

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
ECOLE NORMALE SUPERIEUR
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE
D'EBOLOWA
DEPARTEMENT DE GENIE
MECANIQUE



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
HIGHER TECHNICAL TEACHER
TRAINING COLLEGE OF
EBOLOWA
DEPARTMENT OF
MECHANICAL
ENGINEERING

Filière
CONSTRUCTION MECANIQUE

**ETUDE ET REALISATION D'UN SECHOIR
ECOLOGIQUE DES PRODUITS AGRICOLES (avec
séchage contrôlé, calibré et dynamique)**

Mémoire de fin d'étude
En vue de l'obtention du Diplôme de Professeur d'Enseignement
Technique et
Professionnel de 2e grade (DIPET II)

Par : **PIEBEING Gildas TCHINO**

Sous la direction de
M. NDONGUE Emmanuel
Enseignant
Dr. KOUMI
Chargé de cours

Année Académique : 2019 - 2020



A MES PARENTS

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. Alors, 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 approfondir nos connaissances dans le domaine de la construction Mécanique dans des conditions largement favorables ;
- **Pr KANAA Thomas**, Chef du département de Génie Mécanique pour sa disponibilité et sa supervision organisée au cours de l'élaboration de ce mémoire ;
- **Dr KOUMI** pour sa supervision organisée au cours de l'élaboration de ce mémoire ;
- **M. NDONGUE Emmanuel** pour son encadrement, sa disponibilité, ses 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 ;
- Mon papa **TCHINOUC LUCAS** et ma maman **KOUENAYE VICTORINE** pour l'amour inconditionnel et le soutien indéfectible qu'ils m'ont témoigné tout au long de ma formation ;
- Ma famille, mes frères et sœurs qui n'ont jamais cessé de me prouver leur affection à travers leur encouragement ;
- Mes mamans et tonton **BEATRICE NGUIAGUIA, CHARLOTTE, BELVINE, GILBERT, NARCISSE, RODRIGUE, IDRISSE, LIONNEL.**
- A mon frère **TATIE SANDIE MATHURIN** avec qui nous avons traversé ce moment difficile de notre formation et qui m'a toujours apporté son soutien ;
- A ma camarade **TSINDA SORELLE** pour sa disponibilité, ses encouragements et son soutien durant ma formation ;
- A mes camarades de la 2^{ème} promotion de l'**ENSET** ;
- Tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce travail.

RÉSUMÉ

Le séchage des produits alimentaires 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. Ce travail vise à contribuer à la conservation des produits alimentaires par le séchage, grâce à réalisation d'un séchoir écologique pour les produits agricoles. Pour mener à bien notre étude une revue de la littérature et une étude critique ont été effectuées, ce qui a conduit au choix d'un séchoir rotatif comme centre de réflexion. Pour la proposition de notre solution technologique, l'outil AFN (Analyse Fonctionnelle) nous a permis de ressortir une solution technologique répondant au cahier de charges prédéfini. La réalisation d'une chambre de séchage cylindrique rotative, alimentée en air chaud par une chambre de combustion à bio combustible (cabosses de cacao) a été préférée. Un ventilateur a été installer pour fournir le débit d'air utile ($q_{air} = 6\,302,21\,m^3/h$) pour le séchage. Un équipement pouvant sécher en 15 heures, 2 tonnes de produit dans le cas du cacao a été dimensionné. 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 constituant 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 **deux millions trois cent quatre-vingt-onze mille cinq cent vingt-cinq (2 391 525) Fcfa.**

Mots clés : Séchage, écologique, produits agricoles, cacao, humidité.

ABSTRACT

The drying of crops is of particular interest in the food industry, it allows long-term preservation of food in order to make it available even in the off-season. This work aims at contributing in the crops preservation by drying, with the aid of an ecological dryer for agricultural products. To carry out our study, a literature review and a critical study have been performed, afterwards a rotary dryer as focal point was made. For the proposal of our technological solution, we used the AFN (Functional Analysis) tool.

The realization of a rotary cylindrical drying chamber supplied with hot air by a combustion chamber using a bio fuel has been preferred. A fan has been installed to provide the useful air flow ($q_{air} = 6\,302,21\text{ m}^3/h$) for drying. An equipment able to dry in 15 hours, 2 tonnes of products in the case of cocoa has been designed. Software such as SolidWorks and AUTOCAD has been used for sizing and realizations in 3D and 2D. To complete our work, a manufacturing study was carried out on some of the parts that make up our system and a user guide provided. The equipment is made for grains and the estimated cost of the project is **two million three hundred and ninety-one thousand five hundred and twenty-five (2,391,525) FCFA**.

Keywords: Drying, ecological, crops; cocoa, humidity.

SOMMAIRE

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME	III
ABSTRACT	IV
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS	X
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I GENERALITES SUR LE SECHAGE ET DES PRODUITS AGRICOLES	3
I.1 GENERALITES SUR LE SECHAGE	4
I.1.1 Définition	4
I.1.2 Notion d'humidité, humidité relative d'équilibre et activité de l'eau	4
I.1.3 Isotherme d'adsorption et de désorption	5
I.1.4 L'air humide	7
I.1.5 Principes physiques du séchage	8
I.1.6 Analyse de la cinétique de séchage	11
I.1.7 Modélisation mathématique des transferts lors du séchage	14
I.2 GENERALITES SUR LES PRODUITS AGRICOLES.....	15
I.2.1 Historique	15
I.2.2 Carottes.....	16
I.2.3 Pommes	18
I.2.4 Filières cacao au Cameroun	20
I.3 GENERALITES SUR LES COMBUSTIBLES ECOLOGIQUES.....	27
I.3.1 Définition	27
I.3.2 Effet de serre et gaz à effet de serre	28
I.3.3 Caractéristiques et choix du combustible écologique	29
CHAPITRE II REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES SECHOIRS ET ETUDE CRITIQUES DES SOLUTIONS	31
II.1 TYPES DE SECHOIRS	32
II.1.1 Séchoirs solaires	32
II.1.2 Autres types de séchoirs	36
II.2 CHOIX DE LA TECHNOLOGIE DE SECHAGE APPROPRIEE	44
II.2.1 Critères de choix.....	44
II.2.2 Choix proprement « dit »	45
CHAPITRE III ETUDE DE CONCEPTION	49

III.1	ANALYSE FONCTIONNELLE.....	50
III.1.1	Saisie du besoin	50
III.1.2	Enoncé du besoin	50
III.1.3	Validation du besoin.....	51
III.1.4	Identification des fonctions	52
III.1.5	Diagramme FAST	58
III.1.6	Diagramme SADT.....	60
III.1.7	Schéma technologique du séchoir écologique des produits agricoles proposé	64
III.1.8	Principe de fonctionnement.....	66
III.2	DIMENSIONNEMENT DU SECHOIR	66
III.2.1	Caractéristiques de l'air asséchant	66
III.2.2	Etude thermique de la chambre de séchage	69
III.2.3	Etude thermique de la chambre de combustion	73
III.2.4	Etude technique du séchoir	76
III.3	ETUDE GRAPHIQUE	82
III.3.1	Dessin d'ensemble du séchoir écologique des produits agricoles.....	82
III.3.2	Dessin de définition du couvert.....	82
III.3.3	Dessin de définition du cylindre extérieur	82
III.3.4	Dessin de définition du demi-arbre plein	82
CHAPITRE IV ETUDE DE FABRICATION, COUTS ET EXPLOITATION DE L'EQUIPEMENT.....		83
IV.1	ETUDE DE FABRICATION	84
IV.1.1	Dessin de fabrication de notre demi-arbre plein	84
IV.1.2	Avant-projet d'étude de fabrication (APEF)	85
IV.1.3	Contrat de phase du demi-arbre plein	85
IV.2	COUT DE REALISATION DE NOTRE SECHOIR	93
IV.3	GUIDE D'UTILISATION DE NOTRE EQUIPEMENT	94
IV.3.1	III.1 Règle de sécurité	94
IV.3.2	Plans de maintenance	95
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		96
BIBLIOGRAPHIE		I
ANNEXES.....		III
ANNEXE 1 : DIAGRAMME PSYCHOMETRIQUE		III
ANNEXE 2 : ABAQUE POUR VALEURS DU COEFFICIENT D'ECHANGE DE L'AIR.....		III
ANNEXE 3 : ABAQUE POUR CHOIX DU MOTEUR		IV
ANNEXE 4 : ABAQUE POUR FACTEUR DE SERVICE.....		IV
ANNEXE 5 : ABAQUE POUR CHOIX DE LA CHAINE		V
ANNEXE 6 : VUE 3D DU DISPOSITIF DE SECHAGE		V
ANNEXE 7 : PHASES DE FABRICATION DU SECHOIR		VI
ANNEXE 8 : CHAMBRE DE SECHAGE.....		VII

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau [2].	6
Figure I-2 Transfert entre l'air et la surface du produit [1].	8
Figure I-3 Transfert par conduction [2].	9
Figure I-4 séchage par convection[2].	10
Figure I-5 Séchage par rayonnement [2].	11
Figure I-6 Courbe de séchage montrant l'évolution de la teneur en eau sur base sèche, W, en fonction du temps [3].	12
Figure I-7 courbe de Krischer [4].	13
Figure I-8 Production de carotte et de navet en 2012(FAO,2013)	16
Figure I-9 Exemple de différentes variétés de carotte(FAO,2013)	17
Figure I-10 Model dominants de consommation de la carotte (FAO,2013).	17
Figure I-11 Production de la pomme (FAO,2012)	18
Figure I-12 Modèle dominant de consommation de la pomme(FAO,2013)	19
Figure I-13 Valeur nutritive de la pomme (ANPP,2014)	19
Figure I-14 Diagramme en bande extrait du classement de la production mondiale et des pays producteur de cacao pour 2011(STATISTA).	20
Figure I-15 Le cacaoyer, la feuille, la cabosse et les fèves (ONCC).	21
Figure I-16 zones de production du cacao au Cameroun (collection taer agrofor Cameroun).	23
Figure I-17 Cabosse de cacao à maturité(ONCC)	25
Figure I-18 Résultats possibles d'une fermentation non maîtrisée	26
Figure I-19 Opération de vérification de la qualité des fèves après séchage (ONCC).	27
Figure II-1 hangars de séchage [22]	33
Figure II-2 Séchoir solaire direct [23].	34
Figure II-3 Séchoir solaire indirect [22].	35
Figure II-4 séchoir mixte [23]	36
Figure II-5 Séchoir artisanal (à charbon avec soufflet) [25].	37
Figure II-6 Tambour de type direct [26].	38
Figure II-7 Sécheur flash [27].	39
Figure II-8 Sécheur à bande à courant parallèle [27].	40
Figure II-9 Séchoir à plaque à multi-étage [21].	41
Figure II-10 Sécheur rotatif à vis [27].	42
Figure II-11 Sécheur rotatif à couche mince [27].	42
Figure II-12 Sécheur à plateaux [27].	43

Figure III-1 Diagramme bête à corne	51
Figure III-2 Schéma illustratif du diagramme pieuvre	52
Figure III-3 Diagramme pieuvre ou diagramme des interacteurs.....	53
Figure III-4 Histogramme de la hiérarchisation des fonctions	57
Figure III-5 Diagramme de Pareto	58
Figure III-6 Diagramme FAST du séchoir	59
Figure III-7 Actigramme SADT [28].	60
Figure III-8 Actigramme du séchoir du niveau A0.	61
Figure III-9 Diagramme A1 du SADT	62
Figure III-10 Diagramme A2 du SADT	63
Figure III-11 Diagramme A4 du SADT	63
Figure III-12 Diagramme A6 du SADT	64
Figure III-13 Schéma du principe du séchoir proposé	65
Figure III-14 bilan énergétique de la chambre de combustion	71
Figure III-15 Modélisation du transfert de chaleur dans le séchoir cylindrique.....	72
Figure III-16 . Configuration des efforts sur le système.....	78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 Variétés de cacao sur le marché international (collection taer agrofor Cameroun).	21
Tableau I-2 <i>récapitulatif des propriétés de quelques biomasses</i> [21], [3]	30
Tableau II-1 tableau de choix de la meilleure technologie [3].	47
Tableau II-2 Séchoirs possibles pour les produits agricoles.....	48
Tableau III-1 Caractérisation des fonctions principales et de contrainte	54
Tableau III-2 tableau du tri-croisé (hiérarchisation des fonctions)	56
Tableau III-3 Effectifs cumulés croissants des différentes fonctions.....	57
Tableau III-4 Caractéristiques techniques du ventilateur de soufflage.	69
Tableau III-5 caractéristiques de quelque matériau isolant sur le marché [31]......	70
Tableau III-6 Coefficient de frottement de glissement [33].	78
Tableau III-7 Eléments du cylindre en rotation.....	79
Tableau III-8 caractéristiques techniques du moteur [34]	80
Tableau IV-1 Avant-projet d'étude de fabrication	85

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

Liste des symboles		
Symbole	Définition	Unité
M_h	Masse du produit humide	Kg
M_s	Masse du produit séché	Kg
W	Taux d'humidité	-
M_e	Masse d'eau contenu dans le produit à sécher	Kg
P_w	Pression partielle de la vapeur d'eau de l'aliment à une température θ	Pa
HRE	Humidité relative d'équilibre	-
A_w	Activité de l'eau dans le produit	-
λ	Conductivité thermique	W/m ^{°K}
h_c	Coefficient d'échange de chaleur par convection	W/m ² °K
ε_1	Émissivité du produit à traiter	-
ε_2	Émissivité de l'émetteur	-
σ	Constance de Stefan-Boltzmann	W. m ² . K ⁻¹
PCS	Pouvoir calorifique supérieur	KJ/Kg
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	KJ/Kg
X_i	Humidité initiale des fèves avant séchage	%
X_f	Humidité finale après séchage	%
G_s	Débit de séchage	Kg/cycle
ρ_p	Masse volumique de la fève après fermentation	Kg/m ³
X_a	Humidité absolue d'air ambiante	Kg/kg d'air sec
q_{air}	Débit d'air	Kg/h
T_{int}	Température à l'intérieur du séchoir	°C
T_{ext}	Température à l'extérieur de la chambre de séchage	°C
Q_e	Energie entrante dans le séchoir	KJ
Q_{st}	Energie utile pour le séchage	KJ
Q_g	Energie générée	KJ
Q_s	Energie sortante du séchoir	KJ
Q_{cond}	Energie perdue par conduction sur les parois du séchoir	KJ
S	Surface unitaire d'échange entre les deux milieux	m ²
ΔT	Variation de température	°C
C	Consommation de cabosses	Kg
mfo	Pouvoir fumigène	Kg fumée/kg combustible
ϕ	Puissance thermique	KW
T_p	Température de la plaque	°C
β	Taux de remplissage du cylindre	%
t	Durée de séchage	h
V	Volume du cylindre	m ³
n	Vitesse de rotation du cylindre	tr/min
α	Angle d'inclinaison du cylindre	Radian
C_r	Couple résistant	Nm

ω	Vitesse de rotation	rad/sec
P'	Puissance effective	KW
K_s	Facteur de service	-
N_2	Nombre de dents de la roue	-
N_1	Nombre de dents de la pignon	-
V_f	Vitesse de d'avance	mm/tr
V_C	Vitesse de coupe	m/min
f	Avance	-
d_p	Diamètre primitif	mm
Liste des abréviations		
SIGLE		
FAO	Food and Agriculture Organizations (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)	
ONCC	Office National du Cacao et du Café	
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié	
FOD	Fuel Oil Domestique	
FAST	Function Analysis System Technic	
ISO	International Organization for Standardization (Organisation Internationale de Normalisation)	

INTRODUCTION GENERALE

Le séchage des produits agricoles est un procédé très ancien de stabilisation et de conservation des aliments qui s'opère très souvent de façon traditionnelle à même le sol, sur les toits ou sur des claies au soleil naturel dans la plupart des pays d'Afrique. Mais la qualité des produits artisanaux laisse souvent à désirer sans compter qu'un conditionnement peu fiable entraîne souvent la détérioration rapide des produits séchés. De nombreuses améliorations ont déjà été apportées au système de séchage traditionnel afin de conserver les aliments le plus longtemps, d'améliorer leur qualité et de procurer ainsi des revenus d'appoints aux agriculteurs. Parallèlement, de nombreux efforts ont été déployés en Afrique et au Cameroun en particulier pour développer des techniques de séchages plus performantes que le séchage traditionnel, notamment par le développement de séchoirs écologiques à coût modéré, à usage domestique ou semi-industriel [1]. Les débouchés potentiels des produits secs sont en effet nombreux : les marchés urbains nationaux en pleine expansion et bien entendu le marché international. Dans les régions rurales où il existe peu d'opportunités de vendre les surplus des productions agricoles à bon prix et où les coûts de transport sont élevés, les produits séchés sont alors dans cette circonstance source de revenus non négligeable et la promotion du séchage écologique pourrait devenir, dans certaines conditions, un outil de développement économique pour les zones agricoles. Au Cameroun le séchage des denrées alimentaire se fait dans la plupart de temps de façon archaïque c'est-à-dire qu'on expose l'aliment au soleil pendant une période variable suivant les conditions climatiques afin d'en diminuer leur teneur en eau.

De la récolte à la commercialisation sur le marché, les cultivateurs enregistrent des pertes considérables, ces pertes peuvent être causés par la qualité des intrants (semences, engrais, pesticides...), des conditions météorologiques, de la récolte tardive et parfois le manque d'infrastructures routières pour acheminer les produits sur le marché de consommation. Le mauvais ou le non séchage des produits agricoles après récolte entraîne la dégradation de ce dernier et devient impropre à la consommation, d'où la nécessité de trouver un moyen de séchage qui ne dépendra pas des conditions climatiques, qui minimisera le temps de séchage, qui effectuera un séchage homogène, qui n'influencera pas sur la qualité et la saveur du produit agricole. La question qui nous vient à l'esprit est celle de savoir : comment sécher ces produits en un temps record sans pour autant impacter sur la qualité des produits et en valorisant également les biocombustibles ? Pour répondre à cette question nous avons pensé à la « **conception et la réalisation d'un séchoir écologique pour produits agricoles (avec séchage contrôlé calibré et dynamique)** ».

Pour mener à bien ce travail, nous le structurons en (04) chapitres,

- Le chapitre 1 traitera les généralités sur le séchage et des produits alimentaire,
- Au chapitre 2, nous allons faire une revue de la littérature sur les machines de séchage, en suite nous allons à travers une étude comparative ressortir la technologie à adopter pour la suite de notre travail,
- Dans le chapitre 3 nous mènerons une étude conceptuelle de notre équipement,
- En fin le chapitre 4 portera sur l'étude de fabrication, coûts et devis dudit séchoir.

Chapitre I GENERALITES SUR LE SECHAGE ET DES PRODUITS AGRICOLES

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, ensuite catégoriser les produits agricoles en insistant sur le principe d'obtention des fèves de cacao sèches. En fin, faire une classification des biocombustibles solides en insistant sur le leur taux de pollution.

I.1 Généralités sur le séchage

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.

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} = \frac{M_e}{M_s} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

M_h = Masse du produit humide, M_s = Masse du produit séché, W = Taux d'humidité.

I.1.2.3 Humidité relative d'équilibre

C'est en fait le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau de l'aliment à la température Θ par la pression de la vapeur d'eau saturante à la température Θ , d'où la relation :

$$\text{HRE} = \frac{P_w}{P_{w0}} * 100 \quad (\text{I.2})$$

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 .

HRE = humidité relative d'équilibre.

I.1.2.4 Activité de l'eau d'un produit

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].

$$A_w = \frac{P_w}{P_{w0}} = \frac{\text{HRE}}{100} \quad (\text{I.3})$$

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].

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 $W=f(A_w)$ ou $W=f(\text{HRE})$ 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 portant :

En abscisse soit A_w soit HRE et en ordonnée la teneur en eau du produit exprimée en g d'eau pour 100g de matière sèche (%MS) est la suivante.

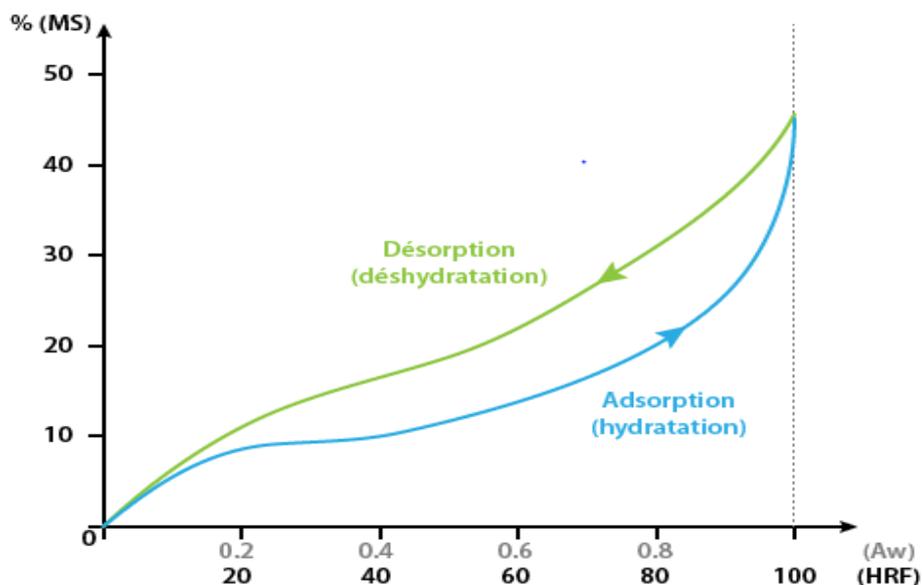


Figure I-1 Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau [2].

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 $0 < A_w < 0.2$, 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 ($0.2 < A_w < 0.6$) : 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 ($0.6 < A_W$) : Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro-capillaire constitue une phase continue [2].

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.1.4 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 déterminer toutes les propriétés de l'air telles que :

- La température de rosée
- La température du thermomètre humide
- L'enthalpie.

Il 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.1.4.1 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.1.4.2 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.1.5 Principes physiques du séchage

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

I.1.5.1 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.1.5.2 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.

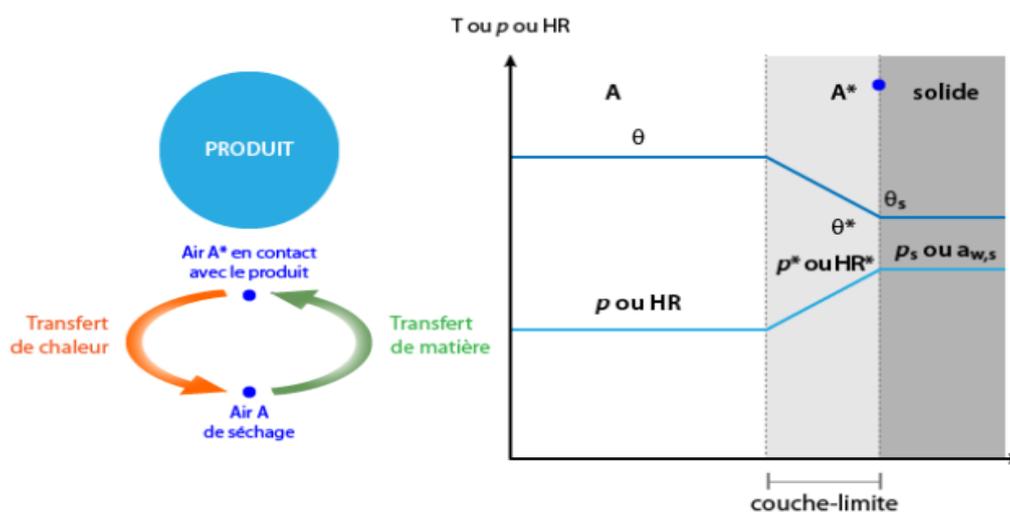


Figure I-2 Transfert entre l'air et la surface du produit [1].

I.1.5.3 Transfert de chaleur pendant le séchage

C'est un phénomène physique qui existe ou intervient entre deux systèmes lorsqu'il existe entre eux une différence de température et cela quel que soit le milieu qui les sépare. On distingue 03 types de transfert de chaleur et chacun de ces types est directement lié à un type de séchage.

