

$$h_{int} = \frac{\lambda_a \times Nu}{D_h}$$

Le nombre de Nusselt Nu est donné par :

$$Nu = C (GrPr)^n$$

$$Re = \frac{V \times \rho \times D_h}{\mu}$$

Dans l'hypothèse que l'air est un gaz parfait on a :

$$\rho = \frac{P}{R \times T}$$

La température moyenne de l'air dans les régions du centre et sud vaut :

$$T = 24^\circ \text{ C}$$

A la pression ambiante, on a :

$$\rho = \frac{101726}{287 \times 328,15} = 1,09 \text{ Kg/m}^3$$

Pour une plaque verticale, $DH = h = 1 \text{ m}$

La vitesse moyenne de l'air est de $V = 0,4 \text{ m/s}$

$$Re = \frac{0,4 \times 1,09 \times 1}{1,8 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 24000$$

L'écoulement est turbulent, on prend $n = 1/3$ et $C = 0,13$

$$Gr = \frac{1}{2} Re^2$$

$$Gr = \frac{1}{2} \times 24000^2 = 288000000$$

$$Pr = \frac{\mu \times c_p}{\lambda} = \frac{1000 \times 1,8 \times 10^{-5}}{0,0262} = 7,1 \times 10^{-1}$$

On déduit donc le nombre de Nusselt :

$$Nu = 0,13 (288000000 \times 7,1 \times 10^{-1})^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 76,583 \text{ donc :}$$

$$h_{ext} = \frac{0,0262 \times 76,58}{1}$$

$$h_{int} = 2 \text{ W. m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Il vient alors que :

$$\frac{e_1}{\lambda_{is} S} = \frac{T_{in} - T_{ex}}{P_{ve}} - \frac{e}{\lambda_1 S} - \frac{1}{h_{ext} S} - \frac{1}{h_{int} S}$$

$$e_1 = 0,043 \times 1 \times \frac{328,15 - 287}{30,832} - \frac{3 \times 10^{-3}}{50 \times 1} - \frac{1}{5,53 \times 1} - \frac{1}{2 \times 1}$$

$$e_1 = 28 \text{ mm}$$

L'épaisseur totale de la paroi extérieure est de :

$$e = 31 \text{ mm}$$

III.5.2 La force maximale appliquée sur les parois de l'enceinte de séchage

Selon les hypothèses de calcul suivant :

- Diamètre extérieur de l'enceinte de séchage : $D_e = 500 \text{ mm}$;
- Diamètre intérieur de l'enceinte de séchage : $D_i = 494 \text{ mm}$;
- Epaisseur de la paroi de l'enceinte de séchage : $e_1 = 3 \text{ mm}$;
- Pression maximale appliquée sur les parois : $P_{max} = 38692 \text{ Pa}$.

On sait que : $P_{max} = \frac{F_{max}}{S}$ (3.23)

$$F_{max} = P_{max} \times S$$

$$F_{max} = 0,03692 \times \pi \times 61009$$

$$F_{max} = 7072,70 \text{ N}$$

III.6 ELEMENTS MECANIKES

Le calcul mécanique concerne l'ossature métallique du four ;

III.6.1 Modélisation

Les caractéristiques dimensionnelles de notre four sont :

- Forme supérieure (cylindrique) : Diamètre x Hauteur = 500 mm x 1000 mm ;
- Forme inférieure (conique) : Grand diamètre x Petit diamètre x Hauteur = 500 mm x 100 mm x 300 mm

Notre four est en acier inoxydable ayant pour désignation normalisée X 2 Cr Ni Mo 22-5-2

➤ **Présentation de l'ossature**



Figure 3.15 : Ossature métallique de la chambre de séchage

Hypothèse (annexe 2)

-Matériau : **X 2 Cr Ni Mo 22-5-2**

-Dimensionnement **ELU** et **ELS**

-Module d'Young : **203 000 MPa** ;

- Masse volumique : **8 080 kg/m³** ;

- Limite élastique **R_e** : **350 MPa**.

Tableau 3.3 : Descente des charges

Matériau	Masse volumique (kg/m ³)	Grand Diamètre x 10 ⁻³ (m)	Petit Diamètre x 10 ⁻³ (m)	Hauteur x 10 ⁻³ (m)	Epaisseur (mm)	Masse (kg)
Tôle acier inox	8 080	500	-	1 000	3	1 585
Tôle acier inox	8 080	500	100	300	3	197
Couvercle	8 080	500	-	-	3	5
Tomate	0,9	-	-	-	-	50

➤ Calcul section des poteaux

Nous avons deux types de charges appliquées au poteau qui sont :

- **Charges permanentes G** : ici, les efforts ne varient pas tout au long de l'utilisation du dispositif (poids propres des éléments structuraux, etc...) ;
- **Charge d'exploitation Q** : ici, les efforts peuvent varier tout au long de l'utilisation du dispositif (quantité de tomate, etc...).

Il existe également deux états pour trouver la charge globale du dispositif qui sont :

- **Etat Limite de Service (ELS)** : ici on considère que le dispositif fonctionne en mode normal c'est-à-dire sans surcharge de ce dernier, nous avons donc la formule suivante :

$$P = G + Q$$

- **Etat Limite de Ultime (ELU)** : ici on considère que le dispositif fonctionne en mode critique c'est-à-dire que le dispositif est surchargé, nous avons donc la formule suivante :

$$P = 1,35G + 1,5Q$$

III.6.2 Calcul des assemblages

➤ Bati-poteaux

Grace a un cordon de soudure nous allons assembler le bâti et les poteaux pour que notre four soit statique.