➤ Séchage par conduction

Le transfert de chaleur par conduction est un transfert d'énergie due aux interactions entre les particules qui constituent le système thermodynamique. Dans le cadre du séchage, l'énergie thermique nécessaire pour le séchage est apportée par contact direct entre le produit à sécher et paroi chauffante. Le flux de chaleur est donné par la relation de Fourier [2].

$$Q = \lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (I.4)$$

Avec λ : la conductivité thermique en (W /m.k-1) ;

$\partial T / \partial x$: Gradient de température ;

T : Température exprimée en kelvin (K) ;

Q : Flux de chaleur par conduction.

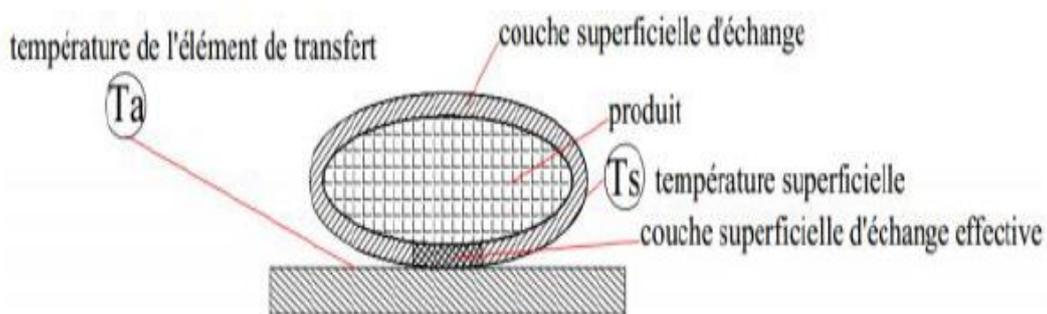


Figure I-3 Transfert par conduction [2].

➤ Séchage par convection

C'est un mode de transfert de chaleur spécifique au fluide. Il est provoqué par l'écoulement du fluide ; c'est-à-dire par le mouvement de l'ensemble des particules qui le compose. La convection peut être définie comme la composition de deux modes de chaleur :

- La conduction effectuée à l'échelle microscopique
- L'advection de nature macroscopique

Ce mode de transfert de chaleur obéit à la formule ci-dessous [2]. :

$$Q = hc (T_s - T_f) \quad (I.5)$$

Avec hc : coefficient d'échange de chaleur par convection en (W. m⁻². K⁻¹) ;

Q : densité de flux de chaleur par convection ;

T_s : température superficielle du produit à sécher en Kelvin ;

T_a : température du fluide de séchage Kelvin.

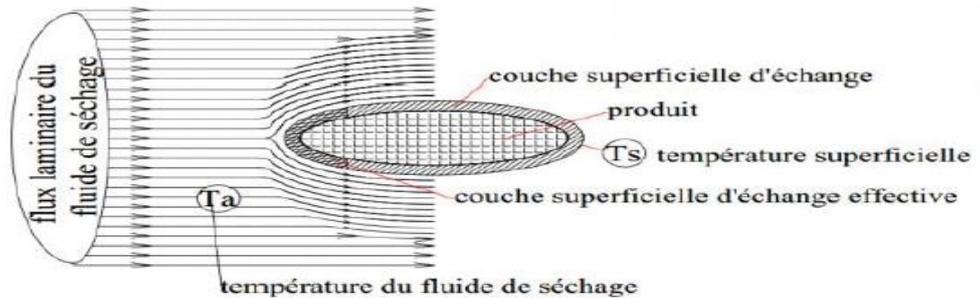


Figure I-4 séchage par convection[2].

➤ Séchage par rayonnement

L'énergie nécessaire dans ce mode de transfert de chaleur est transmise par rayonnement. Cette méthode est très efficace pour des produits non thermosensibles (carton ; viande ; tissu ; papier ; produits granulaires de faible épaisseur etc...). L'énergie est apportée aux produits à sécher par les ondes électromagnétiques générées soit par des dispositifs électroniques ; soit par élévation de température d'un émetteur infrarouge avec une longueur d'onde λ des radiations exploitées en séchage industriel comprise entre 0,4 et 10 μ m divisé en trois plages [2]. La quantité de chaleur Q (watts) transmise au produit à sécher par unité de temps est définie par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$Q = A_1 \sigma C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^n - \left(\frac{T_2}{100} \right)^n \right] \varphi \quad (I.6)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (I.7)$$

Avec T_1 : Température de la source émettrice,

T_2 : Température du produit,

A_1 : Surface du corps recevant le rayonnement,

A_2 : Surface de l'émetteur d'infrarouge,

ϕ : facteur complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit (lorsque l'émetteur entoure le produit $\phi=1$,

ε_1 : Émissivité du produit à traiter (sans dimension),

ε_2 : Émissivité de l'émetteur (sans dimension),

σ : constance de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,673 \cdot 10^{-8} \text{ W. m}^2. \text{ K}^{-1}$).

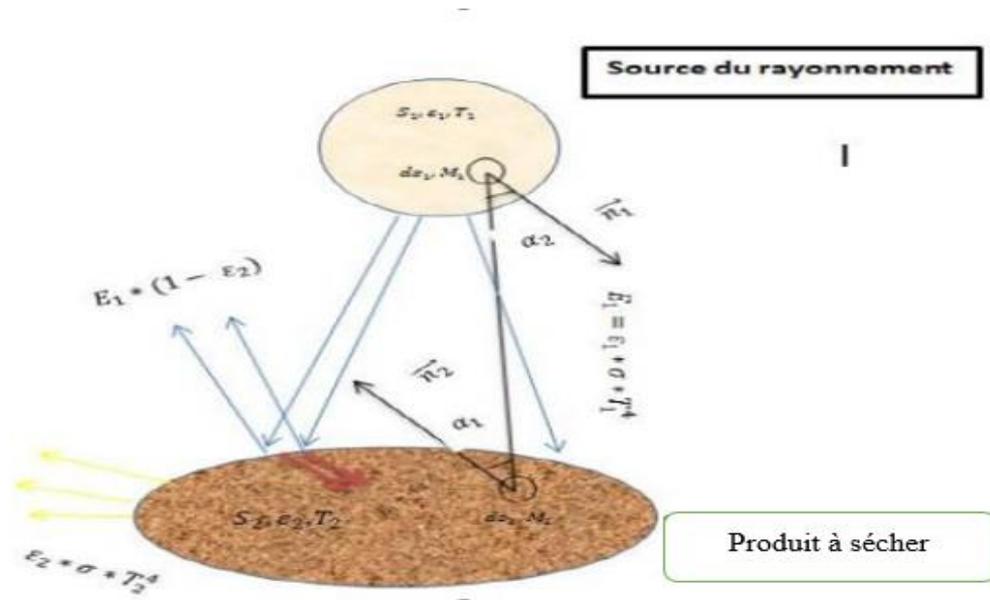


Figure I-5 Séchage par rayonnement [2].

I.1.6 Analyse de la cinétique de séchage

Les très grandes variabilités et diversités des produits alimentaires et biologiques laissent envisager que le meilleur moyen de caractériser le comportement d'un produit alimentaire au cours du séchage consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage. Dans le cas d'un produit solide séché par entraînement, l'expérience de base consiste à placer le produit dans un courant d'air parfaitement maîtrisé (température, humidité, vitesse) et à enregistrer l'évolution de sa masse au cours du temps, par des pesées à intervalle de temps réguliers [1]. Il est à noter que deux types de courbes permettent de décrire l'évolution du produit au cours du séchage.

I.1.6.1 Courbe de séchage montrant l'évolution de la teneur en eau humide sur base sèche en fonction du temps

Les dispositifs expérimentaux classiques permettent d'enregistrer la masse (M , kg) au cours du temps (t , s). On obtient alors une courbe représentant la perte de masse en fonction du temps.

Cependant, on a coutume d'utiliser la teneur en humidité du produit sur base sèche (W , kg eau /kg solide sec) et non la masse pour tracer cette **courbe de séchage** (Figure I.6).

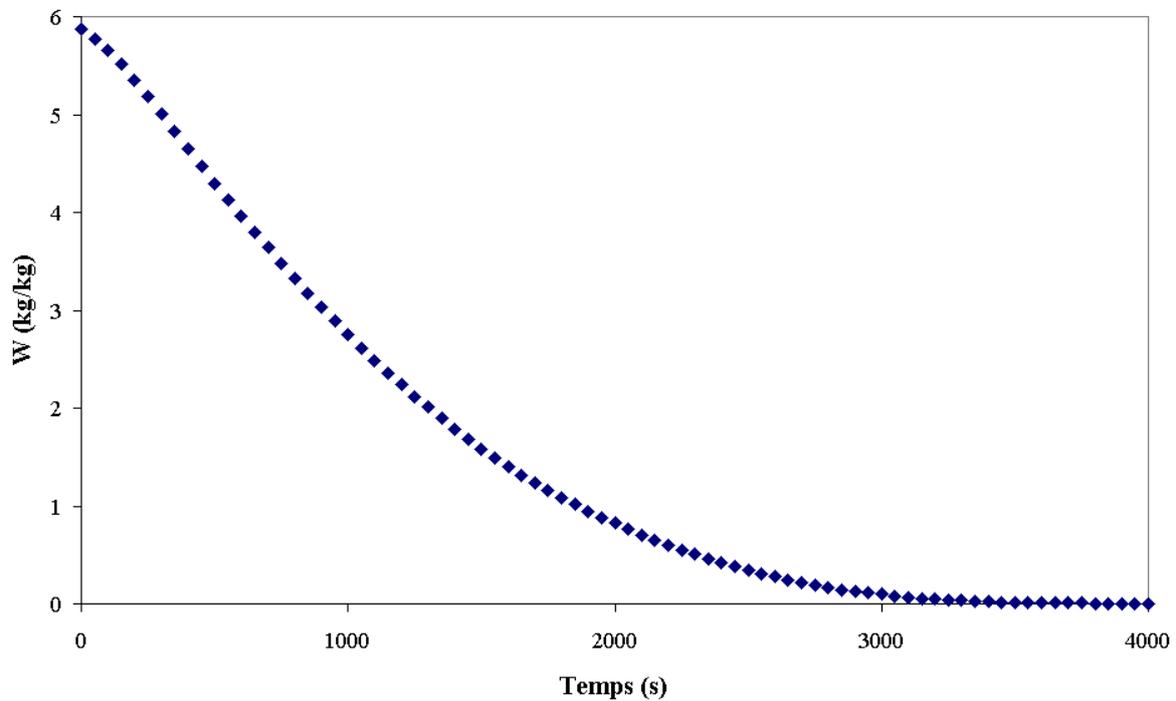


Figure I-6 Courbe de séchage montrant l'évolution de la teneur en eau sur base sèche, W , en fonction du temps [3]

I.1.6.2 Vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau sur base sèche (courbe de Krischer)

Selon l'usage, les données concernant la courbe de perte de masse $W(t)$ sont transformées afin de tracer soit la **courbe de vitesse de séchage (ou de flux matériel)**, soit la courbe dite de **Krischer** selon que le flux de séchage (F , kg/m²s) est représenté en fonction du temps ou de la teneur en eau sur base sèche. Dans le cas où le matériau est parfaitement rigide et ne subit aucune modification de sa surface, le flux peut être obtenu directement par dérivation de la courbe de perte de masse. Le flux est alors égal à la vitesse de séchage, N (kg. s⁻¹) à une constante près (Éq. I.8).

$$F = \frac{M_s}{A_0} \left(-\frac{dW}{dt} \right) = \frac{N}{A_0} \quad (\text{I.8})$$

Par contre dans le cas où le matériau humide subit un retrait, la connaissance de la surface externe ($A(W)$) de l'échantillon est nécessaire pour tracer la courbe de séchage en termes de flux (Éq. I.9).

$$F = \frac{N}{A(W)} \quad (I.9)$$

L'examen de l'allure des courbes de Krischer permet une première approche macroscopique du comportement du produit pendant le séchage. Sur la courbe schématisée présentée à la Figure I.7, on peut distinguer 3 ou 4 phases selon les cas.

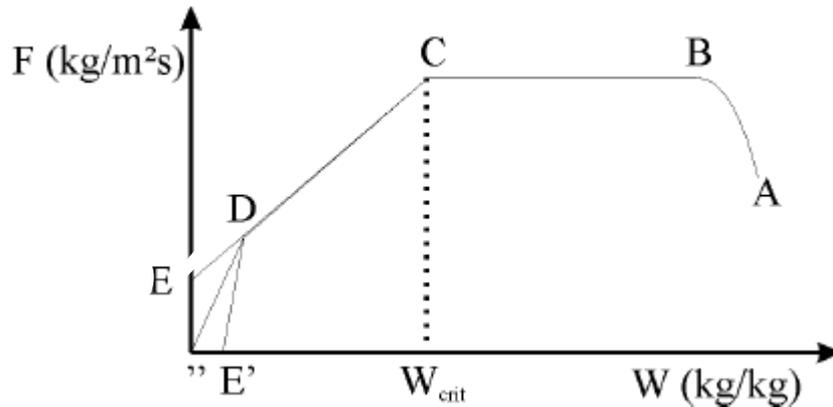


Figure I-7 courbe de Krischer [4].

- Une phase transitoire (AB).

Elle correspond à la montée en température du matériau à sécher jusqu'à atteindre la température humide correspondant à l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte vis-à-vis du temps de séchage total [5].

- Une phase à vitesse de séchage constante (BC).

Durant cette phase, la surface du produit est saturée, à cause soit de la présence en, quantité importante d'eau à la surface du produit, soit d'une diffusion rapide d'eau de l'intérieure du produit vers sa surface [6]. L'énergie apportée par la source de chaleur (l'air chauffé) est utilisée uniquement pour l'évaporation de l'eau de surface. C'est pourquoi, la température du produit reste constante et égale à la température humide de l'air chauffé. Plusieurs travaux tentent d'expliquer les phénomènes caractérisant cette phase [7]. Durant cette phase, les conditions extérieures influencent le séchage du produit tandis que, sa forme peut avoir une influence sur la vitesse de séchage [8]. Le produit atteint sa teneur en eau critique en fin de cette phase.

- Une phase à vitesse de séchage décroissante (CD).

Elle succède à la phase à vitesse constante. Elle débute du point critique atteint à la fin de la phase (BC). Durant cette phase, la surface du produit à sécher n'est plus saturée en eau. Il se

crée un front d'évaporation se dirigeant progressivement vers l'intérieur du produit. L'énergie apportée par la source de chaleur (l'air chauffé) ne sert plus uniquement à l'évaporation de l'eau du produit, mais aussi à augmenter sa température. Le potentiel d'échange (la vitesse de séchage) décroît et la température du produit augmente [9]. Une fois que l'ensemble du matériau se situe dans le domaine hygroscopique, c'est-à-dire qu'il ne subsiste plus que de l'eau liée, la seconde phase de ralentissement commence. Le séchage est terminé lorsque le solide a atteint sa teneur en eau d'équilibre dans les conditions opératoires considérées (zone D-E') [4].

I.1.7 Modélisation mathématique des transferts lors du séchage

Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles mathématiques pour décrire le phénomène de changement de la teneur en eau, du transfert de chaleur et de la masse dans le séchage. Les équations peuvent être des modèles théoriques, semi-théoriques et empiriques. Nous pouvons citer entre autres :

I.1.7.1 Modèle de Lewis

Le modèle de Lewis est la solution générale de l'équation de Fick. Ce modèle ne considère que la diffusion basée sur la migration de l'eau. Le modèle simple de Lewis est exprimé comme suit :

$$\frac{dW}{dt} = -K(W - W_e) \quad (\text{I.10})$$

Où : k est une constante de séchage, qui dépend de la température, l'humidité absolue et la vitesse de l'air ainsi du diamètre du produit utilisé [10].

I.1.7.2 Modèle de page

Page (1949) a modifié le modèle de Lewis pour obtenir un modèle plus précis en ajoutant une constante sans dimension empirique (n) et à appliquer cette approche au séchage des grains, il est formulé comme suit [11].

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \exp(-kt^n) \quad (\text{I.11})$$

I.1.7.3 Modèle Henderson et Pabis

Henderson and Pabis (1962) ont amélioré le modèle du séchage en utilisant la deuxième loi de Fick de la diffusion et en l'appliquant au séchage des grains [12].

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = A \cdot \exp(-kt) \quad (\text{I.12})$$

Où : A et k sont des constantes de séchage

I.1.7.4 Modèle Wang et Singh

Singh and Wang (1978) ont proposé un modèle empirique, pour décrire les caractéristiques de séchage du produit en fonction du temps, selon l'équation suivante [13].

$$\frac{W-W_e}{W_0-W_e} = 1 + at + bt^2 \quad (\text{I.13})$$

Où : a et b sont des constantes de séchage.

Le produit principal à sécher étant sous forme de graines, nous allons nous servir du modèle mathématique adéquat qui ici peut être le modèle de **PAGE** ou celui de **Henderson et Pabis**.

I.2 Généralités sur les produits agricoles

I.2.1 Historique

L'agriculture est un secteur clé de l'économie camerounaise qui lui assure son autosuffisance alimentaire et des devises. Elle contribue pour **22,9% au PIB** et représente en 2013 environ **23 % des exportations** totales du pays. Le secteur agricole est le premier employeur avec **62% de la population active**. Les nuances climatiques (climat équatorial, tropical humide et tropical sec) et pédologiques que l'on rencontre du nord au sud du pays engendrent un **potentiel agricole riche et très diversifié**. La gamme des produits cultivés s'étend des cultures vivrières (mil, sorgho, manioc, ignames) aux cultures d'exportation (banane, ananas, café, cacao, huile de palme, coton). Quelques cultures non traditionnelles sont apparues plus récemment (pomme de terre, oignon, haricot). Les principales cultures d'exportation sont la banane, le cacao, le café, le coton et le caoutchouc. En 2012/2013 la production nationale commercialisée de café s'est établie à 16142 tonnes à la clôture de la campagne caféière, qui a été un vrai contraste jamais observé comparativement à la production précédente (- 58%) [14].

Cette contre-performance a conduit le gouvernement à adopter en septembre 2014 un plan de relance de la filière café et de celle du cacao. Dans la suite, nous allons faire une étude sur les légumes tel que les carottes, sur les fruits en particulier la pomme et en fin sur le cacao dont sa culture reste prédominante au Cameroun et rencontre d'énormes problèmes quant à ce qui concerne la qualité des fèves une fois séchées.

I.2.2 Carottes

I.2.2.1 Description.

La carotte est une plante herbacée bisannuelle qui peut atteindre 30 centimètres de long, à racine pivotante, orange, épaisse et allongée. Les feuilles sont profondément divisées et couvertes de poils. Les fleurs blanches, de petite taille, sont regroupées en ombelles composées, inflorescence caractéristique de la famille. Ces ombelles ont de 30 à 40 rayons, généralement incurvés vers le sommet. La fleur centrale, relativement plus grande, est rouge pourpre, ce qui distingue les ombelles de carottes au premier coup d'œil. Les fleurs extérieures ont des pétales inégaux, ceux situés vers l'extérieur étant relativement plus grands pour attirer les insectes pollinisateurs. La floraison a lieu de mai à octobre.

I.2.2.2 Production

La carotte est l'un des dix légumes les plus communs et les plus consommés. En 2012, selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 36.917.000 tonnes de Carottes et de navets ont été produites dans le monde. Avec une production totale de 17 millions de tonnes, la Chine est le premier producteur et représente 45,8 % de la production mondiale, suivie par la Russie (1,6 million de tonnes), les États-Unis (1.3 million de tonnes). Environ 61,6% de la production de la carotte du monde a lieu en Asie, suivie par l'Europe (22,6%) et les Amériques (Nord, Centrale, l'Amérique du Sud et dans les Caraïbes) (9,4%). Moins de 6% de la production totale du monde se situe en Afrique (FAO, 2013).

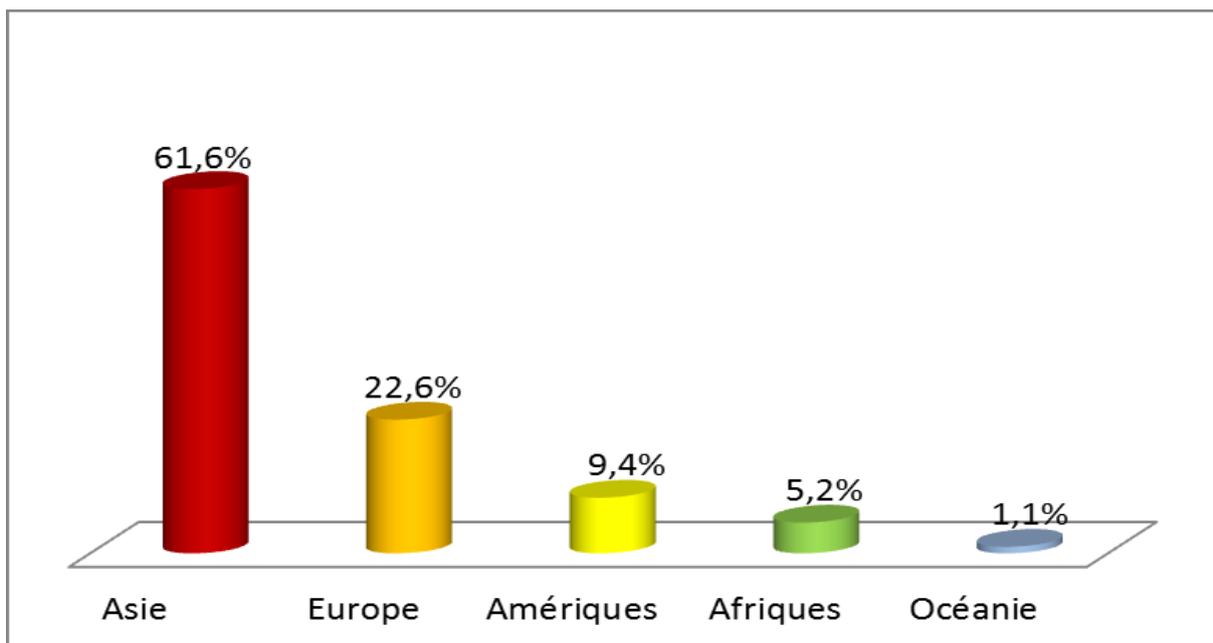


Figure I-8 Production de carotte et de navet en 2012(FAO,2013)

I.2.2.3 Variété de carotte

En 2011, plus de 500 variétés sont inscrites au catalogue européen des espèces et variétés. Les principales variétés de carottes cultivées montrent des tailles courte, de mi-longue ou longue, des formes cylindrique ou conique et des couleurs différentes (blanche, jaune, orange, rougeâtre, violette, ...).



Figure I-9 Exemple de différentes variétés de carotte(FAO,2013)

I.2.2.4 Consommation

Les carottes sont souvent consommées séchées, crue, en salade seules ou en association avec d'autres légumes comme le céleri-rave ou la betterave. Cuites, elles entrent dans la composition des potées, des soupes, des purées. Coupées en rondelles, elles accompagnent les plats en sauce. Elles servent également à faire des gâteaux ou du jus.



Figure I-10 Model dominants de consommation de la carotte (FAO,2013)

I.2.2.5 Propriétés nutritives

L'apport énergétique de la carotte jeune, crue est de 30 kilocalories pour 100 g. Elle contient 88,8% d'eau, 0,7% de protéines, 0,50% de lipides et 5,6% de sucre. Les carottes sont riches en bêta-carotène (provitamine A). La teneur moyenne en vitamine C est de 4 mg pour 100 g. Elle contient aussi toutes les vitamines du groupe B sauf la B12 [14].

I.2.3 Pommes

I.2.3.1 Description

La pomme est l'un des fruits les plus consommés dans le monde. Elle est consommée sous différentes formes, telles que les fruits frais, le jus concentré, la confiture, la marmelade et les produits secs [14]. Sa taille est très variable selon les variétés et les conditions de végétation. La peau des pommes mûres peut être rouge, jaune, verte ou rose bien que de nombreuses variétés bi-couleur ou tri-couleur existent. La chair est généralement jaunâtre-blanche ou jaune.

I.2.3.2 Production

La pomme est le troisième fruit le plus consommé au monde, après les agrumes et la banane. La Figure II.1 présente la production de pomme dans le monde en 2012. Il se récolte environ 76 millions de tonnes, dont 37 millions de tonnes en Chine et 15 millions de tonnes en Europe (FAO, 2013).

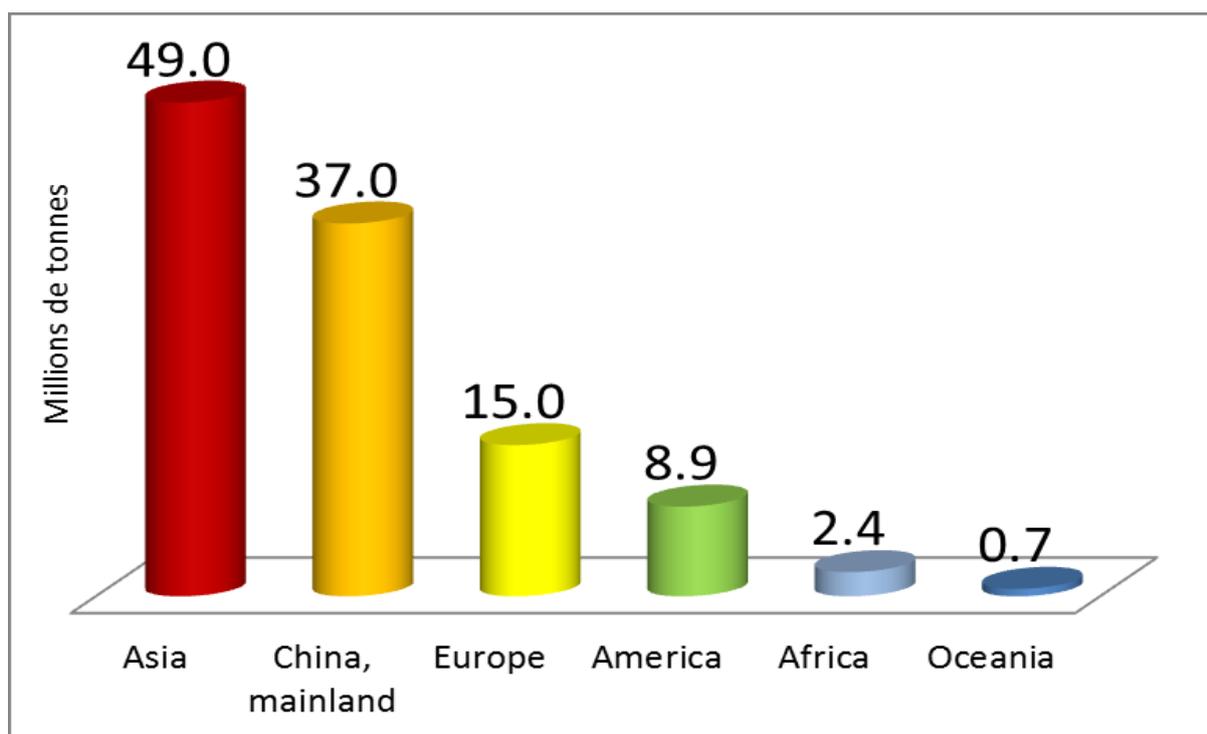


Figure I-11 Production de la pomme (FAO,2012)

I.2.3.3 Consommation

La pomme peut se manger crue ou cuite, en dessert ou en accompagnement de mets salés, en compote, en tarte, en gâteau, en gelée, en confiture, en pâte de fruit, en fruit séché ; on peut en faire du jus ou des boissons fermentées. Selon le mode de consommation le plus adapté

à la variété, on parle de « pomme de table » (ou « pomme à dessert » ou « pomme à couteau »), de « pomme à cuire » ou de « pomme à cidre ».



Figure I-12 Modèle dominant de consommation de la pomme (FAO, 2013)

1.2.3.4 Propriétés nutritives

C'est un fruit idéal pour les sportifs, les personnes qui suivent un régime alimentaire amaigrissant grâce à son effet rassasiant et sa faible teneur en calorie. Riche en vitamine C, elle en apporte 5 mg pour 100 g. Elle apporte également les vitamines B1, B2, PP, B5, B6, B9, provitamine A et vitamine E. Dans cette thèse, nous avons utilisé la pomme Golden pour nos expériences, en raison de sa large diffusion dans le monde entier. En France, c'est la pomme la plus cultivée puis qu'elle représente plus d'un tiers de la production nationale. Communément appelée « Golden », son succès vient de sa capacité à répondre au goût des consommateurs, aux exigences de la production et du commerce moderne. Toutefois, les gastronomes lui reprochent souvent son manque de goût et sa forte teneur en eau.

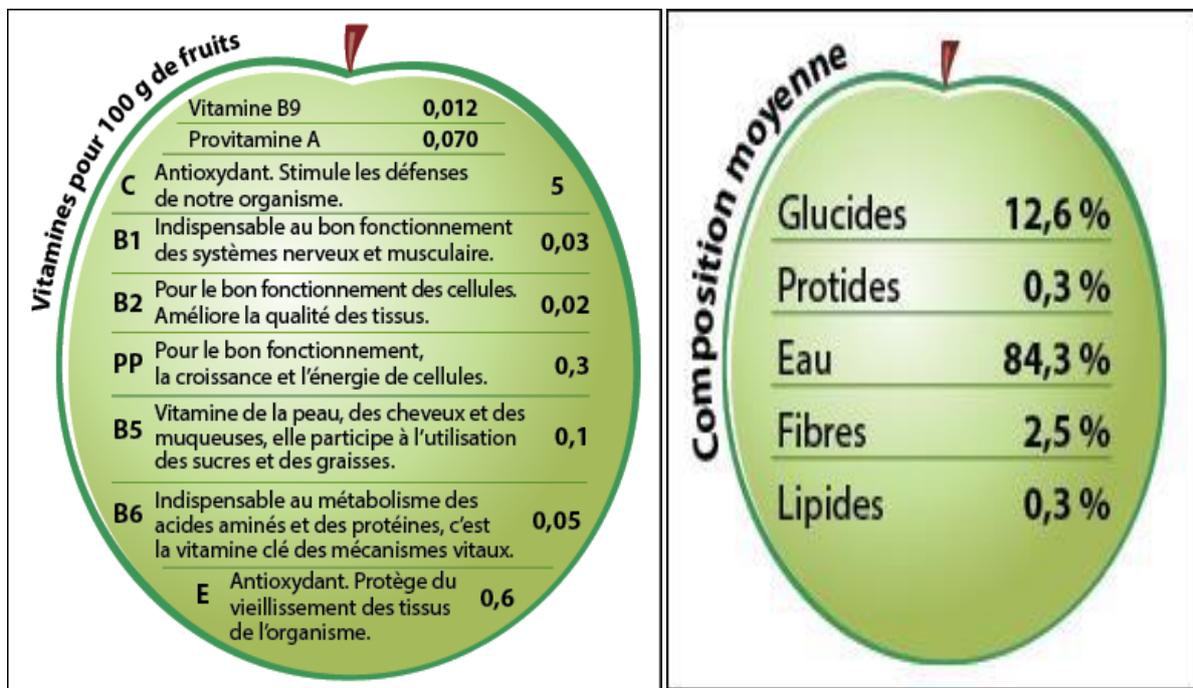


Figure I-13 Valeur nutritive de la pomme (ANPP, 2014)

I.2.4 Filières cacao au Cameroun

I.2.4.1 Généralité sur le cacao

Le cacao est le fruit qui provient d'une plante que l'on appelle dans le langage courant cacaoyer mais dont le nom botanique est (***Theobroma cacao L.***), c'est une plante à feuille persistantes cultivé en zone équatoriale où la température moyenne se situe autour de 27 degrés du fait qu'il ne supporte pas les températures trop basses [15]. Les pays qui jouissent d'un climat et d'un environnement idéaux pour la culture du cacao ont la possibilité de générer grâce à ce produit des récoltes à l'exploitation considérable, lesquelles peuvent bénéficier à leurs économies nationales de même qu'à leurs communautés [16]. L'histoire nous apprend que les premiers plants de cacao exportés du Brésil ont été plantés en Afrique occidentale vers la fin du XIXe siècle et les premiers pays bénéficiaires furent la Côte d'ivoire et le Ghana. Le Cameroun se situe en cinquième position mondiale en tant que producteur de cacao avec une production moyenne de 210 000 tonnes chaque année [15] : diagramme ci-dessous présente le classement mondial dans le secteur cacao.

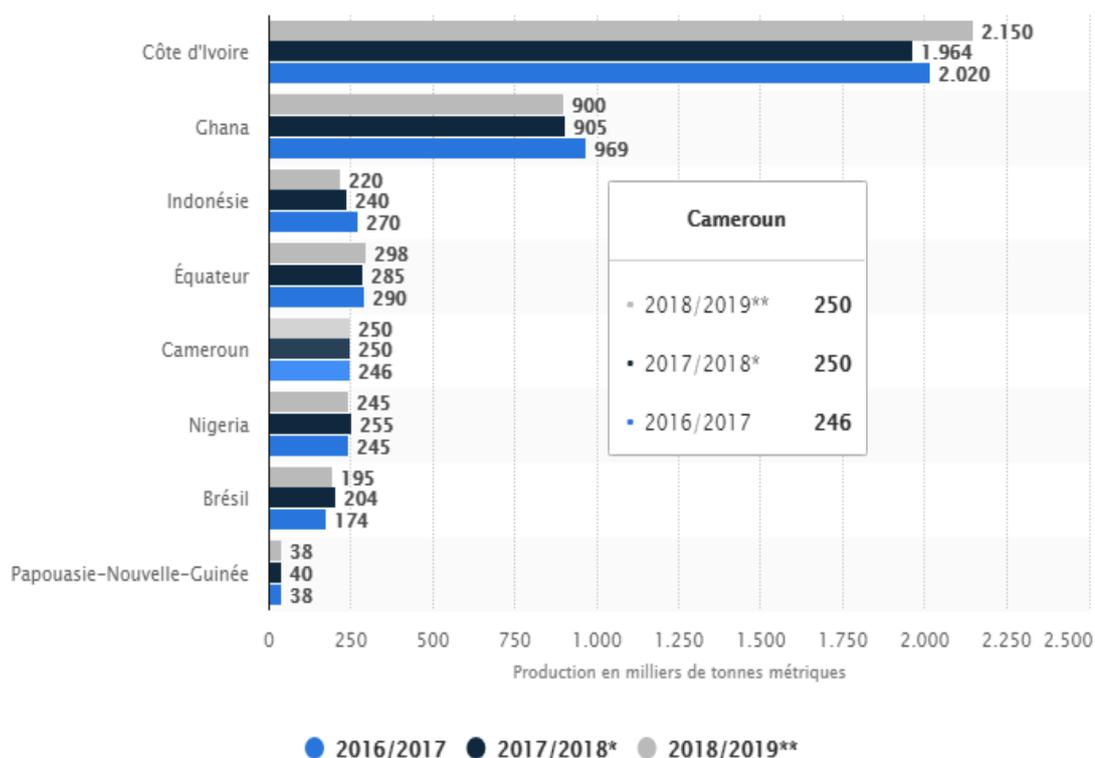


Figure I-14 Diagramme en bande extrait du classement de la production mondiale et des pays producteur de cacao pour 2011(STATISTA)

Comme nous l'avons mentionné plus haut, le cacaoyer a besoin d'un climat chaud et humide pour se développer. En général la hauteur des cacaoyers est d'en moyenne de 5m, mais lorsque ceux-ci sont abrités par des grands arbres, ils peuvent culminer jusqu'à 10m de hauteur. Un cacaoyer devient productif 4 à 5 ans après avoir été planté et peut rester productif plusieurs décennies durant. La longueur du fruit ou de la cabosse va de 15cm à 25cm et il contient entre 30 et 40 graines. Les cabosses poussent le long de la tige principale de l'arbre et sur la voute [15]. On groupe le stock mondial de cacao en trois variétés principales (**Criollo, Forastero et Trinitario, Mercedes**), à partir desquelles de nombreux hybrides ont été, et continuent d'être mis au point. Le schéma ci-dessous nous présente le cacaoyer, la feuille, la cabosse et les fèves.



Figure I-15 Le cacaoyer, la feuille, la cabosse et les fèves (ONCC)

I.2.4.2 Différentes variétés de cacao

On distingue un bon nombre de variétés de cacao sur le marché international, chacune d'entre elles ayant ses caractéristiques spécifiques, par exemple son arôme, sa masse, sa productivité et sa vigueur. Le tableau ci-dessous nous présente les trois principales familles qui règnent sur le marché.

Tableau I-1 Variétés de cacao sur le marché international (collection taer agrofor Cameroun).

Variétés et images	Description	Potentiel énergétique		
		Vigueur	Productivité	R.P. B
<p>CRIOLLO</p> 	<p>Cabosses de forme allongée, étroite et pointue, verruqueuses et marquées de sillons profonds. Croissance lente. Gout des fèves peu amères et fin, fournissent un produit de haute qualité. Ils sont progressivement abandonnés au profit des autres groupes.</p>	<p>Peut vigoureux</p>	<p>Peut productif</p>	<p>Sensible aux maladies et aux parasites</p>
<p>FORASTEROS</p>	<p>Cabosses ovales à sillons peu profonds. Ils fournissent entre</p>	<p>Très vigoureux</p>	<p>Productifs</p>	<p>Tolérant</p>

	<p>80% et 90% de la production mondiale</p>			
<p>TRINITARIO</p> 	<p>Cabosses de formes variées. Elles sont très diversifiées et hétérogènes. Elle est issue des deux variétés précédentes qui sont des hybrides, elle représente entre 10 et 15 % de la production mondiale du cacao</p>	<p>Vigoureux</p>	<p>Productifs</p>	<p>De tolérant à sensible</p>
<p>MERCEDES</p> 	<p>C'est un cacao hybride avec une cabosse de très petite taille et avec écorce très. Il offre une précocité de croissance et un rendement inégalé.</p>	<p>Très vigoureux</p>	<p>Très productif</p>	<p>Tolérant</p>

En dehors des 4 variétés citer plus haut, il existe aussi quelques variétés sélectionnées et croisées par l'IRAD (station de Yaoundé et de Nkoemvone) pour la création des divers hybrides au nombre de huit à savoir :

- ✓ SNK 109
- ✓ IMC 67
- ✓ T 79/501
- ✓ UPA 143
- ✓ T 60/887
- ✓ SNK 13
- ✓ SNK 64
- ✓ PA 7

I.2.4.3 Zone de production

Le cacao du Cameroun, qui viendrait vraisemblablement d'une souche Trinitario, est légèrement différent de la fève courante d'Afrique occidentale. Il a une casse plus rouge et une saveur plus forte. Il est généralement préféré par le secteur du pressage du cacao européen pour sa teneur en beurre de cacao supérieure à la moyenne. De plus il peut être transformé en une poudre rouge également très prisé car utilisé comme colorant et agent de sapidité dans le secteur des produits laitiers et de la pâtisserie. La culture de ce cacao est favorable dans la zone méditerranéenne qui est en général caractérisée par une longue saison des pluies (8 mois) et une courte saison sèche (4mois). La figure ci-dessous illustre cette zone.

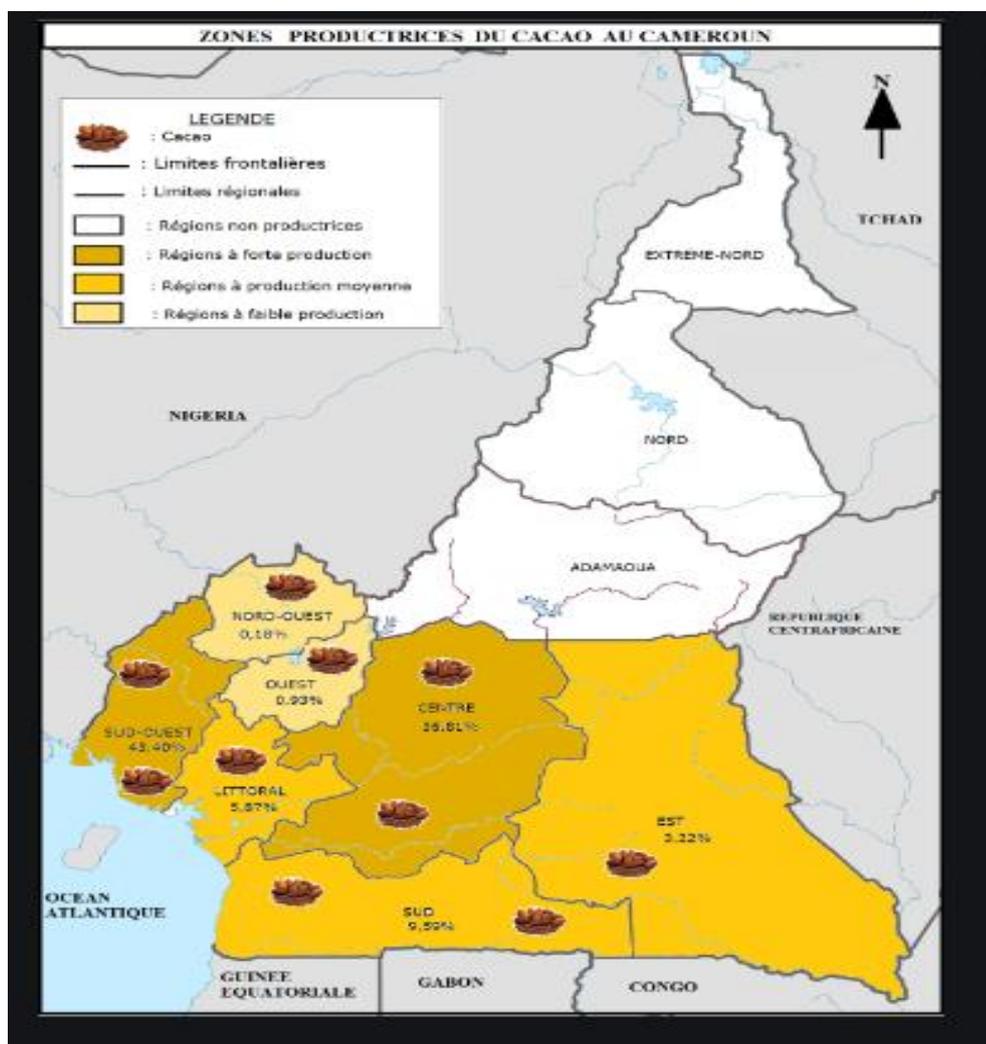


Figure I-16 zones de production du cacao au Cameroun (collection taer agrofor Cameroun).

I.2.4.4 Qualité d'un bon cacao

Il existe de nos jours des normes plus en plus strictes quant à la qualité des fèves de cacao. Celles-ci peuvent varier d'un pays à un autre. Dans certains pays comme le Cameroun, le Togo,

la Côte d'Ivoire, le principe de grade est utilisé pour classer la qualité des fèves [17]. Ce classement tient bien évidemment compte des caractéristiques définies par la norme internationale ISO 22000 qui sont :

- La couleur marron foncé ou marron claire ;
- Le taux d'humidité faible ($\leq 7.5 \%$) ;
- La qualité de fève et son goût ;
- Une teneur en HAP nulle.

Ainsi la classification du cacao en grade se fait en 03 grades suivant la teneur en humidité, le nombre de fèves indésirable que contient le stock etc. Nous avons donc :

- **Cacao de grade I :**

Il doit être composé des lots homogènes quant à la couleur et à la grosseur des fèves (pas plus de 12% des fèves ne peut avoir un poids s'écartant de plus d'un tiers en plus ou en moins du poids moyen). Il ne doit pas contenir plus de 3% de " fèves indésirables" (fèves moisies, défectueuse, de couleur ardoisée...), son taux d'humidité doit être le plus bas possible $\leq 7.5 \%$.

- **Cacao de grade II :**

Identiquement à celui de grade I, il doit être homogène quant à la couleur qu'à la grosseur des fèves. Il ne doit pas avoir plus de 4% de fèves moisies, plus de 8% de fèves ardoisées, ni plus de 6% de fèves défectueuses, son taux d'humidité $\leq 7.5 \%$.

- **Hors standard :**

Il s'agit du cacao qui ne répond pas aux normes des grades I et II. C'est généralement le résultat soit de la mauvaise maturité des cabosses, soit de la mauvaise fermentation, ou encore du mauvais séchage et stockage.

Pour ainsi obtenir un cacao de Grade I, il est important de prendre des précautions particulières depuis la récolte jusqu'au stockage en passant par la fermentation et le séchage pour l'exportation ou pour son utilisation locale.

I.2.4.5 Etapes d'obtention des fèves sèche après sa maturité

ETAPE 1 : la récolte

Dans la plupart des pays la récolte se fait deux fois par ans. La principale à la fin de la première saison de pluie, et la seconde au cours des premiers mois de la suivante. Elle se fait toute l'année dans les régions très humides, sans saisonnalité marquée par des pluies. Les cabosses sont alors cueillies à intervalle réguliers de 10-15 jours. La cueillette à lieu exactement

à maturité (on choisit sur chaque arbre les cabosses qui sont mure, car elles ne le sont pas très souvent toutes au même moment). En effet une récolte tardive entraîne des risques de pourritures et de germination. Une récolte précoce diminue le rendement : les graines immatures, mélangées avec des graines mûres, donnent à la récolte une saveur désagréable réduisant ainsi leur valeur marchande. La maturité s'apprécie :

- A la couleur des cabosses : les jeunes cabosses sont vertes ou rouges ; elles deviennent jaunes ou oranges avec le temps.
- Au son mat que les cabosses émettent lorsqu'elles sont légèrement frappées.



Figure I-17 Cabosse de cacao à maturité(ONCC)

Après la cueillette il faut trier les cabosses, mettre de côté celles malformées ou attaquées par des maladies comme la pourriture brune ensuite regrouper les bonnes cabosses à un endroit de préférence où aura lieu la fermentation puis passé à l'écabossage.

ETAPE 2 : l'écabossage

Elle est la première opération post-récolte et elle consiste à fendre la cabosse pour en retirer les fèves. De nos jours l'ouverture des cabosses est encore faite de façon manuelle. Elle se fait soit directement au champ, soit sur des lieux de traitements post-récolte après transport des cabosses. Pour fendre ces cabosses il est préférable d'utiliser des gourdins car l'utilisation des instruments tranchants (couteaux, machettes) peuvent blesser les graines. Pendant l'écabossage il faut jeter (le placenta) trier et éliminer les fèves qui sont décolorées, atteintes de maladie, cassées, plates ou qui ont germé. Les fèves fraîches ainsi obtenues ont une humidité de 65% à 75% et un poids spécifique de 900kg/ m³. Elles sont gluantes en raison du mucilage qui les entoure. La séparation de fèves entre elles et l'élimination des débris favorisent une bonne fermentation.

ETAPE 3 : la fermentation

Une bonne fermentation est importante parce qu'elle a pour but d'éliminer une grande partie de la pulpe qui entoure les graines, de supprimer le pouvoir germinatif et de développer

les précurseurs d'arômes [18] Elle provoque des modifications biochimiques au sein des cotylédons tel que : le gonflement, la disparition de la couleur initiale remplacée par la couleur brune caractéristiques du cacao, le développement des précurseurs d'arômes, la réduction du goût amer et de l'astringence. Elle permet également d'amorcer la déshydratation des grains. La forme physique de la graine reste conservée (non aplati). Cette opération s'effectue dans des caisses en planche pouvant contenir 350 à 450 Kg de fèves pas plus pas moins, ou à même le sol en plaçant les feuilles de bananier ou de plantain au sol. Le principe est que la chaleur puisse être conservée dans la caisse et que l'eau coule pendant la fermentation, elle peut durer de 3 à 4 jours et commence au plus tard 24h après l'écabossage car plus elle est effectuée rapidement meilleur sera le cacao. Lorsque cette fermentation n'est pas maîtrisée on peut aboutir aux différents cas de figures ci-dessous.