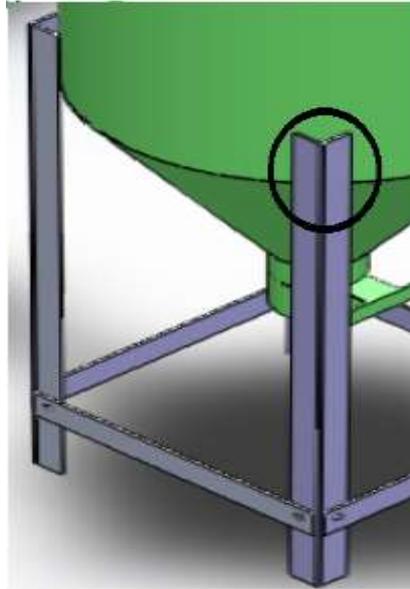


Figure 3.16: assemblage bâti-poteau

Dans ce cas, le bâti et les poteaux sont orthogonaux d'où l'épaisseur du cordon de soudure déterminé selon la formule suivante :

Avec : $R_u = 360 \text{ Mpa}$; $\beta_w \gamma_{M_w} = 1$; $N = P' = 6\,594 \text{ N}$

$$a \sum l \geq \frac{6594 \times \sqrt{2}}{360}$$

$$a \sum l \geq 26 \text{ mm}^2$$

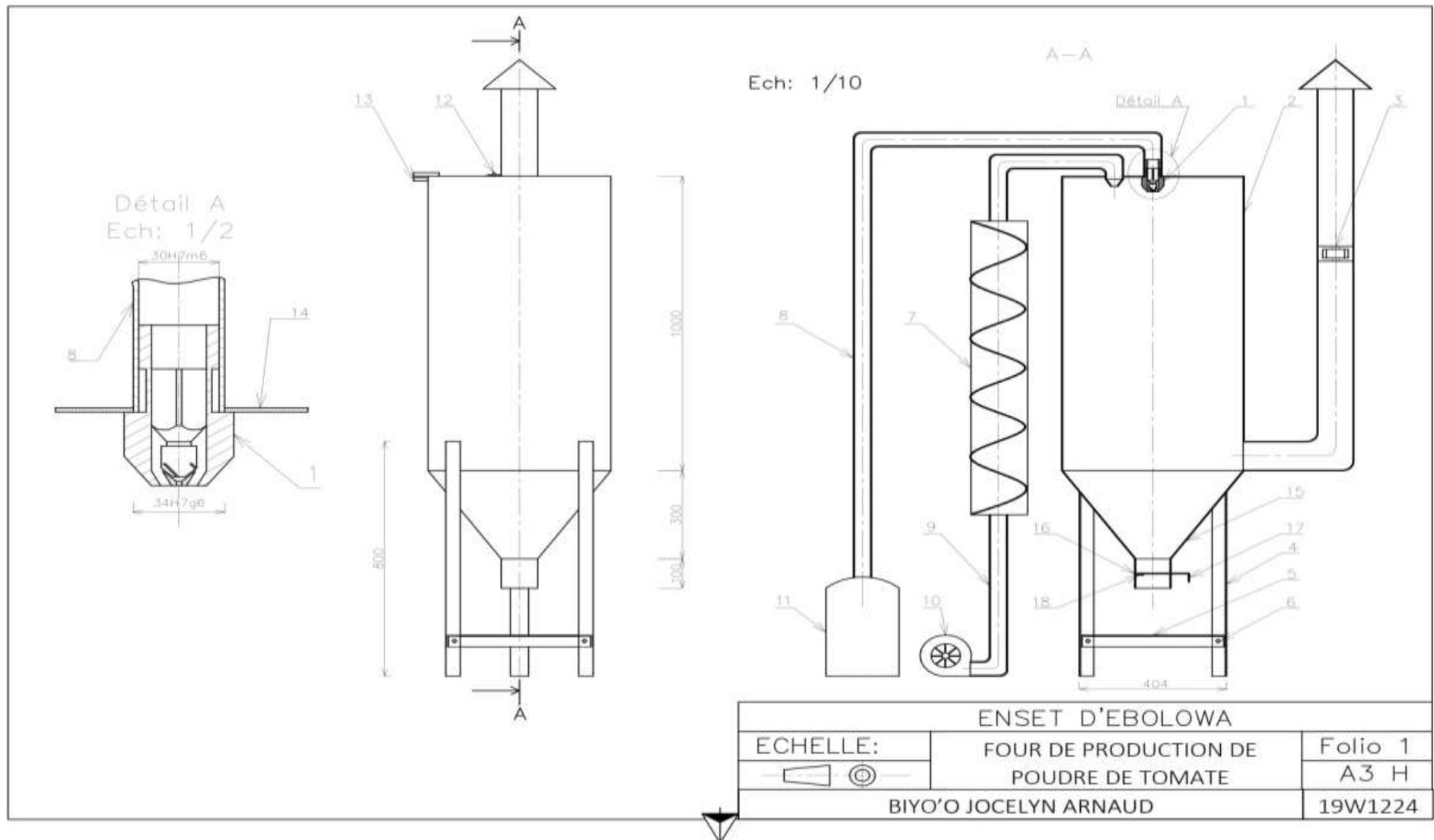
Pour $\sum l = 100 \text{ m}$ on a : $a \geq 0,26 \text{ mm}$