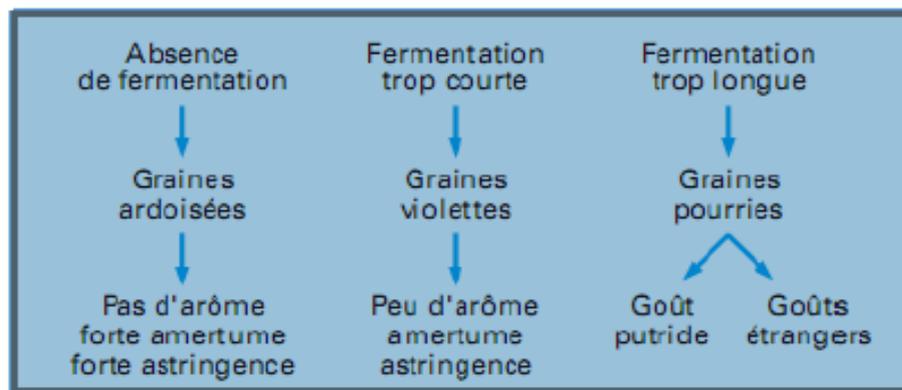


Figure I-18 Résultats possibles d'une fermentation non maîtrisée

ETAPE 4 : Séchage

Comme on l'a dit le séchage consiste à éliminer une grande partie de l'eau que les fèves contiennent de façon à permettre sa bonne conservation et favoriser sa transformation ultérieure, ou à faciliter son transport, l'opération de séchage de cacao intervient après la fermentation, pour débarrasser les fèves de l'humidité demeurant. Mettre les graines à sécher stoppe la plupart des réactions fermentaires ; cependant certaines continuent d'avoir lieu, en particulier celles dû à la polyphénoloxydiase responsable du brunissement du produit. Rappelons que les fèves fraîches, représentent 25% en poids de la cabosse et que les fèves sèches représentent 44% en poids des fèves fraîches ; donc 20 à 25 cabosses (8 à 10 kg) donneront 2kg à 2,5kg de fèves fraîches qui, après séchage à 7%, représentent environ 1kg de fèves sèche [17].



Figure I-19 Opération de vérification de la qualité des fèves après séchage (ONCC)

ETAPE 5 : Le stockage

Le bon stockage du cacao consiste à :

- Après le séchage, calibrer les fèves suivant leur qualité, leur granulométrie.
- Mettre les fèves de qualité uniforme dans des sacs propres.
- Stocker les sacs dans un endroit sec et bien ventilé.
- Se rassurer que le lieu de stockage ne suinte pas et que l'eau de pluies ne coule pas le long des murs.
- Se rassurer que les sacs ne soient pas en contact direct avec le sol.
- Ne jamais stocker les sacs près du feu ou dans un endroit où on fait la cuisine.

I.3 Généralités sur les combustibles écologiques

I.3.1 Définition

Dans la combustion (qui est une réaction d'oxydoréduction exothermique), le comburant est l'oxydant tandis que le combustible est le réducteur. Les combustibles sont des produits dont la combustion en présence d'air dans les brûleurs, foyers, fours ou chaudières fournit de l'énergie thermique. Celle-ci est utilisée dans le secteur domestique et commercial (chauffage, cuisine, parfois éclairage), dans l'industrie (apport de chaleur dans les réactions chimiques endothermiques, production de vapeur et d'électricité), ou encore dans l'agriculture (séchage des récoltes).

Les combustibles se répartissent en trois grandes catégories selon leur état physique dans les conditions standard de température et de pression. On distingue ainsi :

- ✓ les combustibles solides (charbon, bois, paille, résidus des récoltes...);
- ✓ les combustibles liquides (GPL, FOD, fioul lourd et produits assimilés), tous issu du pétrole brut et parfois, pour une très faible part, de la biomasse (dérivés d'huiles végétales);
- ✓ les gaz combustibles, le gaz naturel constituant, à lui seul, une source d'énergie primaire importante.

Nous dirons d'un séchoir qu'il est écologique lorsqu'il fonctionne de manière à limiter ou réduire les émissions à effet de serre.

I.3.2 Effet de serre et gaz à effet de serre

I.3.2.1 Définition

L'effet de serre est un phénomène naturel provoquant une élévation de la température à la surface de notre planète. Indispensable à notre survie, ce fragile équilibre est menacé. Les activités humaines affectent la composition chimique de l'atmosphère et entraînent l'apparition d'un effet de serre additionnel, responsable en grande partie du changement climatique actuel [19].

I.3.2.2 Principaux gaz à effet de serre

Comme gaz à effet de serre, nous pouvons lister les principaux à savoir [19] :

- ✓ La vapeur d'eau qui est responsable à elle seule de la grande majorité de l'effet de serre naturel. Elle a également un effet de rétroaction important sur le changement climatique
- ✓ Le dioxyde de carbone, ou CO_2 , dont la concentration peut augmenter du fait de processus naturels comme les éruptions volcaniques et les feux de brousse mais aussi du fait des activités humaines avec l'utilisation de carbone fossile (pétrole, gaz naturel et charbon notamment pour l'industrie) qui sont responsables de l'essentiel de l'augmentation de sa concentration depuis 1750.
- ✓ Le méthane est un gaz à effet de serre bien plus puissant que le CO_2 , mais moins concentré. Il est souvent lié aux processus de fermentation (marécages, décharges, digestion des ruminants, etc.).
- ✓ Le protoxyde d'azote N_2O , appelé également « gaz hilarant », est émis naturellement par les sols et provient notamment de l'utilisation d'engrais azotés.

I.3.3 Caractéristiques et choix du combustible écologique

Nous allons dans le cadre de notre travail valoriser les biocombustibles solides qui ont les avantages tels que :

- ✓ Source d'énergie abondante et renouvelable
- ✓ Son utilisation pour la production d'énergie permettrait de diversifier les sources d'énergie et de réduire notre dépendance à l'égard des combustibles fossiles.
- ✓ Peut être converti en différentes formes d'énergie
- ✓ Participe au traitement et à la destruction des déchets organiques

I.3.3.1 Propriétés de la biomasse

Les combustibles biomasses possèdent des propriétés physico-chimiques relativement différentes selon leur origine et leur provenance. On peut les caractériser par [20]. :

- Un taux de matière volatile élevé, typiquement entre 70 et 80%,
- Un PCS (pouvoir calorifique supérieur), il s'agit de l'énergie dégagée par la combustion du bois en récupérant la chaleur latente de la vapeur d'eau produit par la combustion. Il est déterminé par la formule suivante :

$$P_y = \frac{(4,1868 * E) * (T_m - T_i + c) - (a + b)}{M} \quad (\text{I.14})$$

Dans laquelle :

E = équivalent en eau du calorimètre de la bombe, de leurs accessoires et de l'eau introduite dans la bombe
 Ti = température initiale en degrés Celsius, Tm = température maximale en degrés Celsius, a = correction nécessitée par la formation des acides, b = correction nécessitée par la chaleur de combustion du fil d'allumage, c = correction de température nécessitée par l'échange de chaleur avec l'extérieur. Celle-ci est nulle si on utilise la jaquette adiabatique,
 M = masse de la prise d'essai en gramme

- Un PCI (pouvoir calorifique inférieur) sec autour de 500kWh/tonnes à 5% près : qui est la quantité de chaleur maximale fournie par une unité de masse de combustible sec lorsque l'eau formée par la combustion demeure à l'état vapeur. Il se calcule par convention selon la formule suivante :

$$PCI = P_y - 6 * 4,1868 * H_1 \quad (\text{I.15})$$

Où : PCI en joules par gramme, H_1 étant la teneur en eau totale du combustible sec à l'air en pourcentage

- Un taux de cendres également variable selon le type de biomasse, exprimé en pourcentage en masse est donné par la formule :

$$A = \frac{(m_3 - m_2) * 100}{m_2 - m_1} \quad (I. 16)$$

Où : m_1 est la masse de la nacelle en grammes, m_2 est la masse de la nacelle et de l'échantillon en grammes, m_3 est la masse de la nacelle et des cendres en grammes.

- La vapeur d'eau produite par la combustion.
- La granulométrie qui représente la répartition en classe de la taille des particules composant un combustible. Elle est déterminée par tamisage.
- Une humidité variable selon le type de produit (plus le combustible est humide plus le PCI est faible)
- Une densité relativement faible,
- Une teneur massique en carbone comprise entre 36 et 51%,
- Une teneur massique en azote généralement faible (0.1 à 0.4 %),
- Une teneur en soufre très faible.

I.3.3.2 Quelques biomasses et leurs caractéristiques

Nous allons ici faire un récapitulatif de quelques biomasses avec leur caractéristique sous forme de tableau.

Tableau I-2 récapitulatif des propriétés de quelques biomasses [21], [3]

CARACTERISTIQUES	COMBUSTIBLES			
	Cabosses de cacao	Sciure de bois	Morceaux de bois	Epi de maïs
Humidité	7,15	9,88	7,35	7,48
PCI(Kj/Kg)	16,85	12,13	16,17	14,8
PCS(Kj/Kg)	18,08	13,47	17,54	18,1
Carbone (%)	42,98	47,29	47,09	46,7
Hydrogène (%)	4,85	5,05	5,46	5,21
Azote (%)	0,24	0,16	0,38	0,34
Origène (%)	32,32	37,00	37,97	35,66
Soufre (%)	0,180	0,15	0,20	0,19

Chapitre II REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES SECHOIRS ET ETUDE CRITIQUES DES SOLUTIONS

Il est question dans ce chapitre de recenser les types de séchoirs existants, décrire brièvement leur mode de fonctionnement, présenter leurs limites, faire une étude comparative entre ceux existant et enfin faire le choix de la solution à adopter pour la suite de notre étude.

II.1 TYPES DE SECHOIRS

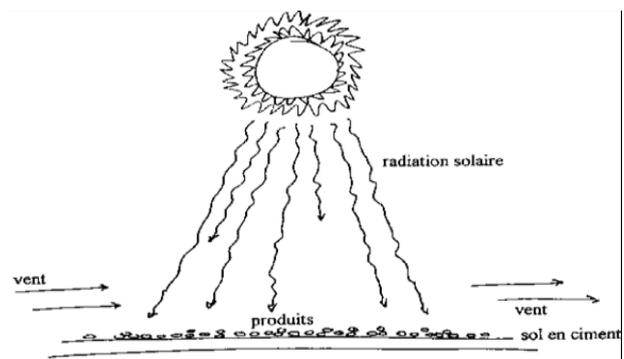
En fonction de la source de chaleur, on distingue plusieurs types de séchoirs à savoir :

II.1.1 Séchoirs solaires

On peut classer les séchoirs solaires suivant la façon dont ils utilisent le rayonnement solaire, nous avons donc : les séchoirs naturels, les séchoirs directs et les séchoirs indirects.

I.1.1 Séchoirs naturels

Ils utilisent directement le soleil et l'air, dont l'action n'est ni particulièrement favorisée, ni contrôlée. Le produit est réparti sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé à même le sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant. Certains le pratique également sur du goudron. Cette méthode empirique intéresse la plupart de produits récoltés (fruits, céréales, légumes, poissons...) [3].



Séchage dans un village au centre Cameroun (ONCC).

Avantages :

- Mise en œuvre facile ;
- Ils sont très bon marché ;
- Débit important ;
- Séchage homogène.

Inconvénients :

- Main d'œuvre importante ;
- Durée de séchage très long ;
- Risque de moisissure élevé ;
- Intensité lumineuse très variable ;
- Dégradation du produit par des intempéries et les nuisibles (rats, insectes, poussières)
- Destruction de vitamines A et C par l'exposition direct au soleil.

II.1.1.1 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 II-1 hangars de séchage [22]

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.1.1.2 Séchoirs solaire direct

On pourrait dans cette terminologie noter un « abus » car le mot « direct » signifie que les rayons solaires arrivent sans détournement ou modification de leurs propriétés sur le produit, or il n'en est pas ainsi. En effet, le dispositif d'un séchoir solaire direct est équipé d'une vitre qui non seulement protège les aliments contre les éventuelles agressions extérieures mais aussi amplifie le rayonnement reçu [3]. Il apparait déjà là une nette différence avec la méthode classique. A noter cependant que ce mode de séchage dépossède également le produit de ses

vitamines et éléments nutritifs du fait de l'exposition aux ultra-violets, les aliments perdent ainsi de leur goût, de leur couleur et de leur saveur. La ventilation est irrégulière car non contrôlée pose également des problèmes quant à la qualité des produits séchés.



Figure II-2 Séchoir solaire direct [23].

Avantages :

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

Inconvénients :

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

II.1.1.3 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.

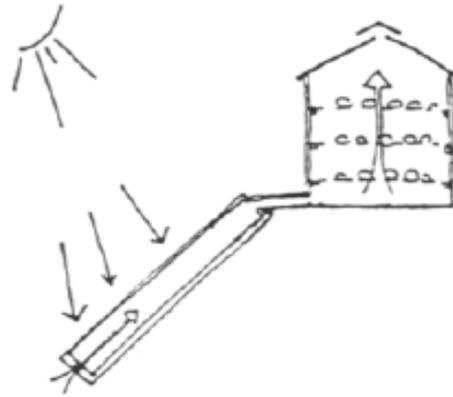


Figure II-3 Séchoir solaire indirect [22].

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.1.1.4 Séchoir mixte

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.



Figure II-4 séchoir mixte [23]

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

II.1.2 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.1.2.1 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].

a. Séchoir artisanal (à charbon avec 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(claies)

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.



Figure II-5 Séchoir artisanal (à charbon avec soufflet) [25].

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.

b. Séchoir rotatif (ou à tambour)

Ledit sécheur est constitué d'un long cylindre rotatif horizontal ou légèrement incliné pour faciliter le déplacement du solide (1 à 2.5 m de diamètre et une dizaine de mètres de longueur). Il peut fonctionner à Co-ou contre-courant. Un système d'**extrusion** ou de **granulation** divise le solide à l'entrée. L'air chaud circule à la surface de la boue pendant que le sécheur est en rotation. L'intérieur du tambour est muni d'organes divers assurant le brassage et la progression du solide dans le four. Il peut s'agir d'un jeu d'ailerons, de fléaux et de palettes ou de chicanes, ou bien encore d'un rotor interne qui malaxe la boue.

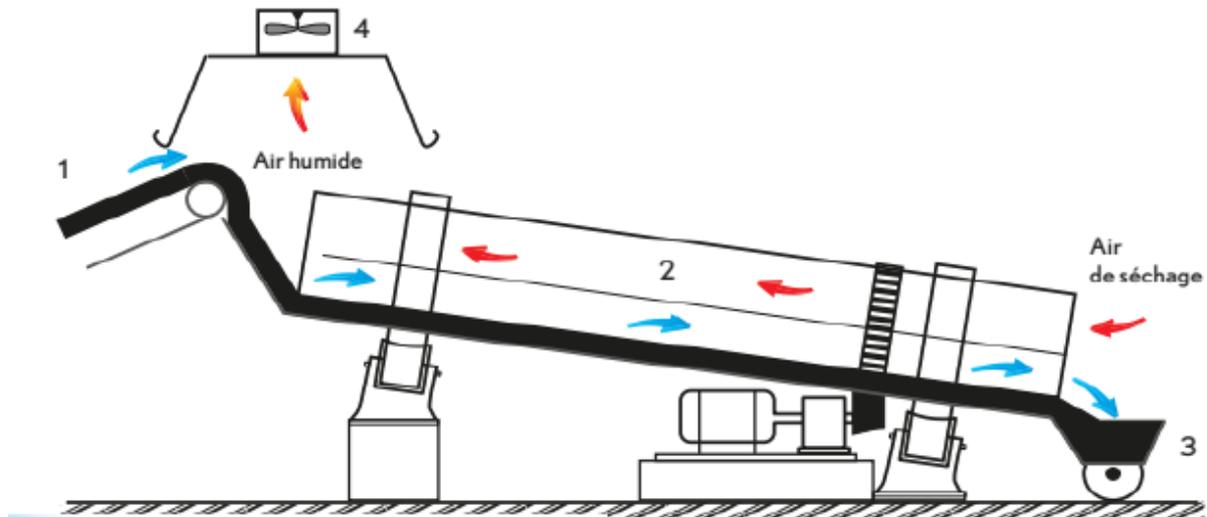


Figure II-6 Tambour de type direct [26].

1. Entrée du produit humide ; 2. Léchage d'air chaud ; 3. Sortie du produit sec ;
4. Extraction bouées.

Avantages :

- Injection d'air à co-courant ou à contre-courant ;
- Séchage homogène ;
- Débit de séchage élevé ;
- Faible main d'œuvre ;
- Entrée libérée par des spirales ;
- Simplicité de la technologie.

Inconvénients :

- Consommation énergétique considérable ;
- Cout de réalisation de l'équipement très élevé ;
- Risque d'altération de la forme, de la texture et des qualités nutritionnelles et organoleptiques du produit ;
- Complexité des périphériques.

c. Sécheur pneumatique, dit sécheur flash

L'agent séchant assure à la fois l'apport en énergie et le transport de la boue. La forme la plus simple de ce type de sécheur est un tube vertical dans lequel la boue **granulée** est séchée en étant maintenue en suspension dans l'air chaud. Le séchage est donc effectué à co-courant. Si les particules de boue ont tendance à adhérer aux parois du sécheur ou sont trop pâteuses, une partie du solide sec est recyclée à l'entrée et mélangée au produit humide pour améliorer les caractéristiques de séchage de celui-ci. La séparation du solide sec et du mélange air/vapeur à la sortie du sécheur est assurée par des cyclones ou des filtres à manches.

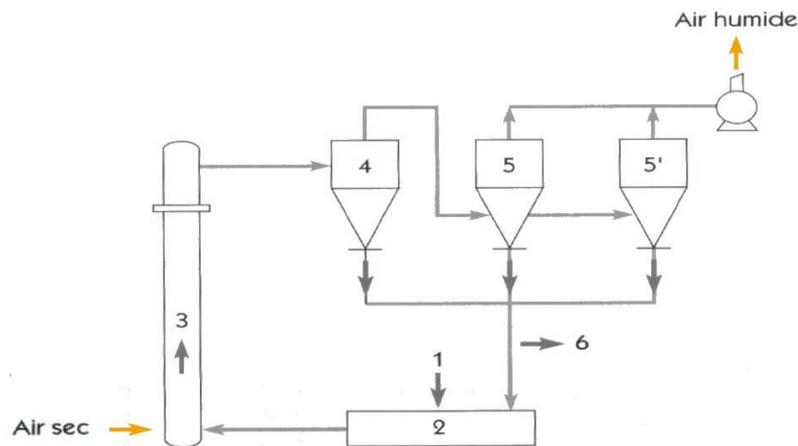


Figure II-7 Sécheur flash [27].

1. Entrée du produit humide ; 2. Mélange du produit humide et du produit sec ; 3. Zone d'entraînement du produit ; 4. Cyclone ; 5 et 5'. Filtres ; 6. Sortie du produit sec.

Avantages :

- Peu encombrant ;
- Simplicité de la technologie ;
- Absence de pièces en mouvement ;
- Faibles temps de séjour ;
- Peu de sensibilité à la siccité initiale.

Inconvénients :

- Complexité des périphériques ;
- Risque de contamination du produit si l'air de séchage n'est traité ;
- Risques d'explosions ;
- Onéreux.

d. 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.

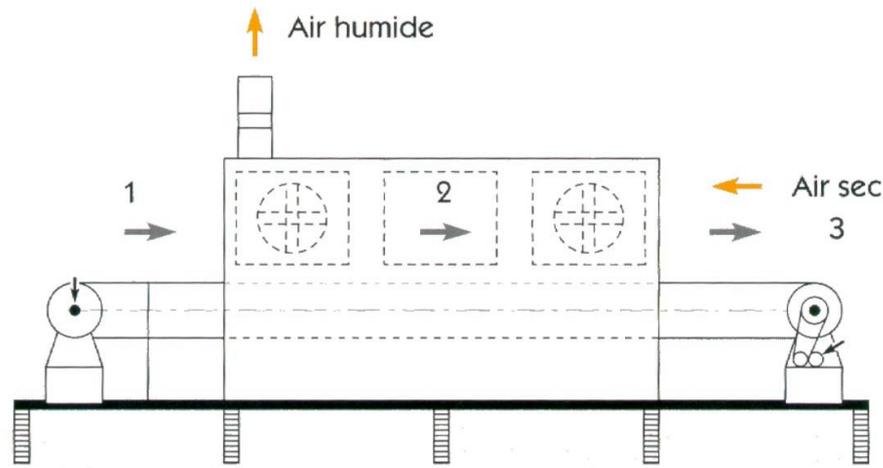


Figure II-8 Séchoir à bande à courant parallèle [27].

1. Entrée du produit humide ; 2. Produit en

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.

défilement ; 3. Sortie du produit sec.

e. Séchoir à plateau à multi-étage statique

C'est séchoir vertical constitué de claies rectangulaires, superposées en étages et sur lesquelles on dispose les fèves de cacao. La chaleur préalablement produite dans la chambre de combustion et est acheminée au niveau des chambres de séchage. Il est principalement composé de trois (03) parties : la chambre de combustion, la conduite d'air chaud et la chambre de séchage. Une fois les fèves séchées, l'extraction se fait en faisant ressortir les claies afin de récupérer les fèves. Ce dispositif est également équipé de capteurs de température de vitesse et du vent, informant l'opérateur via un afficheur qui se charge de régler ses paramètres si nécessaires.

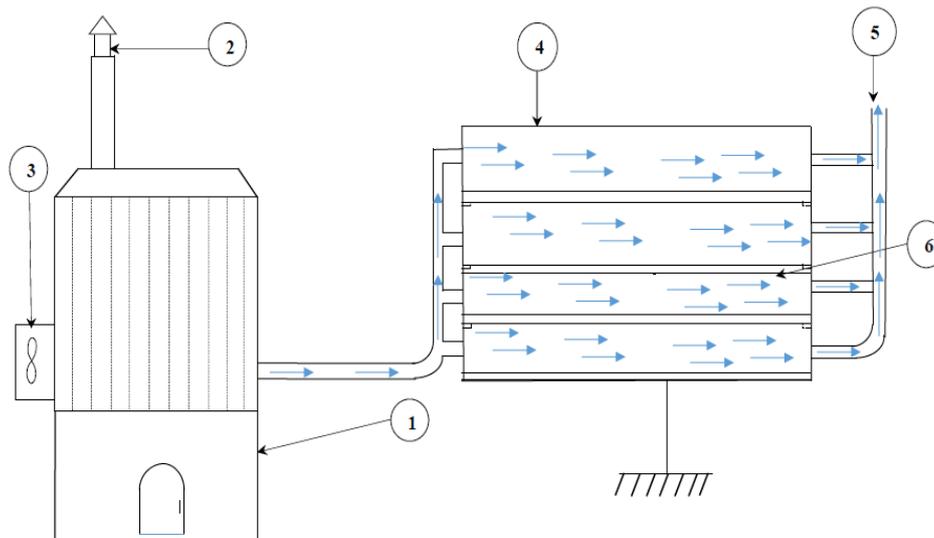


Figure II-9 Séchoir à plaque à multi-étage [21].

1- chambre de combustion, 2-cheminée d'évacuation des fumées, 3-ventilation, 4- chambre de séchage, 5-collecteur, 6-claies

Avantages :

- Bonne qualité du produit séché ;
- Peu encombrant ;
- Simplicité de la technologie ;
- Mise en forme aisée.

Inconvénients

- Séchage non homogène ;
- Risque de contamination du produit car l'air chaud n'est pas au préalable traité ;
- Répartition non homogène du flux d'air chaud ;
- Durée de séchage très longue.

II.1.2.2 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 sècheurs directs, l'enceinte de séchage est sophistiquée alors que les périphériques sont plus simples.

a. Séchoirs rotatifs

Le sècheur agité à vis ou à palettes (Figure II.10) et le sècheur à couche mince (Figure II.11) sont qualifiés de sècheurs rotatifs. Les sècheurs agités sont constitués d'un cylindre horizontal comportant un rotor creux qui est chauffé de manière interne par un fluide thermique ou des gaz chauds. En surface, le rotor est muni d'éléments concentriques (ailettes, tubes, disques creux et palettes), qui assurent le transfert de chaleur vers le produit.

- Cas des sécheurs à vis, l'arbre muni de palettes est remplacé par une ou deux vis en rotation.

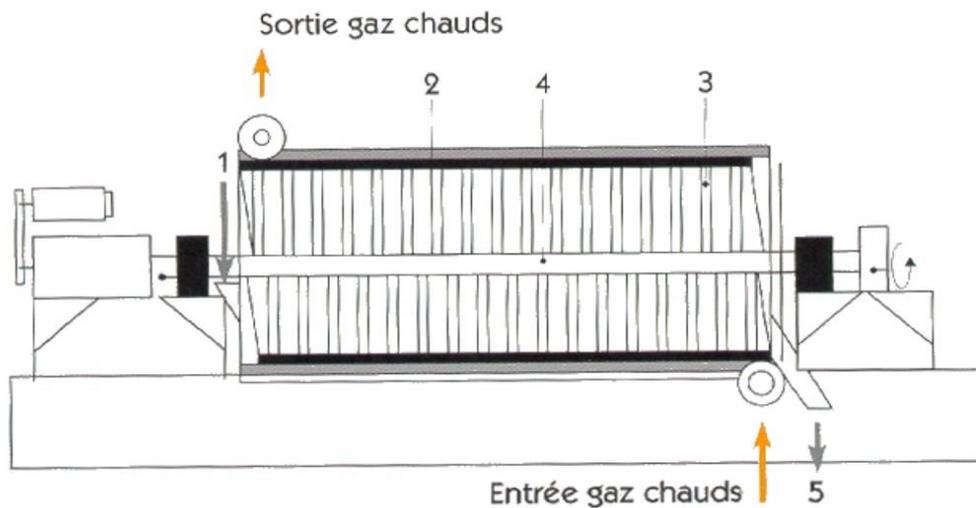


Figure II-10 Sécheur rotatif à vis [27].

1. Entrée du produit humide ; 2. Double enveloppe ; 3. Palette ; 4. Arbre creux ; 5. Sortie du produit sec.

- Cas des sécheurs à couche mince, le rotor n'est pas chauffé mais est muni d'éléments qui vont **morceler** et projeter la boue sur la surface interne du sécheur qui est chauffée.

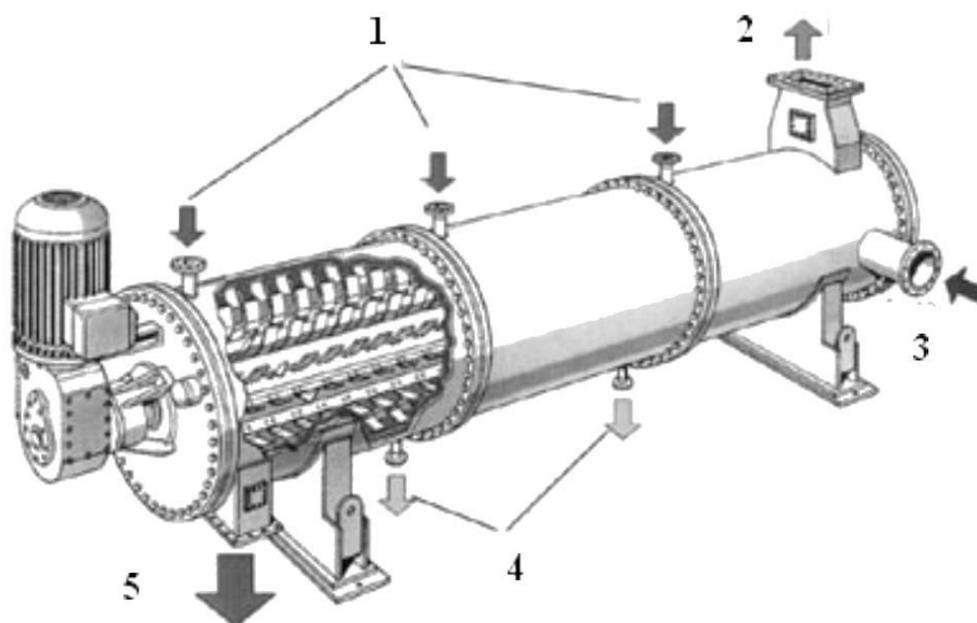


Figure II-11 Sécheur rotatif à couche mince [27].

1. Entrée de la vapeur dans la double enveloppe ; 2. Sortie de la vapeur dégagée ; 3. Entrée du produit humide ; 4. Sortie des condensats ; 5. Sortie du produit sec.

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 ;
- Le produit à sécher est protégé contre les insectes et parasites ;
- Le séchage est uniforme car le produit n'est pas statique.

Inconvénients :

- Durée de séchage très longue ;
- Technologie complexe ;
- Onéreux ;
- Nécessité d'une surveillance attentive ;

b. 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.

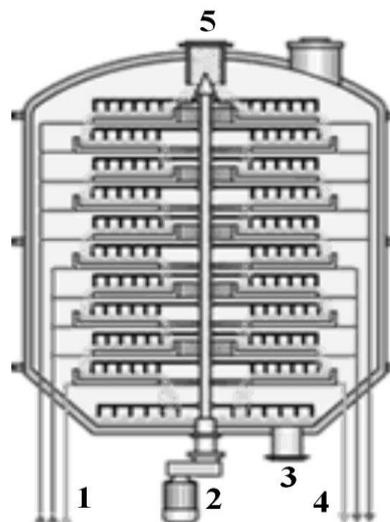


Figure II-12 Sécheur à plateaux [27].

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.

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 ressource humaine.

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 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.2.1 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 :

- ❖ Le fait qu'il existe plus de 400 types de séchoirs dans la littérature et plus de 100 sont commercialisés couvrant jusqu'à 50 000 produits différents à sécher [3] ;
- ❖ 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 pression d'exploitation quant à elle peut varier de quelque fraction de millibar à **25atm** ;
- ❖ 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 ;
- ❖ L'environnement.

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. Le défi de l'ingénieur concepteur est donc de pouvoir trouver parmi toute cette panoplie de technologie de séchage celle qui est la plus appropriée à un produit particulier.

II.2.2 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. Toutefois il est important de noter que ces méthodes ne donnent pas les caractéristiques complètes du séchoir mais plutôt le type de technologie de séchage adéquat et les autres caractéristiques et composantes seront à déterminer par le concepteur.

Extract 1 est un exemple de ces techniques pour le choix de la technologie. Il s'agit en fait d'un tableau qui est très souvent exploité pour déterminer quelle technologie de séchage est le mieux adapté à un type de produit, nous utiliserons donc celui-ci pour le séchage des produits agricoles. Dans les colonnes du dit tableau sont portées les caractéristiques essentielles du produit à sécher et au niveau des lignes nous retrouvons les différentes technologies de séchage. L'intersection entre une ligne quelconque et une colonne quelconque peut se trouver soit :

- ✓ Une étoile (*) veut tout simplement dire que la caractéristique en question est typique pour ce genre de technologie ;
- ✓ Un trait (-) stipule que la caractéristique n'est pas très considérée pour ce type de technologie ;
- ✓ Un vide () qui lui veut dire que la caractéristique n'est pas exploitée par un type particulier de technologie.

Ainsi pour pouvoir exploiter ce tableau, voici les étapes à suivre :

1. Noter toutes les caractéristiques essentielles et non essentielles du produit à sécher comme nous pouvons le voir dans le tableau ci-dessous ;
2. Encercler toutes les étoiles en dessous des caractéristiques non essentielles (tel que la colonne liquide). Sans bien-sûr nuire à la généralité, nous avons décidé de colorier plutôt ces étoiles en rouge ;
3. Encercler tous les traits et les espaces vides en dessous des caractéristiques non essentielles ou essentielles lorsqu'il y a ambiguïté sur la caractéristique du produit (ce ne fut pas le cas chez nous) ;
4. Regrouper toutes les technologies de séchage qui sont coloriées en rouge en vue d'obtenir le meilleur système de séchage pour le produit donné ;

A partir du tableau ci-dessous on peut recenser les technologies en fonction du nombre d'étoile colorié en rouge.

Tableau II-1 tableau de choix de la meilleure technologie [3].

TYPE DE SECHOIR	CARACTERISTIQUES DU PRODUIT											
	Forme physique		Humidité initiale			Dimension			Taux de séchage		Humidité finale	
	Solide	Liquide	Pâteuse	Moyenne ou grande	Sensible à la chaleur	Petite	Moyenne ou grande	Grande résistance mécanique	Faible	Modérée ou rapide	Petite	Modérée
Séchoir Solaire	★			—			★		★	—	—	★
Séchoir artisanal	★		—	—	★	★	★	—		★	★	
Séchoir à pulvérisation		★		★	★	—	—			★		
Séchoir à convoyeur	★		—	★	—		★	—	★	★	★	—
Séchoir à plateau	★	★		★	—		★	★	★		★	—
Séchoir rotatif à tambour	★	★		—			—	★	★	—	★	
Séchoir pneumatique	★	—	★		★	—		★	★		★	—
Séchoir à vis	★			★	—		★		★	★		★
Séchoir à couche mince	★		★	★	—	★	★	—	★	★	★	★

Tableau II-2 Séchoirs possibles pour les produits agricoles

Nombre d'Etoiles colorées en rouge	Technologie de séchage
1	Séchoir solaire, séchoir à plateau, séchoir à tambour
2	Séchoir à convoyeur, Séchoir à vis, séchoir pneumatique
3	Séchoir artisanal, séchoir à pulvérisation
4	Séchoir à couche mince
5	

On a ainsi 03 technologies ayant été encadrées soit 03 technologies adéquates pour le séchage de nos produits alimentaires (graines) à savoir : le séchoir solaire, séchoir à tambour, le séchoir à plateau.

Le séchoir solaire est une technologie traditionnelle et ne peut être utilisé à l'échelle industrielle vu les inconvénients de ladite technologie. Etant donné que nous voulons dimensionner un séchoir industriel, il ne nous reste plus que le séchoir à plateau et le séchoir à rotatif à tambour. Nous choisissons donc comme référence de la technologie à mettre sur pieds pour notre séchage, le séchoir à tambour rotatif car moins onéreux par rapport au séchoir à plateau.

Chapitre III ETUDE DE CONCEPTION

Il est question pour nous dans ce chapitre de faire une analyse externe suivi d'une analyse interne de notre séchoir, 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 [28].

L'analyse fonctionnelle est généralement constituée de la phase d'énonciation du besoin, suivi de la validation, caractérisation, hiérarchisation et valorisation des fonctions du produit permettant d'élaborer le diagramme FAST. C'est également elle qui permet d'élaborer le cahier de charge fonctionnel.

III.1.1 Saisie du besoin

Suite à une croissance de la filière cacaoyère dans le secteur agricole, et aux vues de l'importance du cacao de par sa valeur nutritionnelle et dans l'industrie pharmaceutique, un grand nombre de personnes (entreprises ou particuliers) investissent de plus en plus dans ce secteur. La qualité du produit devient donc un atout majeur pour rivaliser avec la concurrence notamment un bon séchage (qui est ici l'un des véritables traitements du produit avant sa transformation). Or ces personnes, particulièrement en Afrique ne possèdent pas pour la plupart de dispositifs de séchage approprié et la pratique se fait encore de façon traditionnelle. D'où la nécessité pour nous de mettre sur pieds une machine qui permettra de sécher le cacao avec un temps de séchage optimal et à la sortie un produit de qualité.

III.1.2 Enoncé 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 : l'entreprise, l'utilisateur

- ✓ Sur quoi le produit agit-il ?
- Réponse : produits agricoles humides (le cacao humide).
- ✓ Dans quel but ?
- Réponse : sécher les produits agricoles (fèves de cacao).

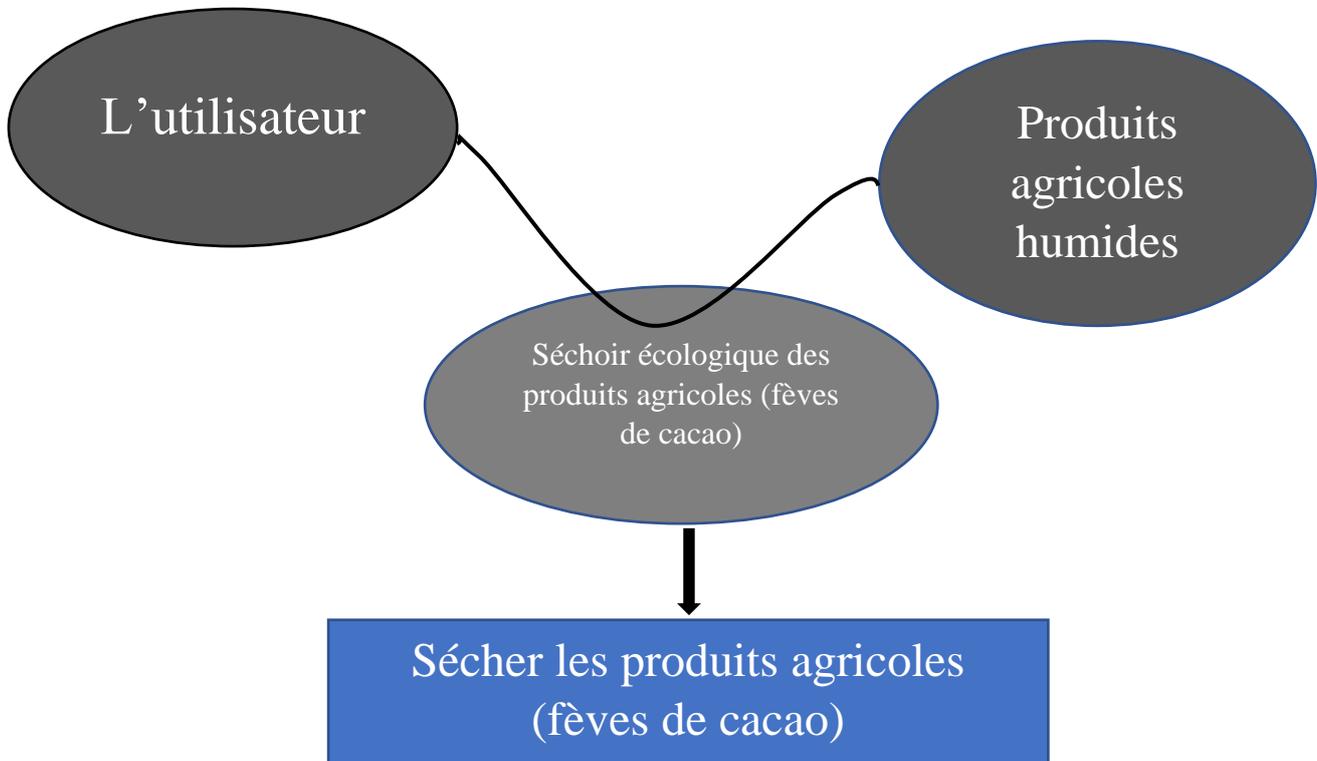


Figure III-1 Diagramme bête à corne

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 construire un séchoir des produits agricoles existe-il ?
- **Réponse :** Le séchage des produits agricoles actuellement se fait encore de façon artisanale au Cameroun. La qualité du séchage ne peut donc être garantie, de plus ce séchage se fait généralement sur des longues durées et dans des conditions climatiques pas toujours favorables.
- ✓ Qu'est ce qui pourrait le faire disparaître ?
- **Réponse :** si dans un premier temps il arrive qu'il n'y ait plus de nécessité de sécher les produits agricoles (le cacao), nous n'aurions plus besoin d'une machine ou d'un système

pour séchage. La disparition de la filière cacao au Cameroun peut également être un facteur qui entrainera la disparition du besoin de concevoir un séchoir de cacao.

- ✓ Qu'est ce qui pourrait le faire évoluer ?
- **Réponse :** si des réformes sont mises sur pieds par le gouvernement camerounais pour améliorer ou valoriser la filière agricole, nous aurons une hausse de la production qui signifie plus de produit à sécher. Les exigences relatives à la qualité du produit séché prévu par les normes et réglementations peuvent également être des facteurs encourageant la construction de plus de séchoir industriel et encore plus performant.

III.1.4 Identification des fonctions

Les fonctions de services décrivent la valeur d'un produit en définissant une action du produit répondant à un besoin ou une attente de l'utilisateur [28]. Elles se décomposent très souvent en fonctions principales, complémentaires et de contraintes.

L'outil qui est très souvent utilisé pour identifier toutes les fonctions de service est le diagramme pieuvre.

III.1.4.1 Diagramme pieuvre

C'est le graphe des interacteurs ; il permet de mettre en relation des éléments du milieu environnant qui se trouve en situation d'interagir avec le produit. Il se présente très souvent sous cette forme

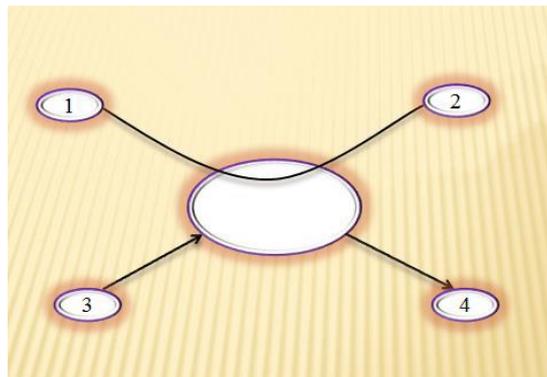


Figure III-2 Schéma illustratif du diagramme pieuvre

Le principe de lecture est comme suit : le produit est en relation avec certains composants du milieu extérieur repérés 1, 2, 3 ou 4. Il crée une ou des relations entre 1 et 2. Il doit s'adapter à 3 et il agit sur 4 [28].

Pour notre machine nous obtenons le diagramme ci-dessous :

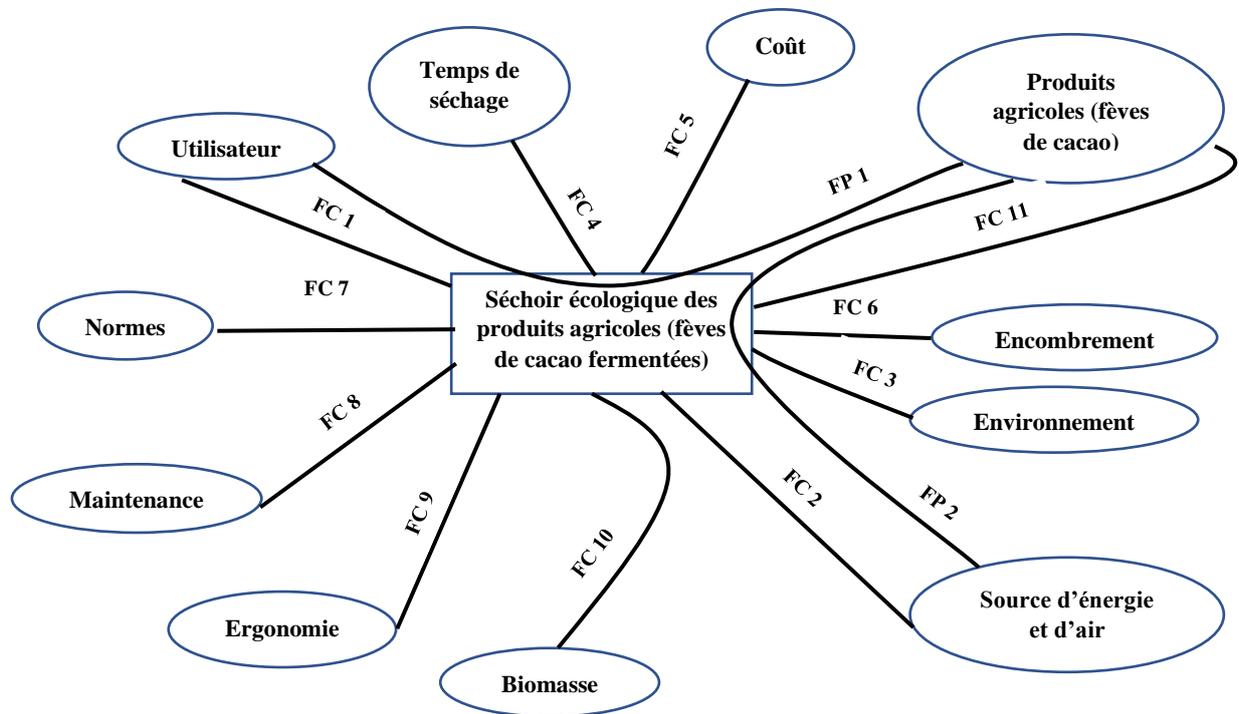


Figure III-3 Diagramme pieuvre ou diagramme des

Ainsi donc nous pouvons recenser comme fonction de service :

- FP1 : Permettre à l'entreprise ou l'utilisateur de sécher les produits agricoles (cacao) de façon dynamique ;
- FP2 : Utiliser la biomasse de cacao comme combustible ;
- FC1 : Afficher en temps réel les paramètres de fonctionnement de la machine (réglables par l'utilisateur) ;
- FC2 : S'adapter à la source d'énergie disponible ;
- FC3 : Ne pas dégrader le milieu environnant ;
- FC4 : Avoir un temps de séchage optimal ;
- FC5 : Être de faible coût ;
- FC6 : Être de dimension optimale.
- FC7 : Respecter les normes de qualité, de sécurité et de conception ;
- FC8 : Être facilement maintenable.
- FC9 : Être ergonomique ;
- FC10 : Produire l'énergie calorifique nécessaire au séchage des fèves de cacao ;

- FC11 : Avoir un produit agricole respectant les normes de séchage.

III.1.4.2 Caractérisation des besoins

La nécessité de cette étape est due au fait que c'est elle qui 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 [29].

Tableau III-1 Caractérisation des fonctions principales et de contrainte

REPERE	FONCTION	CRITERE	NIVEAU	FLEXIBIITE
FP1	Sécher les fèves de cacao fermenté. Et assurer la qualité selon la Norme	Taux d'humidité final et la qualité de fèves. Gout de fumé.	Entre 5 et 7%. Inexistant.	F0
FP2	Utiliser l'air et la chaleur.	Débit d'air entrant quantité de chaleur fournit -température -vitesse	$\leq 55 \text{ }^\circ\text{C}$ $< 0,6\text{m/s}$	F0
FC 1	Afficher en temps réel les paramètres de Fonctionnement de la machine (réglables par l'utilisateur)	Taux d'humidité des fèves : Température dans le séchoir : Vitesse de l'aire : Paramétrage/réglage : Simplicité d'utilisation : Manuel d'utilisation :	Relatif Absolu Relatif Absolu Absolu	F0 F0
FC2	S'adapter à la source d'énergie disponible pour alimentation des organes annexes	Tension électrique. Intensité du courant.	200-320 V 10-20 A	F1
FC3	Ne pas dégrader le milieu environnant	Intensité sonore Pollution	$< 60\text{db}$ $< 3 \%$	F1

<i>FC4</i>	Avoir un temps optimal de séchage	Capacité de séchage	2 tonnes en 15 heures	F1
<i>FC5</i>	Être de coût optimal	Prix de mise en œuvre	<1.500.000fcfa	F2
<i>FC6</i>	Être de dimension optimale.	Encombrement	$\pi * R^2 * H$ (3.14*0.75 ² *3) m ³	F3
<i>FC7</i>	Respecter les normes	Normes mécanique et électriques		F2
<i>FC8</i>	Être facile à maintenir	Système démontable (boulonnage ; vis)	70%	F2
<i>FC9</i>	Être ergonomique	Adaptabilité des conditions d'utilisation		F1
<i>FC10</i>	Produire l'énergie calorifique nécessaire au séchage des fèves de cacao	Quantité : Température : Pouvoir calorifique :	2000 watts 1300°C 16.85 à 18.08 KJ/Kg	F1
<i>FC11</i>	Ne pas être dégradé par le produit	Corrosion (Matériau inoxydable :	80%	F0

Légende :

F0 : niveau impératif (flexibilité nulle). **F1** : niveau peu négociable. **F2** : niveau négociable.

F3 : niveau très négociable.