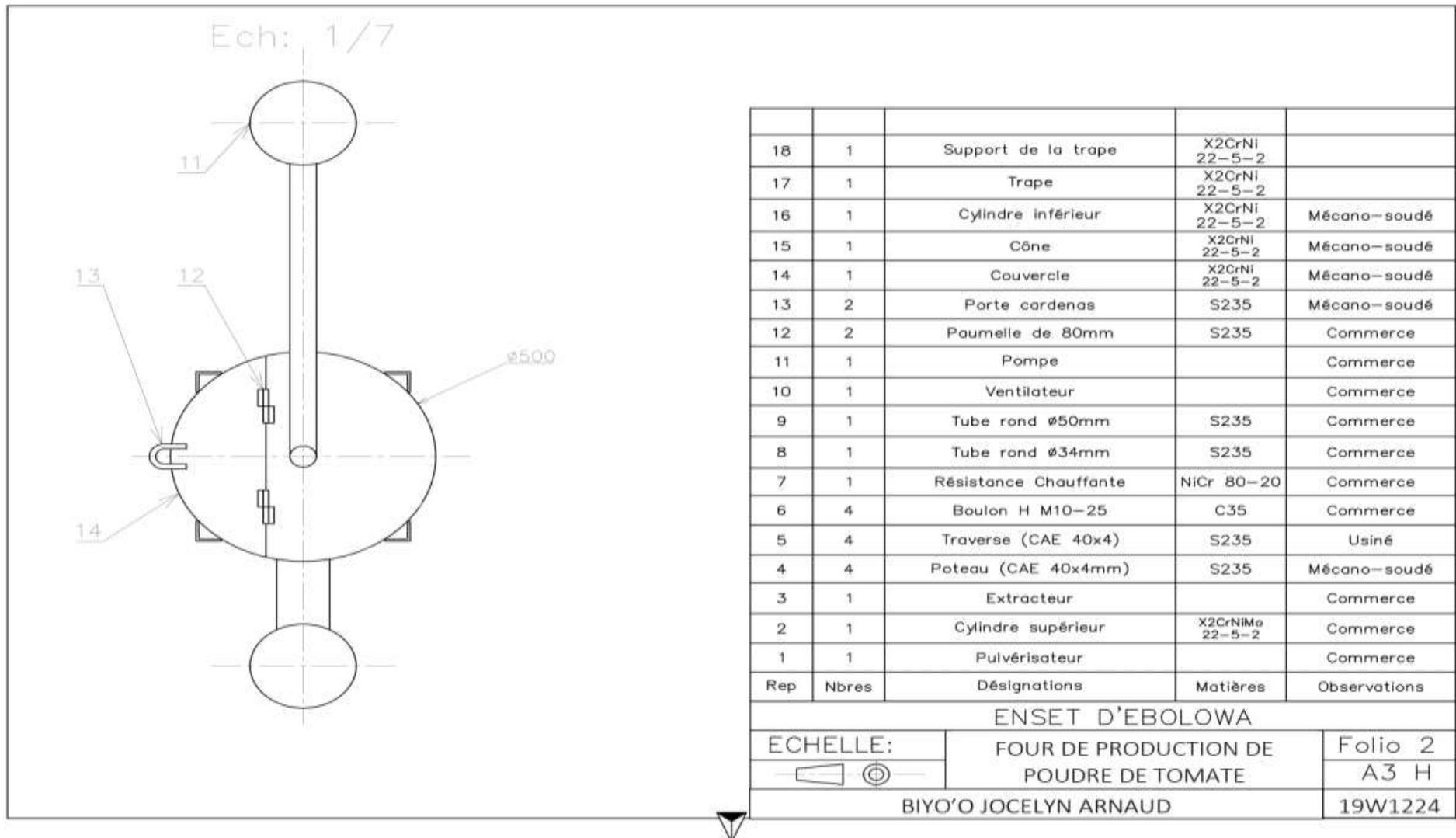
Donc **a=3 mm**

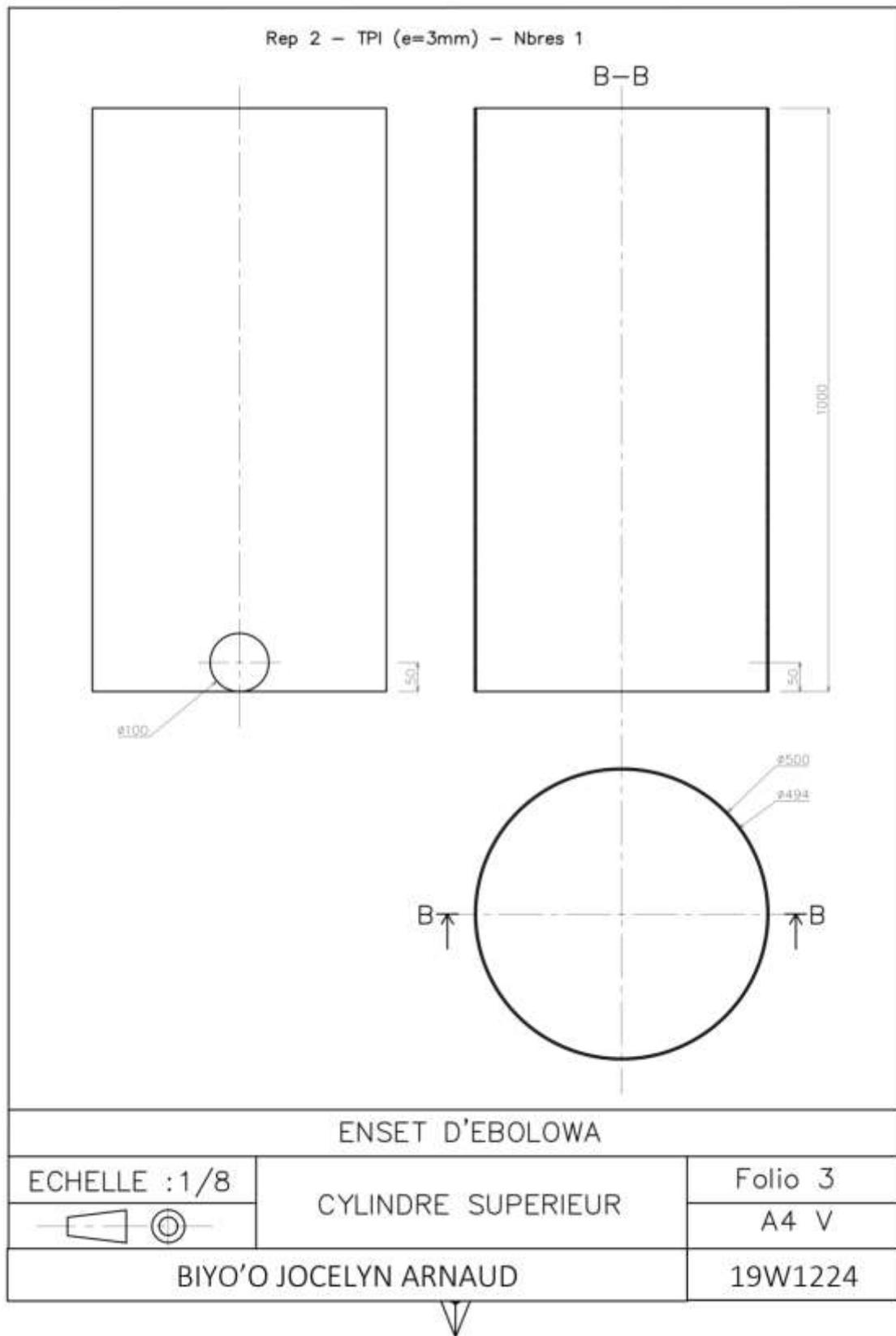
III.7 Etude graphique

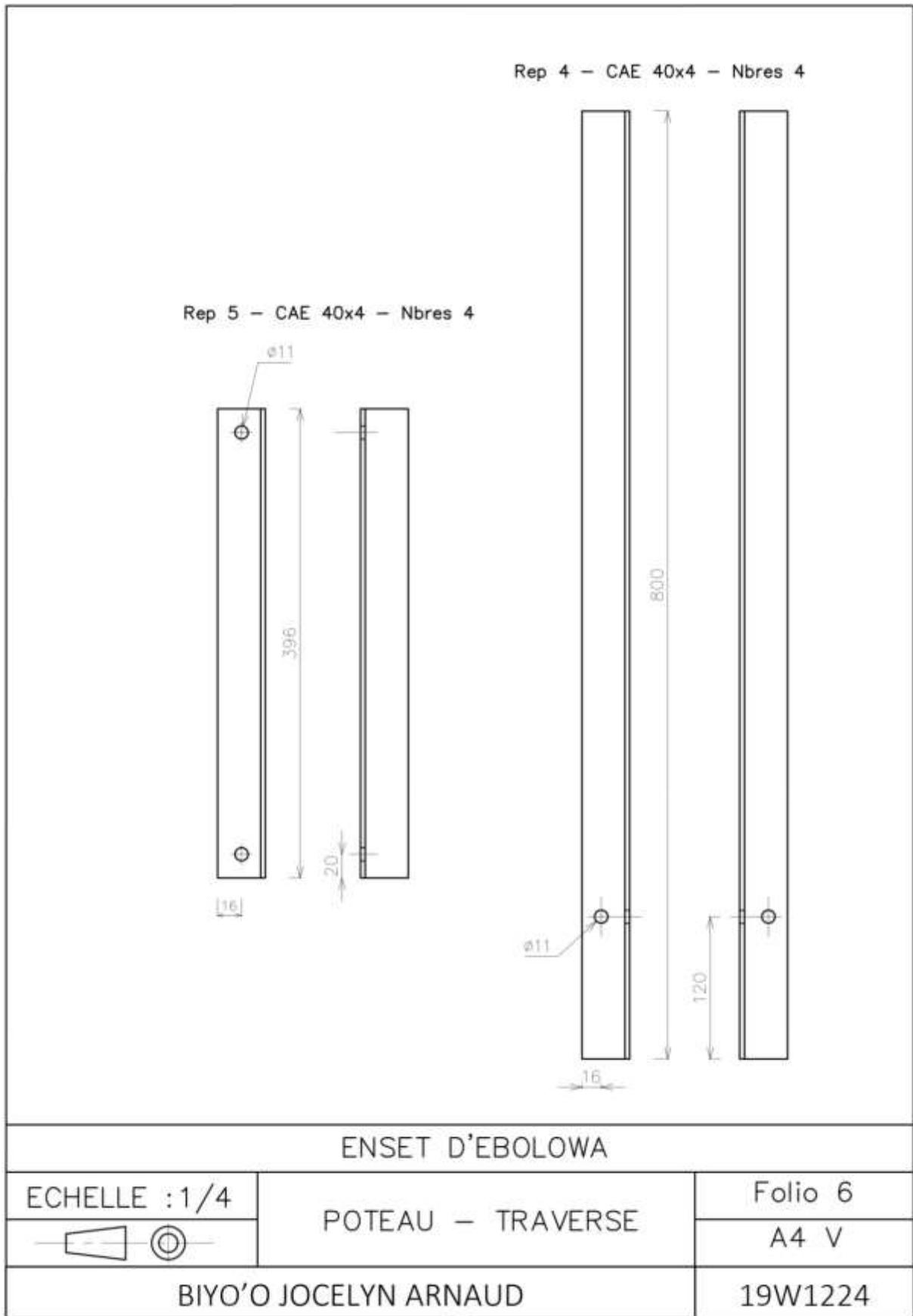
III.7.1 Dessin d'ensemble

III.7.2 Dessins de définition









CHAPITRE 3 : ETUDE DE FABRICATION, COUT ET EXPLOITATION DE L'EQUIPEMENT

Cette partie sera consacrée à une étude de fabrication et de mise en œuvre de notre séchoir, à l'évaluation du coût d'acquisition et mettre sur pieds un guide d'utilisation de notre four.

4.1 ETUDE DE FABRICATION

Dans ce chapitre nous commencerons d'abord par le traçage de la développante de cercle en vue de la fabrication du tronc de cône afin de réaliser la chambre de séchage.

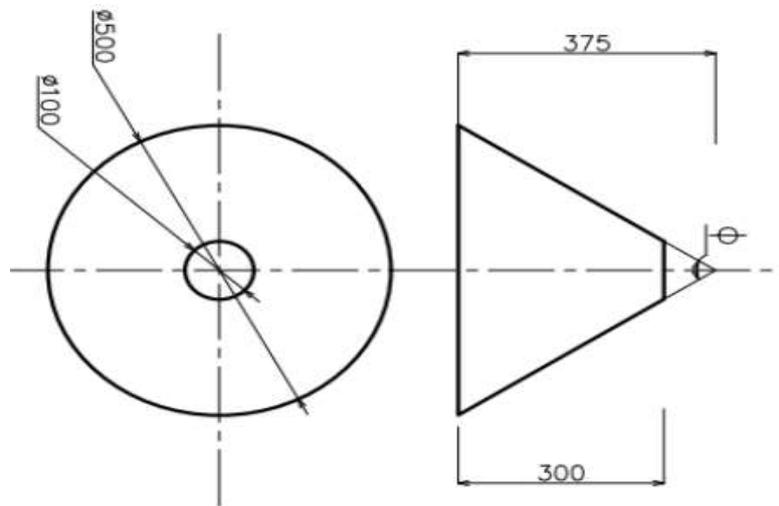


Figure 4.1 : Tronc de cône

D'après la formule suivante, nous pouvons trouver l'angle de la développante du cercle d'où on a :

$$\phi = 2 \times \tan^{-1}\left(\frac{H}{R}\right)$$

$$\phi = 2 \times \tan^{-1}\left(\frac{250}{375}\right)$$

$$\phi = \phi = 67^\circ$$

D'où la développante suivante :

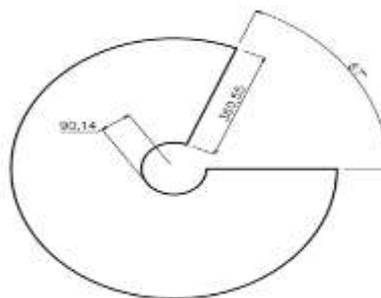


Figure 4.2 : Développante du tronc de cône

IV.2 ETUDE ET REALISATION

Dans cette partie on traitera l'ensemble de l'organisation de la préfabrication des pièces et du montage de l'ensemble du dispositif, nous présenterons les différentes étapes qui conduiront à la fabrication de la machine.

IV.2.1 Traçage

Cette opération consiste le plus souvent à déterminer sur papier a même la tôle les contours de la surface qui une fois formée comme il se doit produire la pièce envisagée (coupe, un cylindre, un cône, un élément de liaison entre deux orifices quelconques...)