III.1.4.3 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 :

Tableau III-2 tableau du tri-croisé (hiérarchisation des fonctions)

FP1	FP2	FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	FC6	FC7	FC8	FC9	FC10	FC11	Poids	%tage
FP1	FP1/1	FP1/1	FP1/2	FP1/2	FP1/2	FP1/3	FP1/3	FP1/3	FP1/2	FP1/3	FP1/2	FP1/1	25	20,33
	FP2	FP2/1	FP2/2	FC3/2	FP2/1	FP2/2	FP2/3	FP2/3	FP2/3	FP2/2	FP2/2	FP11/1	19	15,45
		FC1	FC2/1	FC1/0	FC4/1	FC1/0	FC1/1	FC1/1	FC1/1	FC1/2	FC10/2	FC11/2	5	4,065
			FC2	FC3/2	FC4/1	FC2/1	FC2/2	FC2/0	FC2/1	FC2/1	FC10/1	FC2/0	6	4,878
				FC3	FC3/2	FC3/2	FC3/2	FC3/2	FC3/3	FC3/3	FC3/2	FC3/2	22	17,89
					FC4	FC4/2	FC4/0	FC4/0	FC4/1	FC4/1	FC4/0	FC11/2	6	4,878
						FC5	FC5/1	FC5/1	FC5/1	FC5/2	FC10/1	FC11/3	5	4,065
							FC6	FC7/2	FC8/2	FC6/1	FC10/1	FC11/3	1	0,813
								FC7	FC7/1	FC7/1	FC10/1	FC11/2	4	3,252
									FC8	FC8/1	FC10/1	FC11/2	3	2,439
										FC9	FC10/1	FC11/2	0	0
											F10	FC11/2	8	6,504
												FC11	19	15,45
												TOTAL	123	100

Légende :

0 : niveau égale

1 : niveau légèrement supérieur

2 : niveau moyennement supérieur

3 : niveau nettement supérieur

➤ **Histogramme des fonctions**

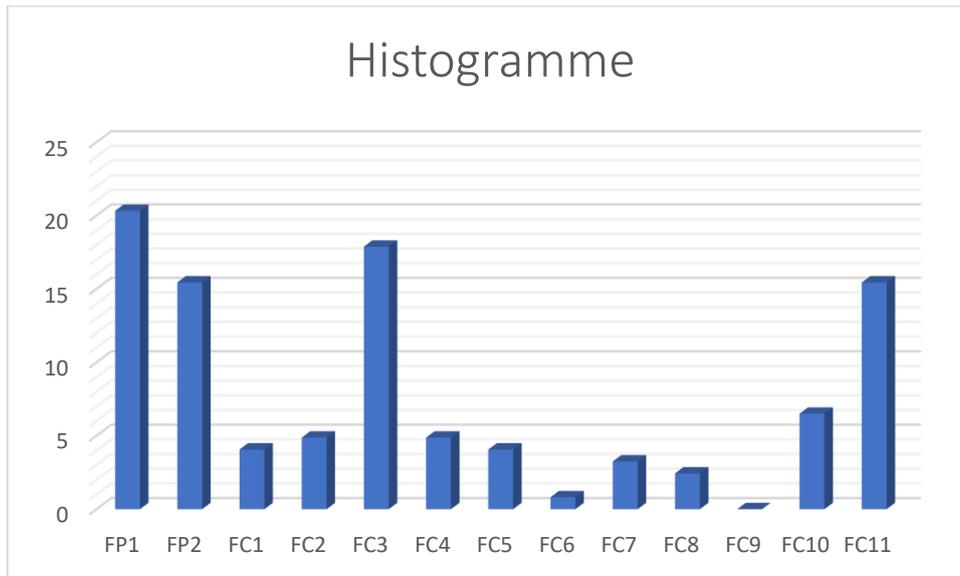


Figure III-4 Histogramme de la hiérarchisation des fonctions

➤ **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 séchoir suivie de la fonction FC3 qui incarne en son sein le volet écologique de notre séchoir. Les fonctions FP2 et FC11 occupant la troisième position montre bien que faire de la qualité reste un souci majeur direct dont le dispositif en dépend.

➤ **Diagramme de Pareto**

Tableau III-3 Effectifs cumulés croissants des différentes fonctions

Fonction	FP1	FC3	FC11	FP2	FC10	FC2	FC4	FC1	FC5	FC7	FC8	FC6	FC9
Poids	25	22	19	19	8	6	6	5	5	4	3	1	0
%tage	20,33	17,89	15,45	15,45	6,504	4,878	4,88	4,07	4,07	3,252	2,44	0,813	0
%cumulé	20,33	38,21	53,66	69,11	75,61	80,49	85,4	89,4	93,5	96,75	99,2	100	100

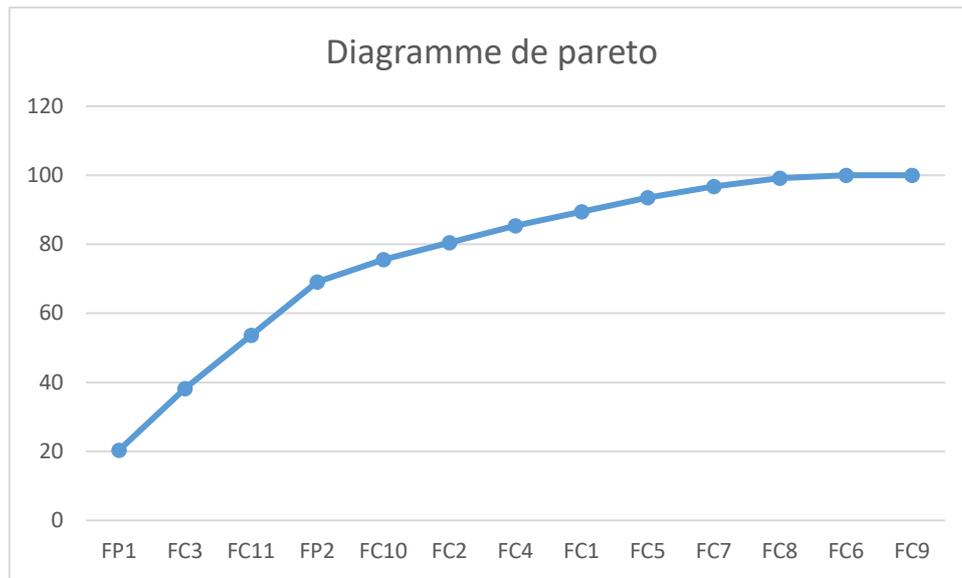


Figure III-5 Diagramme de Pareto

➤ **Interprétation du diagramme de Pareto**

Zone A : croissance rapide ; 30,76 % des fonctions de services à savoir FP1, FC3, FC11 et FP2 représentent 69,11 % 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 ; 76,82 % des fonctions de service à savoir FC10, FC2, FC4, FC1, FC5, FC7 et FC8 représentent 30,06% du coût du prix de mise en œuvre ; il sera aussi important de les prendre en compte pour des solutions technologiques.

Zone C : constante ; 33,33% des fonctions de service à savoir FC6 et FC9 représentent 0,831% du coût de mise en œuvre. Il apparait moins important d'insister sur ces fonctions lors du choix technologique.

III.1.5 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.

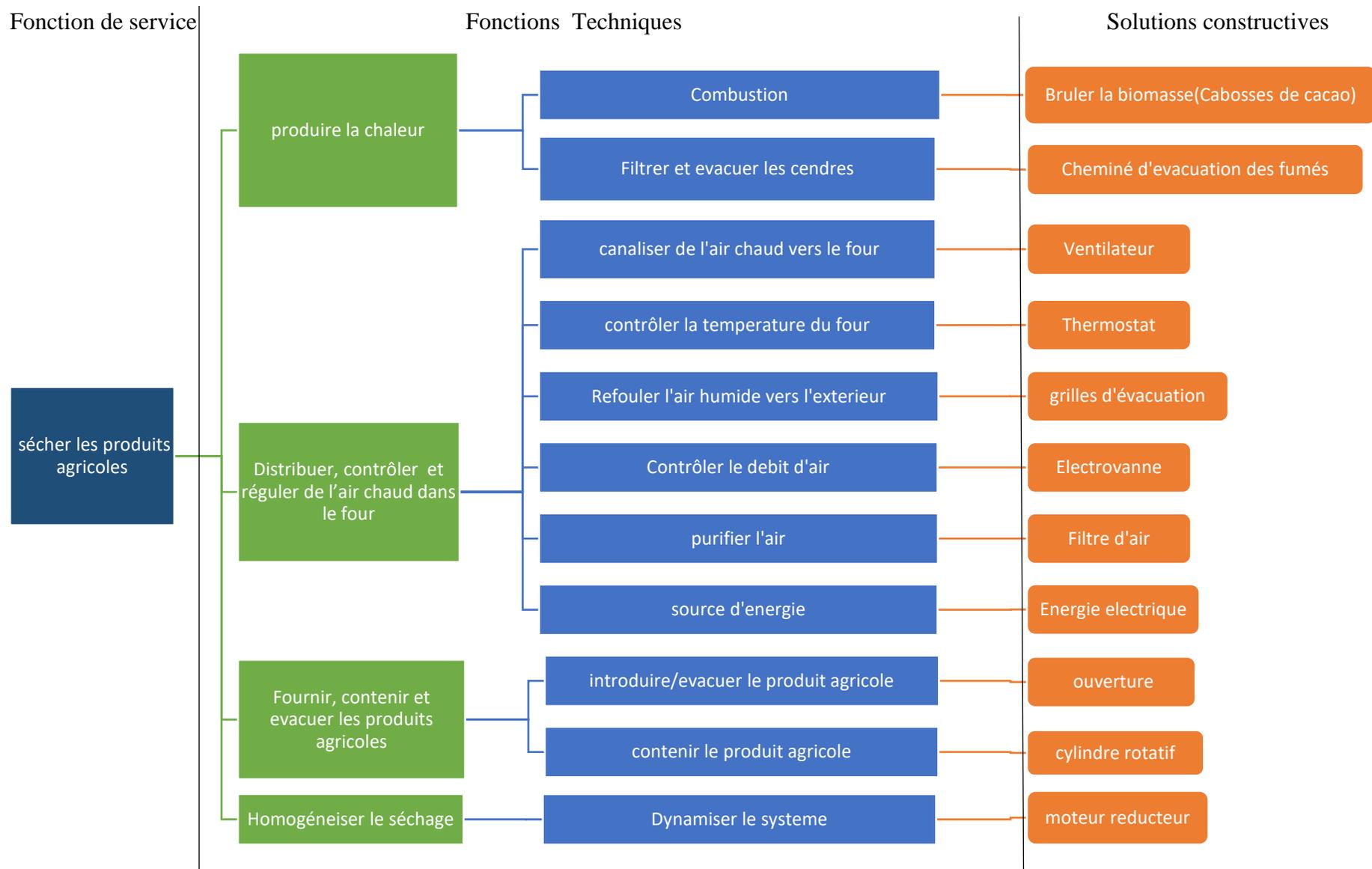


Figure III-6 Diagramme FAST du séchoir

III.1.6 Diagramme SADT

La méthode SADT est une méthode graphique qui permet d'aller du général au particulier. Elle 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.

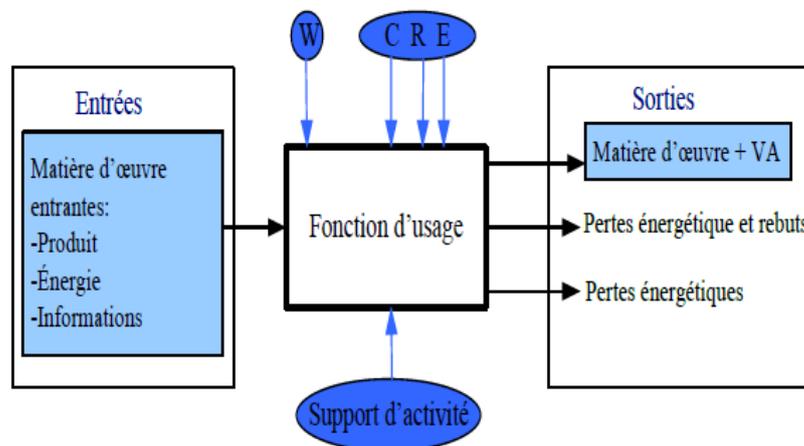


Figure III-7 Actigramme SADT [28].

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 :

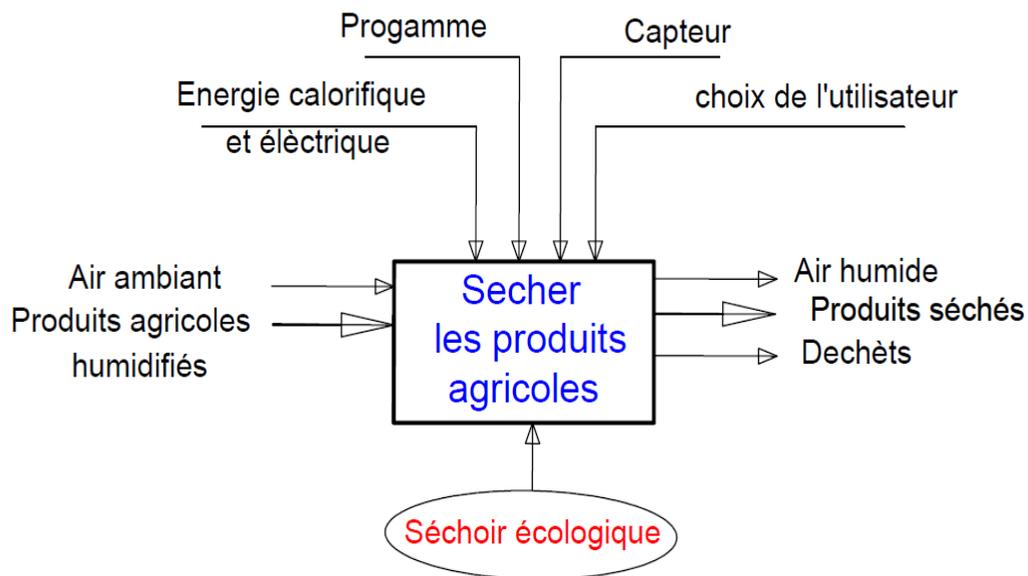


Figure III-8 Actigramme du séchoir du niveau A_0 .

Le diagramme A_0 se décompose en sous bloc illustrés ci-dessous :

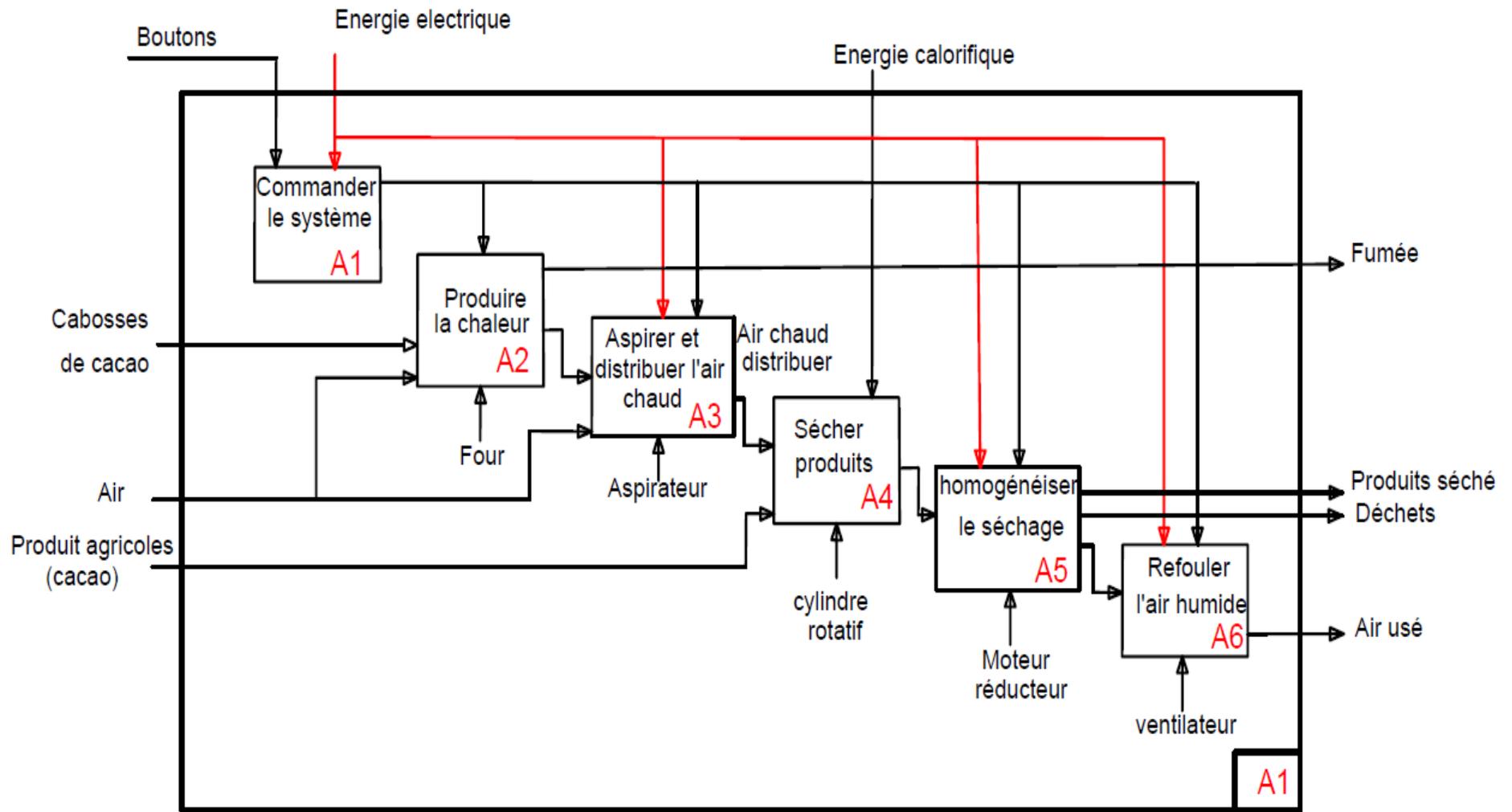


Figure III-9 Diagramme A1 du SADT

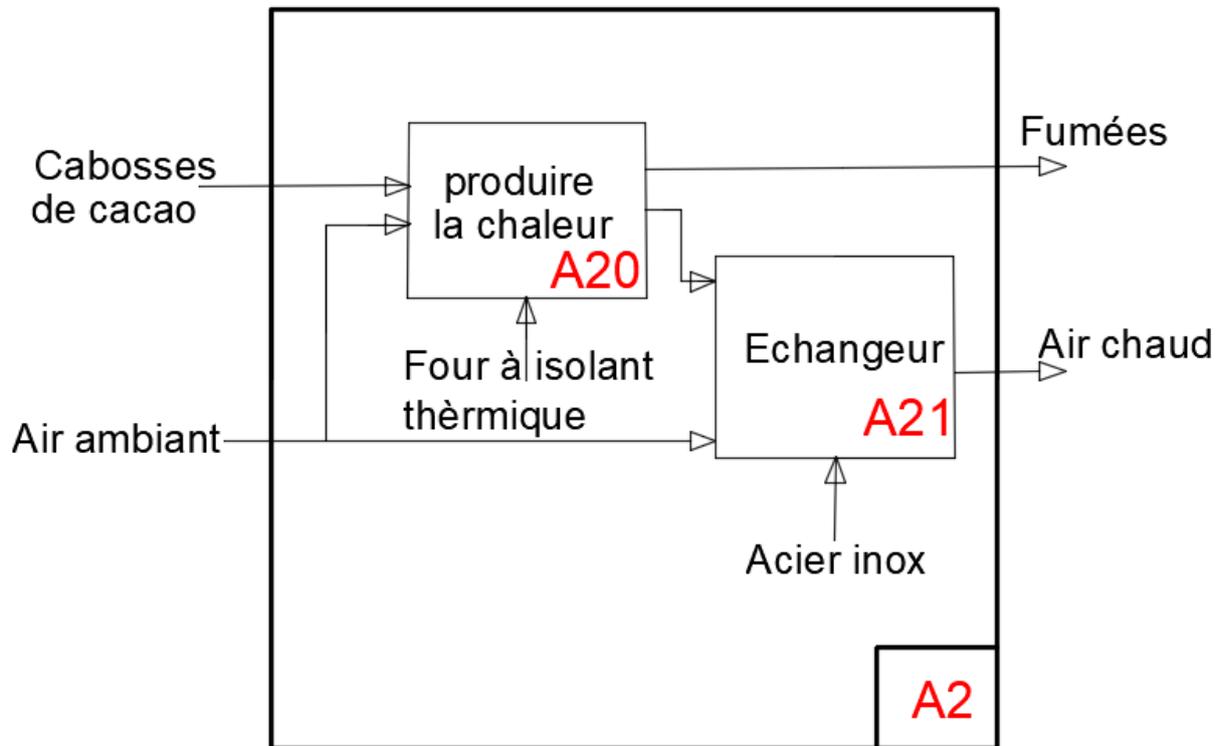


Figure III-10 Diagramme A2 du SADT

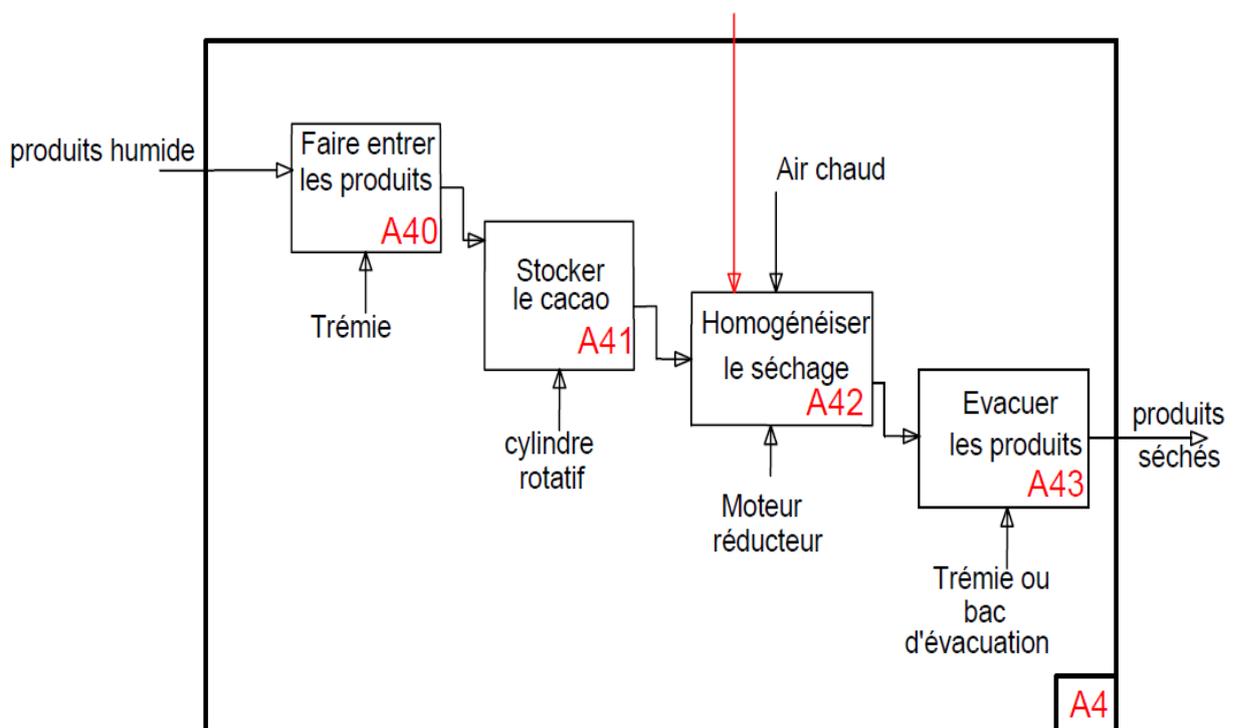


Figure III-11 Diagramme A4 du SADT

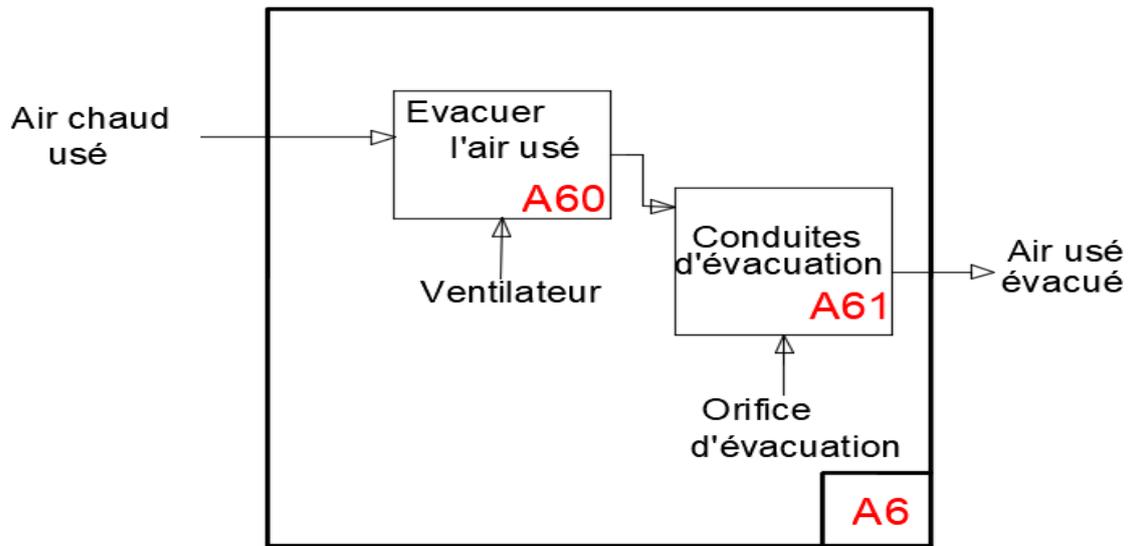


Figure III-12 Diagramme A6 du SADT

III.1.7 Schéma technologique du séchoir écologique des produits agricoles proposé

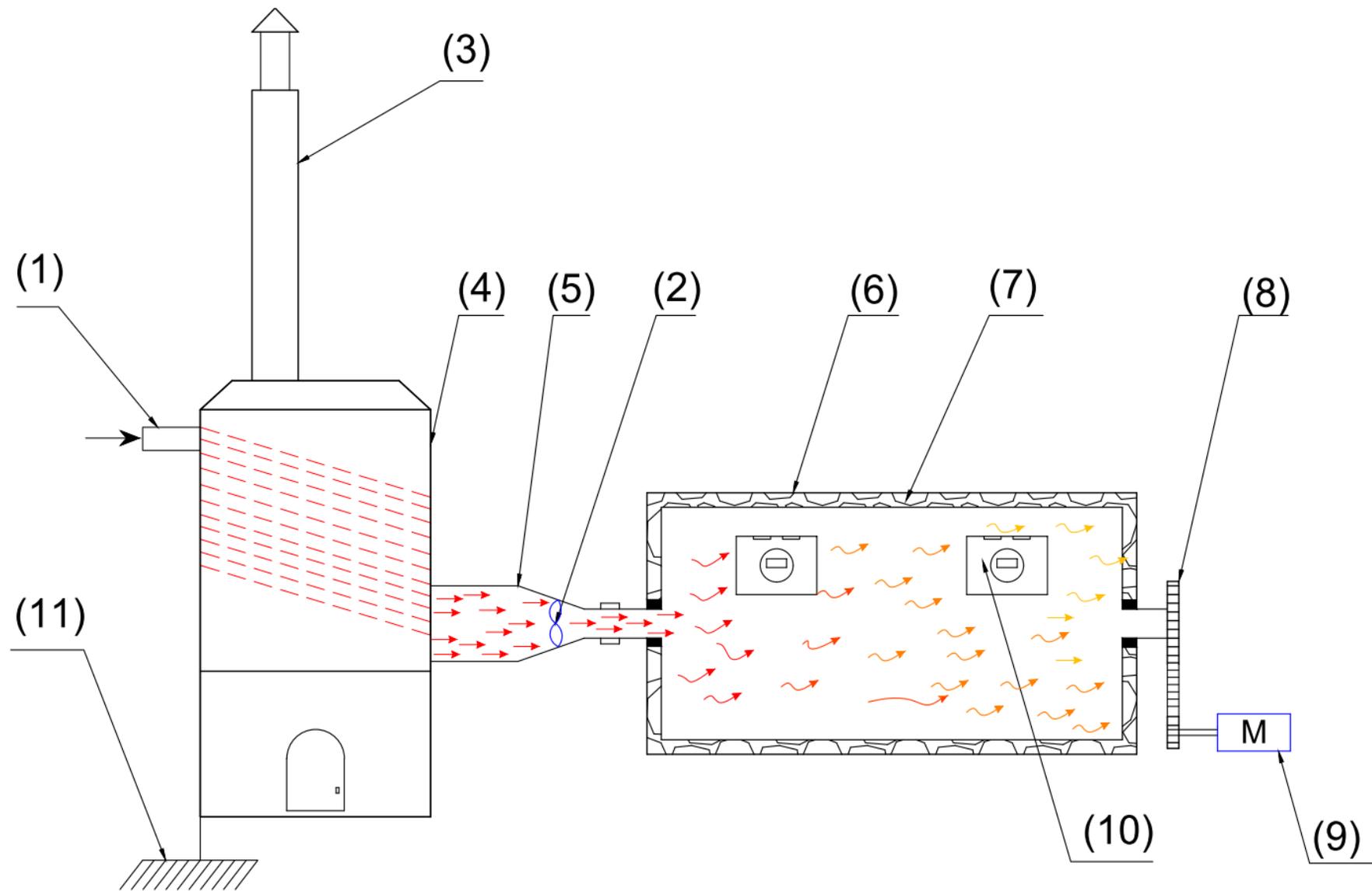


Figure III-13 Schéma du principe du séchoir proposé

1-entrée air ; 2- ventilateur ; 3- cheminée d'évacuation des fumées ;
4- chambre de combustion ; 5- collecteur d'air chaud ; 6- chambre de séchage ;
7- isolant thermique ; 8-transmission par chaine ; 9- moteur réducteur ; 10-entrée/sortie des produits agricole ; 11- support.

III.1.8 Principe de fonctionnement

La chaleur est produite dans la chambre de combustion (4) par la combustion des cabosses de cacao, dans cette chambre se trouve un échangeur de chaleur en serpentin, muni également d'une cheminée (3). L'air ambiant ainsi aspiré par le ventilateur (2), passe par les serpentins où s'effectue l'échange de chaleur entre l'air et le chambre de combustion. Cet air devenu sèche est introduit dans la chambre de séchage (6) par le biais du collecteur (5). Le produit agricole à sécher est introduit par l'entrée (10) dans la chambre de séchage. La chambre de séchage est constituée d'un isolant thermique (7) limitant les pertes énergétiques, des pales soudées sur sa partie interne qui remuent les aliments pendant la rotation de ladite chambre. La rotation de la chambre de séchage est assurée par le moteur réducteur (9) avec une transmission par chaine. Après le séchage, le produit est évacué par (10). Il est à rappeler que l'air humidifier est évacué à partir des orifices se trouvant sur la base du cylindre coté transmission.

III.2 DIMENSIONNEMENT DU SECHOIR

Nous allons ici procéder à :

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

III.2.1 Caractéristiques de l'air asséchant

❖ Hypothèses :

- Humidité initiale des fèves avant séchage : $X_i = 55\%$;
- Humidité finale après séchage : $X_f = 7\%$;
- Masse des fèves humides $M_p = 2000\text{kg}$;
- Débit de séchage $G_s = 2000\text{Kg/cycle}$;
- Masse volumique de la fève après fermentation $\rho_p = 690\text{Kg/m}^3$;

- Zone retenue : les régions du centre et du sud avec une humidité relative de $T_{séch}=90\%$
- Pression de l'air ambiant $P=1018000$ Pa ;
- 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 $T_2=55^\circ\text{C}$;
- Efficacité thermique $\eta=0,8$;
- Le séchage dure de 10 à 20 heures suivant le taux initial d'humidité [30].

III.2.1.1 Température de l'air asséchant

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

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

$$\Rightarrow T_3 = 31^\circ\text{C}$$

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

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

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

$$\Rightarrow M_{ps} = 967,75 \text{ kg}$$

Pour obtenir la masse d'eau contenue dans 20000kg de cacao on effectue la soustraction suivante

$$M_e = M_p - M_{ps}$$

D'où

$$M_e = 1032,26 \text{ kg}$$

III.2.1.3 Calcul du taux d'humidité W

Le taux d'humidité est obtenu par la relation suivante :

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

$$\Rightarrow W = 1,067 \text{ Kg}_{eau} / \text{Kg}_{prod}$$

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

- Humidité absolue d'air ambiante à 24° est : $X_a = 0,0170 \text{ Kg/kg}$ d'air sec ;
- Humidité absolue d'air à la sortie du séchoir à 31° est : $X_s = 0,0265 \text{ kg/kg}$ 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 $H_2(31^\circ\text{C}) = 99 \text{ KJ/ Kg d'air sec.}$

Voir diagramme psychométrique (**annexe 1**)

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

Elle se trouve en divisant la quantité d'eau à enlever de la quantité initiale de cacao par la différence d'humidité absolue lue sur le diagramme psychométrique ci-dessus lorsque les températures sont respectivement à 31 et 24°C.

$$M_{air} = \frac{M_e}{X_s - X_a} \quad (3.4)$$

$$\Rightarrow M_{air} = 108\,658,94 \text{ Kg}$$

En multipliant cette masse par le volume massique ($v_m = 0,87 \text{ m}^3/\text{kg d'air sec}$) de l'air qui est toujours lu sur le digramme psychométrique nous trouvons directement le volume d'air nécessaire pour sécher notre cacao :

$$V_{air} = M_{air} * v_m$$

$$\Rightarrow V_{air} = 94\,533,28 \text{ m}^3$$

III.2.1.6 Quantité de chaleur utile pour le séchage

Cette quantité de chaleur se trouve en multipliant tous simplement la masse d'air nécessaire pour le retrait de l'eau dans les fèves par la différence d'enthalpie lue sur le diagramme psychométrique.

$$Q = M_{air}(H_2 - H_1) \quad (3.5)$$

Avec $H_2 = 99$ et $H_1 = 68$ Où H_2 et H_1 sont respectivement l'enthalpie de l'air à 55 et 31 °C.

$$Q = 3\,368\,427,36 \text{ KJ}$$

III.2.1.7 Calcul du débit d'air à fournir

C'est tout simplement 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, qui est ici le temps moyen de séchage des fèves de cacao pour le cas de séchoir mécaniques.

$$q_{air} = \frac{V_{air}}{t} \quad (3.6)$$

$$\Rightarrow q_{air} = 6\,302,21 \text{ m}^3/\text{h}$$

III.2.1.8 Choix du ventilateur

L'air de séchage est chauffé et transporté jusqu'au corps à sécher par l'action du ventilateur. La relation (3.6), nous détermine le débit d'air chaud (q_{air}) à introduire dans le séchoir :

$q_{air} = 6\,302,21\text{ m}^3/h$ Ce débit d'air correspond au débit d'air du ventilateur. Notre choix se porte sur un ventilateur hélicoïdal à couplage direct. Le ventilateur se compose d'une virole en tôle muni d'un distributeur et d'un diffuseur pour augmenter considérablement le rendement (95%). 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 ou charge utile sert :

- A faire passer l'air d'un lieu placé non loin de l'entrée du séchoir à un second lieu placé à la sortie du séchoir en ayant à vaincre des résistances dans la cheminée d'aspiration, dans le ventilateur lui-même, dans la chambre de combustion, dans le Séchoir et dans la cheminée d'évacuation ;
- A donner à l'air la vitesse qu'il doit avoir au niveau des trous d'évacuation.

Tableau III-4 Caractéristiques techniques du ventilateur de soufflage.

Puissance en (kW)	0.4
Débit d'air en (m^3/h)	4200-8000
Alimentation (volts/Hz)	220/50
Vitesse en (tr/min)	750-1500

III.2.2 Etude thermique de la chambre de séchage

Hypothèses de calcul.

- Rayonnement négligé ;
- Température à l'intérieur du séchoir $T_{int} = 55^\circ\text{C}$;
- 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 ;
- La section de passage est constante transversale.

III.2.2.1 Choix de l'isolant

Le tableau ci-dessous nous présente les caractéristiques des différents isolants thermique que nous rencontrons sur le marché.

Tableau III-5 caractéristiques de quelque matériau isolant sur le marché [31].

Isolant	Conductivité thermique(W/m°C)	Coût pour R= R=1m².K/W	Flexibilité
Laine de verre	0.032 - 0.042	1,33€/m²	Très bonne
Laine de coco	0,037 - 0,047	10,8€/m²	Moyenne
Laine de mouton	0,035 - 0,045	8 €/m²	Très bonne
Polyuréthane	0,022 - 0,028	7,39€/m²	Bonne
Polystyrène	0,027 - 0,040	2.7€/m²	Peu
Brique de chanvre	0,05 - 0,11	6,73€/m²	Peu
Liège expansé	0,037 - 0,041	14,56€/m²	Peu

En nous servant de ce tableau et des exigences de notre séchoir, nous opterons **pour la laine de verre** comme isolant thermique à cause de sa très faible conductivité thermique, son prix peu onéreux, sa disponibilité sur le marché et sa bonne flexibilité.

III.2.2.2 Choix du matériau

- Pour la paroi externe de notre séchoir, nous allons utiliser la tôle en **acier non allier** car doté d'une grande dureté de surface, une haute résistance à l'usure et une bonne capacité de coupe avec un cœur ductile.
- Pour la paroi interne, du fait que les produits soient en contact avec ladite paroi, nous allons utiliser ici de **l'acier inox austénitique**. Ceci à cause de sa propriété d'être peu sensible à la corrosion et ne peut également pas se dégrader en rouille.

III.2.2.3 Bilan énergétique du séchoir

Afin d'assurer un bon compromis entre le chauffage et le refroidissement du séchoir, nous fixons le rendement à **0,8**.

- Bilan énergétique de la chambre de combustion

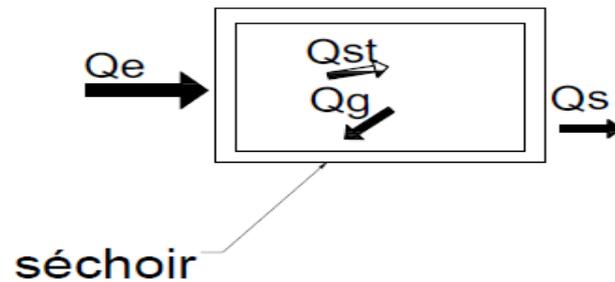


Figure III-14 bilan énergétique de la chambre de combustion

Q_e = Energie entrante dans le séchoir ;

Q_{st} = Energie utile pour le séchage ;

Q_g = Energie générée par le séchoir qui ici est nulle car il n'y a pas de source interne de chaleur ;

Q_s = Energie sortante du séchoir ; avec $Q_s = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{airH}$;

Q_{cond} = Energie perdue par conduction sur les parois du séchoir ;

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 **$Q_{st} = 3\,368\,427.36\text{ KJ}$** ;

➤ Chaleur reçu Q_e

Le rendement de notre séchoir étant estimé à 0.8, nous avons :

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

$$\Rightarrow Q_e = \frac{Q_{st}}{\eta} \quad (3.7)$$

$$\Rightarrow Q_e = 4\,210\,534.211\text{ kJ}$$

➤ Chaleur perdue Q_s

$$Q_s = Q_e - Q_{st}$$

$$\Rightarrow Q_s = 842\,106.85\text{ KJ}$$

➤ Calcul de la chaleur perdu par la sortie de l'air humidifié Q_{airH}

Nous la déterminons à partir de la relation :

$$Q_{airH} = C_p(T_3 - T_{ext})q_{air} \quad (3.8)$$

C_p =Chaleur massique de l'air sec : 1005kJ/Kg°k

$$\Rightarrow Q_{airH} = 44\,336.04\,KJ$$

➤ Calcul du coefficient global d'échange entre le séchoir et l'air.

Pour le calcul du coefficient global d'échange, nous devons d'abord déterminer l'énergie perdu à travers les parois par conduction et convection noté Q_1 .

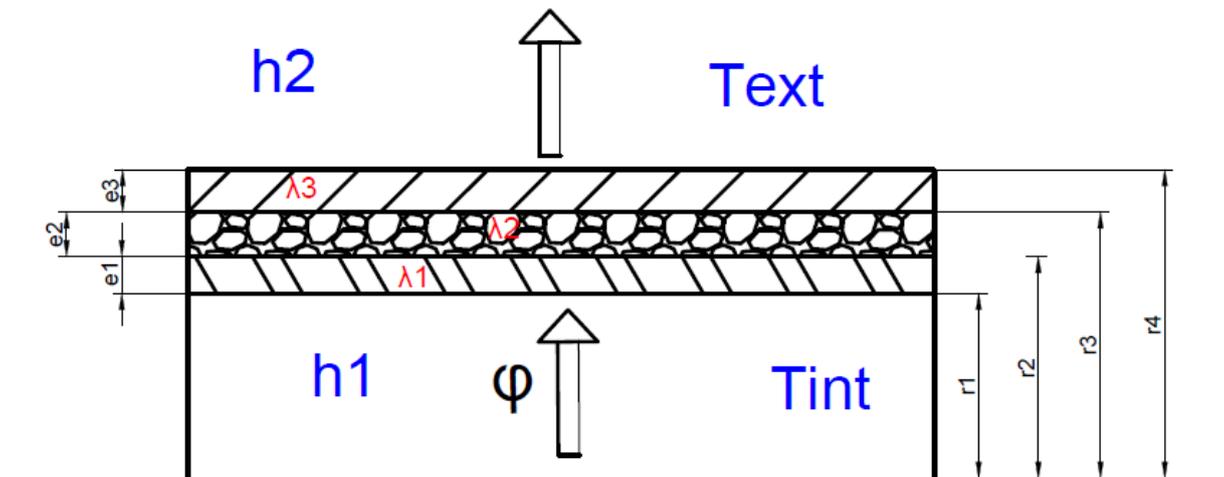


Figure III-15 Modélisation du transfert de chaleur dans le séchoir cylindrique.

Nous avons par définition

$$Q_1 = Q_{cond} + Q_{conv} = Q_s - Q_{airH} = KS\Delta T \quad (3.9)$$

K = coefficient d'échange par unité de surface ($W/m^2/°K$) ;

S = surface unitaire d'échange entre les deux milieux en (m^2) ;

ΔT = variation de température ($T_{int} - T_{ext}$).

$$\Rightarrow Q_1 = 797\,770,81\,KJ$$

$$\Rightarrow K = \frac{Q_1}{S \cdot \Delta T} \quad (3.10)$$

$$\Rightarrow K = 476,65\,W/m^2/°K.$$

III.2.3 Etude thermique de la chambre de combustion

III.2.3.1 Calcul de l'installation pour la production de l'air chaud

L'installation pour la production de l'air chaud doit couvrir non seulement la quantité de chaleur calculée précédemment Q_e , mais aussi tenir compte des variations hygrométriques et de la température de l'air admis dans l'enceinte.

➤ Calcul de la consommation des cabosses de cacao

Elle se calcule par la formule suivante :

$$C = Q_e / PCI \quad (3.11)$$

PCI = Pouvoir calorifique inférieur des cabosses de cacao : 16,85 kJ/kg

Q_e = Flux entrant dans le séchoir calculé plus haut : 40 000,075 kJ

C = Consommation de cabosses en (Kg).

$$\Rightarrow C = 2\,373,89 \text{ kg}$$

Le rendement de notre chambre de combustion doit être estimé à 70%. On calcule la consommation totale (C_t) de cabosses, pour un rendement de 0,85 ; ainsi

$$C_t = C / \eta$$

$$\Rightarrow C_t = 2\,792,81 \text{ kg}$$

Soit une consommation de 186,18 kg/h de cabosse puisque la durée de séchage est de 15h.

➤ Calcul du pouvoir comburivore théorique du combustible, m_a

Le pouvoir comburivore théorique, est la quantité d'air nécessaire pour assurer la combustion complète d'un kg de combustible. Le pouvoir comburivore théorique est noté A_o et est exprimé en kg d'air par kg de combustible. L'analyse centésimale du combustible (cabosse de cacao) a donné la composition en masse (voir tableau 1.1).

Cherchons la quantité d'oxygène nécessaire pour la :

✚ Combustion du carbone C_c :



$$C_c = \frac{2 \times M_o \times m_c}{M_c} \quad (3.13)$$

Masse atomique de l'oxygène $M_o = 16 \text{ g/mol}$

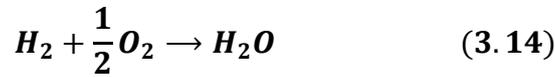
Masse de carbone contenue dans un kg de cabosse, $m_c = 827,5 \text{ g}$

Masse atomique du carbone, $M_c = 12 \text{ g/mol}$

$$\Rightarrow C_c = \frac{2 \times 16 \times 429,8}{12}$$

$$\Rightarrow C_c = 1\ 146,13 \text{ g d'oxygene}$$

✚ **Combustion d'hydrogène C_H :**



$$C_c = \frac{M_O \times m_H}{M_H} \quad (3.15)$$

Masse d'hydrogène contenu dans un kg de cabosses $m_H = 48,5 \text{ g}$

Masse molaire d'hydrogène $M_H = 1 \text{ g/mol}$

$$\Rightarrow C_c = 776 \text{ g d'oxygène}$$

✚ **Combustion du soufre C_S**



$$C_S = \frac{2 \times M_O \times m_S}{M_S} \quad (3.17)$$

Masse de soufre contenu dans un kg de cabosses de cacao $m_S = 2 \text{ g}$;

Masse molaire du soufre $M_S = 32 \text{ g/mol}$.

$$\Rightarrow C_S = 2 \text{ g d'oxygène}$$

En supposant 20 % d'oxygène pour la combustion de l'Origène contenu dans le combustible, nous aurons besoin de 2 405,16 g d'oxygène la combustion nécessite **1 924,13 g d'oxygène** Sachant que, pour des conditions moyennes de température et de pression de l'air ambiant, on a environ 230 g d'oxygène dans un kg d'air, on a environ $m_a = 1\ 924,13/230 = 10,45 \text{ kg d'air/kg de combustible}$.

➤ **Calcul du pouvoir fumigène du combustible**

C'est, par définition, la masse de fumées obtenue lors de la combustion complète d'un kg de combustible. L'air étant essentiellement constitué du N_2 et du CO_2 .

$$mfo = m_{N_2} + m_{CO_2} \quad (3.18)$$

mfo =Pouvoir fumigène ;

✚ **Calcul de la masse de diazote V_{N_2}**

L'air étant constitué de 79% de diazote et 21% de dioxygène, nous avons la relation

$$m_a = \frac{m_{N_2}}{0.79}$$

$$\Rightarrow m_{N_2} = 0.79 \times m_a \quad (3.19)$$

$$\Rightarrow m_{N_2} = 8,25 \text{ kg}$$

✚ Calcul de la masse de CO₂.

De l'équation (3.10) nous avons la relation :

$$m_{CO_2} = \frac{M_{CO_2} \times m_c}{M_c} \quad (3.20)$$

$$\Rightarrow m_{CO_2} = 1,57 \text{ kg}$$

Donc nous avons alors ***m_fo = 9,82 kg de fumée/ kg de combustible***

➤ **Calcul de la teneur en CO₂ des fumées**

$$\%CO_2 = \frac{m_{CO_2} \times 100}{m_{f}o} \quad (3.21)$$

$$\%CO_2 = 15,98\%$$

III.2.3.2 Calcul des dimensions de l'enceinte intérieure

➤ Calcul de la surface interne de la chambre de combustion

La puissance thermique de l'installation est déterminée à partir du bilan thermique et est donnée par la relation ci- dessous et correspond à la puissance émise par notre source de chaleur.

$$\phi = h \times S_p (T_p - T_\infty) \quad (3.22)$$

ϕ : la puissance thermique = $\frac{Q_e}{t} = 77,97 \text{ kW}$;

h : le coefficient de convection des plaques plane en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$;

S : la surface de la plaque en m^2 ;

T_p : la température de la plaque = $1450 \text{ } ^\circ C$;

T_∞ : la température de l'air en = $55 \text{ } ^\circ C$.