IV.2.2 Découpage ou débitage

Le **découpage** est un procédé de fabrication de pièces qui consiste à diviser un sous-produit en plusieurs parties. Avec l'avancé de la technologie, le découpage se fait aussi de manière numérique (machines-outils...)



Figure 4.3: découpage manuelle d'une feuille de tôle

IV.2.3 Le ceintrage

Le ceintrage c'est un procédé de fabrication mécanique qui permet la déformation d'un tube ou d'une barre, suivant un rayon et un angle à l'aide d'une machine-outil appelée cintreuse.



Figure 4.4 : ceintrage d'un tube rond

IV.2.4 Le perçage

Le **perçage** est un usinage consistant à faire un trou dans une pièce. Ce trou peut traverser la pièce de part en part ou bien ne pas déboucher. On parle alors de trou borgne. L'opération peut être effectuée sur des machines-outils telles que : la perceuse, le tour, la fraiseuse.



Figure 4.5: perçage d'une pièce

IV.2.5 Le soudage

Le soudage est un procédé d'assemblage permanent. Il a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Après avoir effectué toutes les opérations ci-dessus, il doit falloir assembler les poteaux et le bâti par soudage. Ce procédé s'effectue en respectant les angles d'inclinaisons et en faisant les bons cordons de soudure.



Figure 4.6: soudure à l'arc électrique

IV.2.6 Contrôles des défauts

➤ **Cordon de soudure poteau-bâti**

La recherche de défauts par la méthode adaptée dans les zones présentant des ondulations ou des enfoncements et systématique en cas de dépôt partiel ou total du revêtement.

➤ **Soudure des zones critiques**

La recherche de défauts par méthode adaptée en cas d'enfoncement périphérique et systématique en cas de dépôt partiel ou total du revêtement

Tableau 4.1 : gamme prévisionnelle de fabrication

			PLANNING DE PHASES
ESSEMBLE	SOUS ENSEMBLE	ELEMENTS	PHASES
2	2	2	Traçage – Débitage – Cintrage – Soudage (111) - Contrôle
4	15	15	Traçage - Débitage - Cintrage – Soudage (111) - Contrôle
5	16	16	Traçage - Débitage - Cintrage – Soudage (111) - Contrôle
13	17	17	Traçage - Débitage - Pliage - Contrôle
14	18	18	Traçage – Débitage - Contrôle
15	4	4	Traçage - Débitage - Perçage - Contrôle
16	5	5	Traçage - Débitage - Perçage - Contrôle
18	13	13	Traçage - Débitage - Pliage - Contrôle
18	14	14	Traçage - Débitage - Pliage - Contrôle

Après toutes ces opérations nous obtenons notre chambre de séchage comme présentée ci-dessous. Cette modélisation permet de donner une idée de la réalisation on se limite à celle-ci à titre d'exemple.

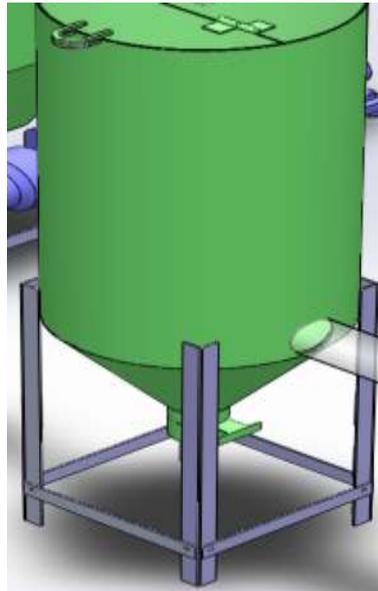


Figure 4.7 : Modélisation 3D de la chambre séchage

IV.3 GUIDE D'UTILISATION

➤ Règle de sécurité

La réalisation l'équipement ainsi que son utilisation doivent être faits dans le strict respect de certaines règles de sécurité, à savoir :

- La fabrication et le montage doivent s'effectuer selon les normes qui régissent chaque opérations (débitage, soudage, travail sur machine-outil) ;
- L'utilisation des équipements de protection individuels (EPI) est exigée ;
- Se rassurer que l'assemblage se fait par des techniciens qualifiés en la matière ;
- Ne pas ouvrir le séchoir pendant le processus de séchage ;
- S'assurer de l'isolation des fils électriques ;
- Utiliser les fils de sections appropriées pour l'alimentation des résistances chauffantes ;
- Ne pas toucher le séchoir pendant le fonctionnement.

➤ Description du fonctionnement du four

La procédure pour la mise en route de l'appareil est la suivante :

- Ecrasée au préalable la tomate ;
- Alimenter en électricité ;
- Alimenter en air comprimé ;
- Mettre en place le pot de réception des poudres et ouvrir la vanne au bas du cyclone ;

- Mettre en marche le ventilateur et régler la position de la vanne à ailettes ;
- Mettre en marche le réchauffeur d'air, mettre la consigne à 120 - 140°C, *puis effectuer la montée en température de façon progressive par palier de 20°C* ;
- Mettre en marche la turbine et *régler la consigne de la vitesse de rotation de la turbine à partir du manomètre d'air comprimé* ;
- Mettre en route la pompe d'alimentation afin d'introduire de l'eau au débit d'alimentation de la solution ;
- Monter la température de consigne afin que la température de l'air en sortie soit supérieure à 120 -140°C.

➤ **Mise en arrêt du four**

Après utilisation, il est nécessaire de **nettoyer la turbine de l'atomiseur à l'eau claire**. Pour cela, laisser fonctionner l'atomiseur en injectant de l'eau pendant 15 minutes.

Après le nettoyage de la turbine, le sécheur - atomiseur s'arrête de la façon suivante :

- Arrêter le réchauffeur d'air ;
- Réduire progressivement l'alimentation en eau ;
- Arrêter la pompe d'alimentation en eau lorsque la température d'entrée est inférieure 130°C ;
- Arrêter la turbine lorsque la température d'entrée est inférieure à 50°C ;
- Arrêter le ventilateur ;
- Couper l'alimentation d'air comprimé ;
- Couper l'alimentation électrique.

IV.3 PLAN DE MAINTENANCE

Afin d'assurer la longévité et la qualité de produit de notre four de poudre de tomate, des opérations de maintenance préventive systématique devront être exécutées comme suit :

- Nettoyer la turbine de l'atomiseur à l'eau claire ;
- Renouveler le revêtement non métallique (peinture) tous les 24 mois ;
- Nettoyer de l'extracteur après 100 cycles de séchage ;
- Faire une maintenance préventive sur la pompe toutes les 5 semaines ;
- Remplacement de la résistance chauffante après 500 cycles de séchage ;

- Nettoyer la turbine de pulvérisation après usage et son remplacement après 500 cycle de séchages.

IV.4 COUTS DE REALISATION DU SECHOIR

Nous évaluons dans cette partie, les besoins en matière d'œuvre et en main d'œuvre afin d'estimer le coût de réalisation du séchoir. A cet effet Nous allons utiliser les prix des profilés et matériels présents sur le marché camerounais et appliquer une TVA de 19,25%.

Le devis estimatif prendra en compte trois (03) grands axes, à savoir :

- Le matériel ;
- La main d'œuvre (étude et réalisation) ;
- Les recherches et divers.

Tableau 4.2 : Devis estimatif de la réalisation du four

Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)
Materiel A				
Ventilateur 1		01	25000	25000
Ventilateur 2		01	15000	15000
Atomiseur ou pulvérisateur		01	15000	15000
Résistance chauffante	ml	25	2500	2500
Pompe		01	70000	7000
Tôle plane inox 30/10 mm	mm	02	220000	440000
Tube rond Galva Ø34x2mm	mm	01	8500	8500
Tube rond Ø50x2mm	mm	01	7000	7000
Antirouille	Kg	01	2500	2500
Peinture	Kg	01	3500	3500
Diluant synthétique	L	01	2000	2000
Baguettes Ø3.2mm	paquet	01	15000	15000
Disque à couper		10	1000	10000
Paumelle de 80mm	mm	02	200	400
Cornières CAE 40x5x600	mm	01	10500	10500
TOTAL A				563000
MAIN D'OEUVRE B				
Main d'œuvre et coût machine				150000
Recherche et étude du projet				120000
TOTAL B				270000
DIVERS C				

TRANSPORT, AMORTISSEMENT				80000
TOTAL C				80000
TOTAL A+B+C				913 000

Le cout total pour la réalisation de notre four s'évalue à **neuf cent treize mil (913000)**
FCFA.

CONCLUSION

Rendu au terme de ce travail, il était question pour nous **d'étudier et réaliser un four de production de poudre de tomates**, pour mener à bien notre travail nous avons tout d'abord fait la présentation de la principale entité mis en jeu, la tomate écrasée comme matière première et nous avons fait une revue sur les différents dispositifs existants pour sécher la tomate, nous avons élaborer une analyse fonctionnelle pour définir au mieux les caractéristiques de notre dispositif, à l'aide du dimensionnement thermiques et mécaniques et électriques, nous avons optimisé les caractéristiques des éléments constitutifs de notre four, ayant une cadence de production de 250Kg/h, nous avons ressortis grâce au logiciel SOLID WORK et AUTOCAD ressortir le dessin de définition des pièces principales et enfin faire une estimation du cout de fabrication qui s'évalue à **913 000 FCFA**.

Cependant plusieurs éléments peuvent contribuer à l'amélioration de ce travail parmi lesquels : l'isolation de la chambre de séchage, l'étude du dispositif de pompage du produit, l'étude du système de convoi de l'air chaud, l'étude du système d'asservissement (thermostat, thermomètre industriel).

BIBLIOGRAPHIES

- [1] DJEBNOUN KHALED, Etude théorique et expérimentale des performances d'un séchoir couplé à un capteur solaire plan à air non publié
- [2].- http://tech-alim.univ-lille1.fr/sechage/co/Chapitre1_3.html vu 18h30 15/05.2021
- [3] Keith Masters, Spray Drying Handbook, 5th ed., Longman Scientific & Technical, 1991.
- [4]. Étude du séchage convectif de boues de station d'épuration. Angélique léonard thèse présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences appliquées 2002
- [5]. Iyes bennamoun. Contribution à l'étude des transferts couples avec changement de phase dans un milieu poreux. Influence des conditions d'air variables sur les cinétiques de séchage et le comportement global d'un séchoir solaire. Université mentouri constantine
- [6]. Charreau A. & Cavallé R. Opérations unitaires, Séchage, II. Appareillage et choix d'un procédé. *Techniques de l'ingénieur*, J 2482.1-J 2482.18. (1991).
- [7]. Schlünder E.U. On the mechanism of the constant drying rate period. *Drying* 89, Ed. A.S. Mujumdar, 226-229. (1989).
- [8]. Toei R. Theoretical fundamentals of drying operation. *Drying Technology*, (14(1), 1-194. (1996).
- [9]. Belhamri A. (2003). Characterization of the first falling rate period during drying of a porous material. *Drying Technology*, 21(7), 1235-1252.
- [10]. Doymaz, İ. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 359-364. 2004.
- [11]. Ibrahim Doymaz, «Air drying characteristics of tomatoes,,» *Journal of Food Engineering* 78, 2007.
- [12].A.A.EL-Sebaï, S.Abdoul-Enein,M.R.I.Ramadan, H.G.EI-Gohary, Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables *Energy*, 2002.
- [13]. FAO_FLW_Cameroun_jun16_- _Douala *Journal of Food Engineering* , p. 55, 2002.
- [14] Etude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux thu ha nguyen
- [15] Monique Bargal, Geaovani Belletti, Andrea Marescoti, Etude sur le potentiel de commercialisation du cacao au Cameroun en " Indication Géographique", REED SA, 2012.
- [16] Cacao Guide des pratiques commerciales, Genève, 2001.
- [17] BEN MELIK.F, DONCFACK.T.C, TOUM OUM.L, Conception et dimensionnement d'un séchoir à Biomasse pour les fèves de cacao au Cameroun, 2015 (non publié).

- [18] Clarisse Amani, « Cacao : obtenir des fèves de qualité » 2014.
- [19] <http://www.developpement-durable.gouv.fr> : l'effet de serre et ses conséquences.17/05/2021
- [20] Mesure des caractéristiques des combustibles bois, *ADEME Critt Bois – Fibois – CTBA JUILLET 2001*
- [21] Ngah Mvogo Fabrice, étude et réalisation d'un séchoir écologique des fèves de cacao, Enset d'Ebolowa 2018-2019 (non publié)
- [22]. Kamenan Blaise Koua1, Séchage des fèves de cacao dans séchoir solaire indirect à circulation forcée d'air. CAMES
- [23]. Dovy choumzoue, étude et réalisation d'un séchoir de tomates, Enset d'Ebolowa 2018-2019 (non publié)
- [24]. Carrère-Gée, C., *Etude du séchage indirect d'une fine couche de boue d'hydroxyde d'aluminium en ébullition : application au cylindre sécheur*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse 3 (1999).
- [25]. <http://www.fao.org>. *Équipements améliorés de manutention et de transformation pour la pêche artisanale. Page 55.*
- [26]. ADEME, et CETIAT, *Les procédés de séchage dans l'industrie*, ADEME et CETIAT, eds; ADEME Editions: Angers (2000).
- [27]. Buss-SMS, "Horizontal thin film dryer: operating principle", [En ligne].
- [28]. Michel Bigand Maître de conférences à Centrale Lille, Cours Analyse Fonctionnelle
- [29]. J. L. FANCHON, Guide des SCIENCES ET TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES, Paris: NATHAN.

ANNEXES

ANNEXE 1 : CHOIX DES BUSES

Angle de Pulvérisation	2 in.	5 cm	4 in.	10 cm	6 in.	15 cm	8 in.	20 cm	10 in.	25 cm	12 in.	30 cm	15 in.	40 cm	18 in.	50 cm	24 in.	60 cm	30 in.	70 cm	36 in.	80 cm	48 in.	100 cm
5°	0,2	0,4	0,4	0,9	0,5	1,3	0,7	1,8	0,9	2,2	1,1	2,6	1,3	3,5	1,6	4,4	2,1	5,2	2,6	6,1	3,1	7,0	4,2	8,7
10°	0,4	0,9	0,7	1,8	1,1	2,6	1,4	3,5	1,8	4,4	2,1	5,3	2,6	7,0	3,1	8,8	4,2	10,5	5,2	12,3	6,3	14,0	8,4	17,5
15°	0,5	1,3	1,1	2,6	1,6	4,0	2,1	5,3	2,6	6,6	3,2	7,9	3,9	10,5	4,7	13,2	6,3	15,8	7,9	18,4	9,5	21,1	12,6	26,3
20°	0,7	1,8	1,4	3,5	2,1	5,3	2,8	7,1	3,5	8,8	4,2	10,6	5,3	14,1	6,4	17,6	8,5	21,2	10,6	24,7	12,7	28,2	18,9	35,3
25°	0,9	2,2	1,8	4,4	2,7	6,7	3,5	8,9	4,4	11,1	5,3	13,3	6,6	17,7	8,0	22,2	10,6	26,6	13,3	31,0	15,9	35,5	21,2	44,3
30°	1,1	2,7	2,1	5,4	3,2	8,0	4,3	10,7	5,4	13,4	6,4	16,1	8,1	21,4	9,7	26,8	12,8	32,2	16,1	37,5	19,3	42,9	25,7	53,6
35°	1,3	3,2	2,5	6,3	3,8	9,5	5,0	12,8	6,3	15,8	7,6	18,9	9,5	25,2	11,3	31,5	15,5	37,8	18,9	44,1	22,7	50,5	30,3	63,1
40°	1,5	3,6	2,9	7,3	4,4	10,9	5,8	14,6	7,3	18,2	8,7	21,8	10,9	29,1	13,1	36,4	17,5	43,7	21,8	51,0	26,2	58,2	34,9	72,8
45°	1,7	4,1	3,3	8,3	5,0	12,4	6,6	16,6	8,3	20,7	9,9	24,9	12,4	33,1	14,9	41,4	19,9	49,7	24,8	58,0	29,8	66,3	39,7	82,8
50°	1,9	4,7	3,7	9,3	5,6	14,0	7,5	18,7	9,3	23,3	11,2	28,0	14,0	37,3	16,8	46,8	22,4	56,0	28,0	65,3	33,6	74,6	44,8	93,3
55°	2,1	5,2	4,2	10,4	6,3	15,6	8,3	20,8	10,3	26,0	12,5	31,2	15,6	41,7	18,7	52,1	25,0	62,5	31,2	72,9	37,5	83,3	50,0	104
60°	2,3	5,8	4,6	11,6	6,9	17,3	9,2	23,1	11,5	28,9	13,8	34,6	17,3	46,2	20,6	57,7	27,7	69,3	34,6	80,8	41,6	92,4	55,4	115
65°	2,5	6,4	5,1	12,7	7,6	19,1	10,2	25,5	12,7	31,9	15,3	38,2	19,2	51,0	22,9	63,7	30,5	76,5	38,2	89,2	45,8	102	61,2	127
70°	2,8	7,0	5,6	14,0	8,4	21,0	11,2	28,0	14,0	35,0	16,8	42,0	21,0	56,0	25,2	70,0	33,6	84,0	42,0	98,0	50,4	112	67,2	140
75°	3,1	7,7	6,1	15,4	9,2	23,0	12,3	30,7	15,3	38,4	18,4	46,0	23,0	61,4	27,6	76,7	36,8	92,1	46,0	107	55,2	123	73,6	153
80°	3,4	8,4	6,7	16,8	10,1	25,2	13,4	33,6	16,8	42,0	20,2	50,4	25,2	67,1	30,3	83,9	40,3	101	50,4	118	60,4	134	80,6	166
85°	3,7	9,2	7,3	18,3	11,0	27,5	14,7	36,7	18,3	45,8	22,0	55,0	27,5	73,3	33,0	91,6	44,0	110	55,0	128	66,0	147	88,0	183
90°	4,0	10,0	8,0	20,0	12,0	30,0	16,0	40,0	20,0	50,0	24,0	60,0	30,0	80,0	36,0	100	48,0	120	60,0	140	72,0	160	96,0	200
95°	4,4	10,9	8,7	21,8	13,1	32,7	17,5	43,7	21,8	54,6	26,2	65,5	32,8	87,3	39,3	109	52,4	131	65,5	153	78,6	175	105	218
100°	4,8	11,9	9,5	23,8	14,3	35,8	19,1	47,7	23,8	59,6	28,6	71,5	35,8	95,3	43,0	119	57,2	143	71,5	167	85,9	191	114	238
110°	5,7	14,3	11,4	28,6	17,1	42,9	22,8	57,1	28,5	71,4	34,3	85,7	42,8	114	51,4	143	68,5	171	85,6	200	103	229	-	286
120°	6,9	17,3	13,9	34,6	20,8	52,0	27,7	69,3	34,8	86,6	41,6	104	52,0	139	62,4	173	83,2	208	104	243	-	-	-	-
130°	8,6	21,5	17,2	42,9	25,7	64,3	34,3	85,8	42,9	107	51,5	129	64,4	172	77,3	215	103	257	-	-	-	-	-	-
140°	10,9	27,5	21,9	55,0	32,9	82,4	43,8	110	54,8	137	65,7	165	82,2	220	98,6	275	-	-	-	-	-	-	-	-
150°	14,9	37,3	29,8	74,6	44,7	112	58,6	149	74,5	187	89,5	224	112	299	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
160°	22,7	56,7	45,4	113	68,0	170	90,6	227	113	284	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
170°	45,8	114	91,6	229	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ANNEXES 2 : PRESCRIPTION DE L'EUROCODE 3

En matière d'analyse de structure *L'Eurocode3* passe par une distinction entre :

- Les ossatures souples pour lesquelles des dispositions doivent impérativement être prises pour tenir compte des effets de second ordre.

- Les ossatures rigides qui, au contraire, peuvent valablement être analysées par un calcul au 1^{er} ordre. L'Eurocode 3 fixe comme seuil de prise en compte des effets de second ordre, la valeur 0.1 du rapport entre V_{sd} la résultante verticale des actions pondérées appliquées et V_{cr} la valeur critique de la charge verticale obtenue par amplification de ce chargement pondéré :

$$\frac{V_{sd}}{V_{cr}} \geq 0.1$$

Pour les ossatures planes étagées composés de poutres et de poteaux encastés, ce critère est à évaluer pour chaque étage, il peut être remplacé par l'inégalité :

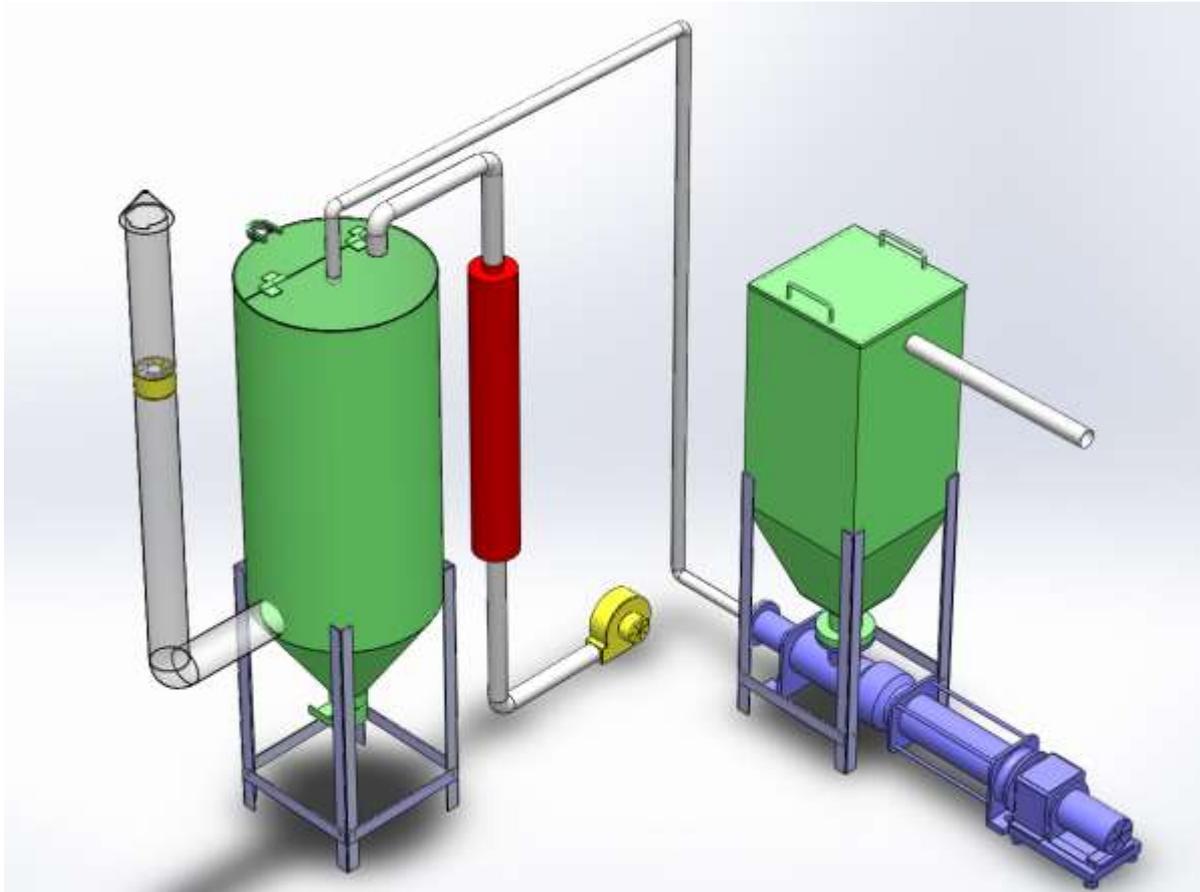
$$\frac{V_{sd}}{H_{sd}} \times \frac{\delta}{h} \geq 0.1$$

Une troisième catégorie de structure est envisagée par l'Eurocode3 : les structures contreventées pour lesquelles la stabilité latérale est assurée par un système de contreventement qui leur est extérieur et suffisamment rigide pour que l'on puisse juger qu'il équilibre l'ensemble des actions horizontales. Le règlement stipule que ; pour que cette condition puisse être jugée comme satisfaite ; le présent système de contreventements doit réduire au moins 80% les déplacements latéraux de l'ossature qu'il stabilise.

ANNEXE 3 : FORMES DE CORDON DE SOUDURE

COTES A INDIQUER					
Désignation	Représentation simplifiée	Inscription	Désignation	Représentation simplifiée	Inscription
Soudure sur bords relevés non complètement fondus		$s \parallel$	Soudure d'angle discontinue		$a \triangle n^* x l x (e)$
Soudure sur bords droits		$s \parallel$	Soudure d'angle discontinue à éléments alternés		$a \triangle n^* x l Z(e)$ $a \triangle n^* x l Z(e)$
Soudure en V		$s \nabla$	Soudure en entailles		$c \sqcap n^* x l x (e)$
Soudure d'angle continue		$a \triangle$ Pour les applications usuelles : $a \approx e$	Soudure en bouchons		$d \sqcap n^* x (e)$
			Soudure par points		$d \circ n^* x (e)$
			Soudure en ligne		$c \ominus n^* x l x (e)$

ANNEXE 5 : Dessin d'ensemble 3D de notre Four



ANNEXE 6 : Phase de fabrication du four