✚ **Evaluons le coefficient de convection h**

Sur le plan pratique, la convection naturelle de l'air sur une paroi est en général, laminaire. Le calcul de h, appliqué à l'air, pour une différence $\Delta \theta$ de température entre la paroi et l'air est donné par le tableau (**voir annexe 2**).

$$h = 1,17 \Delta \theta^{0,25} \quad (3.23)$$

$$\Rightarrow h = 7.15 W/m^2 \text{ } ^\circ C$$

✚ **Déduisons la surface interne de la chambre de combustion**

$$S = \frac{\phi}{h(T_P - T_\infty)} \quad (3.24)$$

$$\Rightarrow S = 7.8m^2$$

Cette surface correspond à la surface interne de la chambre de combustion constituée de cinq façades. Nous aurons donc une chambre d'environ **(1,5x1x1) = (L x l x e) m.**

Pour l'isolation de l'enceinte en acier, nous utilisons des briques réfractaires (22 x 11 x 6 cm) qui assure une bonne isolation. Elles optimisent le transfert thermique et supportent la puissance de chauffe.

➤ **Calcul de l'épaisseur des murs de la chambre d'isolation**

Données :

Température extérieure $T_{pext} = 30^\circ\text{C}$. le coefficient de conductivité des briques réfractaire $\lambda_b = 0,698 \text{ W/m. K}$ (à 1450°C). Nous supposons que la surface des murs intérieurs est de 7.8m^2 (quatre surfaces latérales et la voûte).

$$\phi = \frac{Q}{S} = \frac{\lambda_b}{e} (T_{Pint} - T_{pext})$$

D'où

$$e = \frac{S\lambda_b}{Q} (T_{Pint} - T_{pext}) \quad (3.25)$$

$$\Rightarrow e = 220\text{mm}$$

III.2.4 Etude technique du séchoir

III.2.4.1 Calcul des dimensions du séchoir

Notre séchoir ayant une forme cylindrique, il nous revient de déterminer le volume de notre cylindre. Le volume est donné par la formule [32].

$$V = \frac{G_s * t}{\rho_p * \beta} \quad (3.26)$$

Avec β = le taux de remplissage du cylindre en % ;

t =Durée de séchage déterminée plus haut en (h) ;

V =volume du cylindre en (m^3) ;

G_s =Debit de séchage en Kg/h.

$$\Rightarrow V = 7,24 \text{ m}^3$$

Pour un séchage plus conventionnel, nous supposons que $L=3D$, calculons la longueur L et le diamètre D du séchoir.

On a
$$V = \pi D^2 L / 4 \text{ or } L=3D$$

$$\Rightarrow V = \frac{3\pi D^3}{4}$$

$$\Rightarrow D = \sqrt[3]{\frac{4V}{3\pi}} \quad (3.27)$$

$$\Rightarrow D = 1,45 \text{ m}$$

$$\Rightarrow L = 4,36 \text{ m}$$

III.2.4.2 Calcul de la vitesse de rotation du séchoir

La vitesse de séchage est une fonction du temps de séchage, de l'inclinaison du tambour rotatif, du diamètre intérieur et éventuellement de la longueur du cylindre. Nous avons la relation [32].

$$t = 0.205 \frac{L}{n * tg \alpha * D_i}$$

Avec :

t = Temps de séchage en (mn) ;

n = Vitesse de rotation du cylindre en (tr/min) ;

α = Angle d'inclinaison du cylindre en (degré), c'est une valeur variante entre (1 et 6°). Nous allons dans notre cas considérer $\alpha = 1^\circ$;

D_i = Diamètre intérieur du cylindre.

$$\Rightarrow n = 0.205 \frac{L}{t * tg \alpha * D_i} \quad (3.28)$$

$$\Rightarrow n = 26,077 \text{ tr/min}$$

III.2.4.3 Calcul de la puissance nécessaire pour faire tourner le cylindre

➤ Calcul du couple moteur

Le cylindre en rotation, il est en contact en A et C (B centre de gravité) à d'autres corps, il existe une force de frottement qui s'oppose au glissement. On peut définir le coefficient de

frottement, f , comme le rapport de la force tangentielle, sur la force normale supporté par le point de contact. $f = N_1/R_1$.

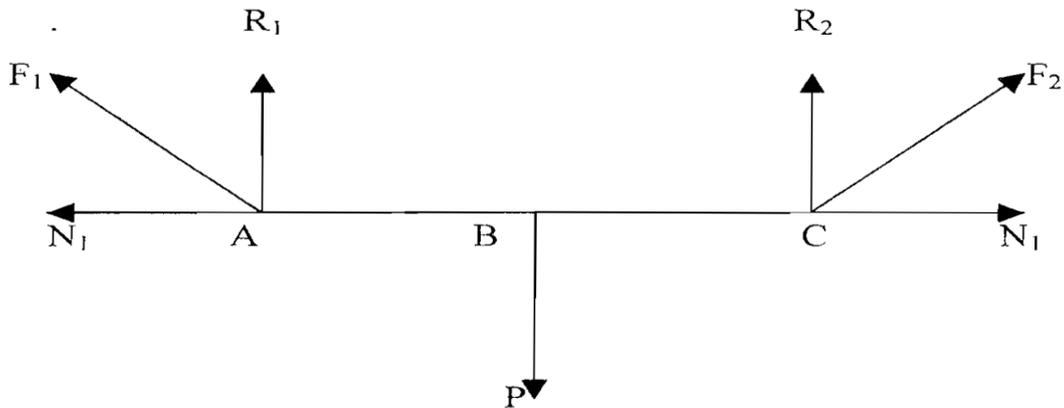


Figure III-16 . Configuration des efforts sur le système

Par symétrie nous pouvons dire que $P = R_1 + R_2$ et $R_1 = R_2$ alors :

$$P = 2R_1 = 2R_2, N = R_1 \operatorname{tg} \varphi, \text{ et } \operatorname{tg} \varphi = f$$

$$\Rightarrow N = f * \frac{P}{2} \quad (3.29)$$

Le coefficient de frottement f , étant appelé coefficient de frottement de glissement, sa valeur dépend :

- Du couple de matériaux ;
- De la lubrification ;
- De l'état de surface des matériaux ;
- De la température.

Tableau III-6 Coefficient de frottement de glissement [33].

Matériau	f (matériau à sec)	f (matériau lubrifié)
Acier/Acier	0,5 à 0,20	0,10
Acier/bronze	0,1 5	0,10
Acier/Antifriction		0,5
Acier/Nylon		0,10 à 0,20
Acier/Téflon	0,05 à 0,15	
Acier/caoutchouc	0,25 à 0,45	
Fonte/fonte	0,15	0,10
Fonte/Ferro do	0,20 à 0,50	

En effet
$$C_r = R * N \quad (3.30)$$

Avec : R = le rayon du cylindre ; C_r = Couple résistant.

La masse du cylindre est estimée à partir du tableau 3-6 ci-dessous. Dans ce tableau nous avons les différents éléments constituant le cylindre en rotation. L'ensemble des masses de ces différents éléments plus la masse du produit qui traverse le Séchoir constitue la masse totale entraînée en rotation.

$$M = \Sigma (\text{masse des éléments}) + \text{masse produit}$$

$$M = M_p + M_e \quad (3.31)$$

M_e = masse des éléments

M_p = masse du produit

Tableau III-7 Eléments du cylindre en rotation

Quantité	Désignation	Masse volumique (kg/m ³)	Volume (m ³)	Masse (Kg)
2	Axe	7.850	7,12.10 ⁻⁴	11,19
2	Couvercle	7.850	0.00321	25,48
2	Bague en bronze	8.9	75,36.10 ⁻⁵	13,41
1	Cylindre	7.850	0,0110	174,09

Donc $M_e = 235,37$ kg avec une majoration de 5% et $M_p = 2000$ kg

D'où $M = 2\ 235,37$ kg

Des relations (3.16) et (3.15), nous avons

$$C_r = R \times f \times M \times g/2 \quad (3.32)$$

Avec $f=0.15$ d'après le tableau en annexe 3, vu que nous avons au niveau des paliers le contact entre les bagues en bronze et l'arbre en acier.

$$C_r = 90,36N.m$$

Donc la condition d'entraînement sera donc :

$$C_m > C_r = 90.36N.m$$

Le réducteur de vitesse est utilisé pour réduire la vitesse de rotation du moteur, augmenter le couple disponible du moteur et de répartir la puissance disponible du moteur.

➤ **Calcul de la puissance motrice**

La puissance admissible au niveau du réducteur de vitesse avec un rendement $\eta_1 = 0.9$ est calculer par la relation :

$$P_{adRed} > (C_m \times \omega) / \eta$$

ω = vitesse de rotation du tambour.

$$\omega = \pi N / 30$$

$$P_{adRed} > (C_m \times \pi \times N) / (30 \times \eta) \quad (3.33)$$

$$\Rightarrow P_{adRed} > 274,17 \text{ Watts}$$

En supposant que le rendement au niveau du moteur est de $\eta_2 = 0,9$ on a

$$P_m > P_{adRed} / \eta_2$$

$$\Rightarrow P_m > 304,6 \text{ Watts}$$

Nous allons nous servir du catalogue en **annexe 3** pour le choix de notre moteur. Les caractéristiques de notre moteur choisit sont inscrit dans le tableau ci-dessous.

Tableau III-8 caractéristiques techniques du moteur [34]

Type de moteur	DRN 80 MS2
Puissance nominale (KW)	0.75
Couple nominal (N.m)	2.5
Vitesse de rotation (tr/min)	2855
Courant nominal (A) à 380V	1.66
Facteur de puissance	0.84

Ce choix du moteur standard nous oblige à employer un réducteur d'une puissance supérieure ou égale à 0,75 kW. La vitesse de rotation du moteur est grande. On va donc utiliser un réducteur de **1/110**, dont le but est de réduire la vitesse de rotation du moteur. Nous optons pour une transmission par chaîne à cause de la faible vitesse de rotation de notre séchoir.

III.2.4.4 Dimensionnement de la chaîne de transmission

Données de départ

- Puissance P à transmettre : $P = 0.75 \text{ KW}$;
- Vitesse de rotation w_1 du pignon moteur : $w_1 = 26 \text{ tr/min}$;
- Rapport de vitesse R_v entre le pignon et la roue : $R_v = 1,5$;
- Types de machines auxquelles sont reliés le pignon et la roue : machinerie générale à charge uniforme ;
- Nombre de dents du pignon N_1 (si c'est possible)

➤ Calcul de la puissance effective

Elle est donnée par la relation :

$$P' = K_s P \quad (3.34)$$

P' est la puissance effective en kW ;

K_s est le facteur de service ($1.0 < K_s < 2.0$) .il est calculé en fonction du moteur d'entraînement et des machines entraînées. Puisque nous avons à faire à moteur électrique et vu le type de machine, le tableau de facteur de service (**annexe 4**) nous indique une valeur de $K_s = 1.0$.

Donc

$$P' = 0.75 \text{ kW}$$

➤ **Choix de la chaîne**

Il est défini à partir de l'abaque en **annexe 5** connaissant :

- La puissance effective P' .
- La vitesse de rotation du pignon N_1 [tr/min].
- Le nombre de rangs (simple, double, etc.).

Nous lisons alors sur l'abaque une chaîne de référence ISO : **16B-2BI 25,4 mm pas.**

➤ **Nombre de dents du pignon N_1**

Pour le calcul du nombre de dent du pignon, nous devons d'abord déterminer la puissance nette donnée par la relation [28] : $P'_r = K_2 \times P$ avec $K_2 =$ Facteur du nombre de rangs de maillage.

Rappelons que $K_2 = 1,7$ pour le nombre de maillages égale à 2.

$$P'_r = 1,275 \text{ kW}$$

Par simple lecture, nous obtenons alors $N_1 = 14 \text{ dents}$.

➤ **Nombre de dents de la roue N_2**

Nous savons que $K_v = \frac{N_2}{N_1}$

$$\Rightarrow N_2 = K_v \times N_1 \quad (3.35)$$

$$\Rightarrow N_2 = 24 \text{ dents}$$

➤ **Calcul de la longueur de la chaîne**

Elle est donnée par la relation :

$$L = 2C + P \left(\frac{N_1 + N_2}{2} \right) + \frac{P^2}{C} \left(\frac{N_2 - N_1}{2 \times \pi} \right)^2 \quad (3.36)$$

L : longueur de la chaîne ;

C : entraxe = 530mm ;

N_1 : nombre de dents du pignon moteur =14 dents ;

N_2 : nombre de dents de la roue dentée =24 dents ;

P : pas de la chaîne = 25,4 mm

$$L = 1\,078,01 \text{ mm}$$

➤ **Vérification de l'angle d'enroulement**

Nous avons

$$\theta = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left(\frac{d_{p2} - d_{p1}}{2c} \right)$$

d_{p1}, d_{p2} : Diamètres primitifs des poulies p_1 et p_2 obtenus par la relation

$$d_p = \frac{p \times N}{\pi}$$

$$\Rightarrow \theta = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left(\frac{\frac{p \times N_2}{\pi} - \frac{p \times N_1}{\pi}}{2c} \right) \quad (3.37)$$

$$\Rightarrow \theta = 173,87^\circ$$

Il faut que $\theta > 120^\circ$ afin d'assurer une répartition adéquate des efforts. Comme $\theta = 173,87^\circ > 120^\circ$, alors il y aura répartition adéquate des efforts.

III.3 ETUDE GRAPHIQUE

III.3.1 Dessin d'ensemble du séchoir écologique des produits agricoles

III.3.2 Dessin de définition du couvert

III.3.3 Dessin de définition du cylindre extérieur

III.3.4 Dessin de définition du demi-arbre plein

Chapitre IV ETUDE DE FABRICATION, COUTS 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 équipement.

IV.1 ETUDE DE FABRICATION

Nous nous focaliserons tout d'abord à la réalisation du demi arbre plein, qui porte le pignon de réception du mouvement de rotation du moteur.

IV.1.1 Dessin de fabrication de notre demi-arbre plein

IV.1.2 Avant-projet d'étude de fabrication (APEF)

- Phases de l'avant-projet d'étude de fabrication

Tableau IV-1 Avant-projet d'étude de fabrication

Numéro de phase	Désignation de la phase	Surfaces obtenues
10	Contrôle du brute	L = 245 D = Ø44
20	Tournage	F4 ; D5 et F3 ; C2 ; D3 ; D2
30	Tournage	F1 ; D1 et F2 ; C1
40	Perçage	D4
50	Fraisage	F7 ; F5 et F6
60	Contrôle final	

- Choix des conditions de coupe à utiliser

Puisque le travail s'effectue sur de l'acier et tenant compte des conditions de coupe pour les travaux en tournage, le choix sera de :

- ✓ $V_c = 30$ m /min pour l'outil en acier rapide ;

L'utilisation d'un lubrifiant constitué d'eau et d'huile soluble en proportion équitable sera requise pour l'usinage. V_c étant la vitesse de coupe.

- ✓ Fréquence de rotation N

Elle est donnée par la relation
$$N = \frac{1000V_c}{\pi D} \quad (4.1)$$

Le diamètre de l'arbre étant 44mm alors $N = 217,02$ tr/mn,

- ✓ Vitesse de d'avance V_f

Elle donnée par la relation
$$V_f = Nf \quad (4.2)$$

f : Avance en mm/tr. Dans notre cas nous allons utiliser les outils en acier rapide ($0.1 \leq f \leq 0.2$) nous prendrons $f=0.2$ donc $V_f = 43,404$ mm/tr.

IV.1.3 Contrat de phase du demi-arbre plein

ENSET D'EBOLOWA	ANALYSE DE FABRICATION		Date :						
			Tableau 1/7						
	CONTRAT DE PHASE		Matière : Acier 45SC6						
Nbre de pièces :	Auteur : PIEBEING Gildas TCHINO		Cadence :						
N° de la phase : 10		MO utilisée :							
CONTROL DU BRUT									
Référentiel :									
OPERATIONS D'USINAGE		OUTILLAGE		ELEMENTS DE COUPE					
Rép	Désignation	Outil de coupe	Vérificateurs	Vc m/mn	N tr/mn	Vf mm/mn	f mm/tr	A mm	Lc mm
10	Contrôle du brut		Réglet, pieds à coulisse au 1/50						Cf1 = 245
									Cf2 = 44

ENSET D'EBOLOWA		ANALYSE DE FABRICATION						Date :	
								Tableau 2/7	
		CONTRAT DE PHASE						Matière : Acier 45SC6	
Nbre de pièces :		Auteur : PIEBEING Gildas TCHINO						Cadence :	
N° de la phase : 20			MO utilisée : tour parallèle						
TOURNAGE									
Référentiel : Centrage long sur B2					Butée sur B1				
OPERATIONS D'USINAGE		OUTILLAGE		ELEMENTS DE COUPE					
Rép	Désignation	Outil de coupe	Vérificateurs	Vc m/mn	N tr/mn	Vf mm/mn	f mm/tr	A mm	Lc mm
21	Dresser F4F	Outil à charioter et à dresser	Pied à coulisse au 1/50	30	217,02	43,404	0,2		Cf1 = 243±0,2
	Charioter D5F et dresser F3F			30	217,02	43,404	0,2		Cf1 = Ø40
				30	217,02	43,404	0,2		Cf2=142±0,2

ENSET D'EBOLOWA		ANALYSE DE FABRICATION								Date :
		CONTRAT DE PHASE								Tableau 3/7
Nbre de pièces :		Auteur : PIEBEING Gildas TCHINO								Cadence :
N° de la phase : 20		MO utilisée : tour parallèle								
TOURNAGE										
Référentiel : Centrage long sur B2				Butée sur B1						
OPERATIONS D'USINAGE		OUTILLAGE		ELEMENTS DE COUPE						
Rép	Désignation	Outil de coupe	Vérificateurs	Vc m/mn	N tr/mn	Vf mm/mn	f mm/tr	A mm	Lc mm	
22	Chanfreiner C2F		Rapporteur d'angle	30	217,02	43,404	0,2		Cf1 = 5±0,2 à 45°	
	Charioter D2F			30	217,02	43,404	0,2		Cf1=60 à 30°	
23	Percer D3F	Foret Ø10	Pied à coulisse avec bec intérieur 1/50	10	318,30	63,66	0,2		Cf1 = Ø10	
24	Tarauder D3F	Outil à fileter intérieur	Peigne à filet	10	265,25	53,05	0,2		Cf1=M12	

ENSET D'EBOLOWA		ANALYSE DE FABRICATION				Date :			
		CONTRAT DE PHASE				Tableau 4/7			
Nbre de pièces :		Auteur : PIEBEING Gildas TCHINO				Matière : Acier 45SC6			
N° de la phase : 30		MO utilisée : Tour parallèle							
TOURNAGE		Référentiel : Centrage long sur D5 et Butée sur F4							
OPERATIONS D'USINAGE		OUTILLAGE		ELEMENTS DE COUPE					
Rép	Désignation	Outil de coupe	Vérificateurs	Vc m/mn	N tr/mn	Vf mm/mn	f mm/tr	A mm	Lc mm
31	Dresser F1F	Outil à dresser	Un pied à coulisse au 1/50	30	318,18	106,1	0,2		Cf1 = 142±0,2
	Charioter D1F et dresser F2F	Outil à dresser et à charioter		30	217,02				Cf1 = Ø40
				30	217,02				Cf2=82±0,2
	Chanfreiner C1F		Rapport d'angle	30	217,02				Cf1=5±0,2 à 45°

The technical drawings illustrate the manufacturing process for the chamfered end of the shaft. The top drawing shows a side view of the shaft with a chamfered end, with dimension Cf1 indicating the length of the chamfer. The middle drawing shows a cross-sectional view of the shaft with a chamfered end, with dimension Cf1 indicating the diameter of the chamfered end and dimension Cf2 indicating the diameter of the shaft. The bottom drawing shows a cross-sectional view of the shaft with a chamfered end, with dimension Cf1 indicating the diameter of the chamfered end.

ENSET D'EBOLOWA	ANALYSE DE FABRICATION		Date :						
			Tableau 5/7						
	CONTRAT DE PHASE		Matière : Acier 45SC6						
Nbre de pièces :	Auteur : PIEBEING Gildas TCHINO		Cadence :						
N° de la phase : 40		MO utilisée : Perceuse à colonne							
PERCAGE									
Référentiel : Centrage long sur D5 et D1 ; Serrage sur F4									
OPERATIONS D'USINAGE		OUTILLAGE		ELEMENTS DE COUPE					
Rép	Désignation	Outil de coupe	Vérificateurs	Vc m/mn	N tr/mn	Vf mm/mn	f mm/tr	A mm	Lc mm
41	Percer D4F	Foret à percer Ø14	Pied à coulisse au 1/50	30	217,02	106,1	0,2		Cf1 = 14 ± 0,2

ENSET D'EBOLOWA		ANALYSE DE FABRICATION						Date :	
								Tableau 6/7	
Nbre de pièces :		Auteur : PIEBEING Gildas TCHINO						Matière : Acier 45SC6	
								Cadence :	
N° de la phase : 50		MO utilisée : Fraiseuse universelle							
FRAISAGE									
Référentiel : Centrage long sur D1 ; Butée sur F2									
OPERATIONS D'USINAGE		OUTILLAGE			ELEMENTS DE COUPE				
Rép	Désignation	Outil de coupe	Vérificateurs	Vc m/mn	N tr/mn	Vf mm/mn	f mm/tr	A mm	Lc mm
51	Rainurer F7E ; F7F ; F5E ; F5F ; F6E ; F6F	Fraise 2 tailles Ø8	Pied à coulisse au 1/50	30	318,18	106,1	0,2		Cf1 = $36 \pm 0,2$ Cf2 = $8 \pm 0,2$ Cf3 = $12 \pm 0,2$

ENSET D'EBOLOWA		ANALYSE DE FABRICATION						Date :	
								Tableau 7/7	
Nbre de pièces :		Auteur : PIEBEING Gildas TCHINO						Matière : Acier 45SC6	
								Cadence :	
N° de la phase : 60			MO utilisée :						
Contrôle du Brut									
Référentiel :									
OPERATIONS D'USINAGE		OUTILLAGE		ELEMENTS DE COUPE					
Rép	Désignation	Outil de coupe	Vérificateurs	Vc m/mn	N tr/mn	Vf mm/mn	f mm/tr	A mm	Lc mm
10	Contrôle du brut		Réglet, pieds à coulisse au 1/50	30					Cf1 = 245
				30					
<p>Spécifications générales sauf indication particulières</p> <ul style="list-style-type: none"> - tolérance $\pm 0,2$ - Ra : 3.2 - Chanfrein 1.5X45° 									

IV.2 Coût de réalisation de notre séchoir

Nous allons dans cette partie évaluer les besoins en matière d'œuvre et en main d'œuvre afin d'estimer le coût de réalisation notre machine. A cet effet Nous allons nous servir des prix homologués sur le marché camerounais et appliquer une TVA de 19,25%. Le devis estimatif sera évalué sur la base de :

- ✓ Matériel ;
- ✓ Main d'œuvre (étude et réalisation) ;
- ✓ Recherches et divers.

Tableau devis estimatif du séchoir

Désignation	Unité	Qte	Prix unitaire (Fcfa)	Prix total (Fcfa)
A-Matériel				
Cornière CAE50× 50 × 5-6000	mm	4	25 278	101 112
Tôles lisse en acier 1000× 2000× 10/ 10	mm	10	20 526	205 260
Tôles lisse en alu 1000× 2000× 10/10	mm	10	26 340,6	263 406
Laine de verre (isolant thermique)	m ²	18	9 240	166 320
Tube rond en cuivre Ø30×2× 3000	mm	12	8 000	96 000
Tube en acier carré 30× 2-6000 creux	mm	4	10 612,8	4 245,2
Fer plat 40× 06-6000	mm	4	10 923	43 692
Boulons HM 12-35	-	50	300	15 000
Disque à couper	-	10	1 500	15 000
Peinture	Kg	8	3 000	24 000
Antirouille	Kg	4	2 000	8 000
Diluant synthétique	L	2	2 000	4 000
Motoréducteur DRN 80 MS2	-	1	120 000	120 000
Baguette de soudure Ø3,2	Paquet	4	15 000	60 000
Pignon double ISO16B2-24 dents	-	1	43 065	43 065
Pignon double ISO16B2-14 dents	-	1	25 502,4	25 502,4
Palier fonte SNI 517	-	2	54 007,8	54 007,8
Chaîne ISO16B2	m	2	21 369,48	42 738,96

Clavette 36× 12 × 8	-	1	1 201,2	1 201,2
Ventilateur VW450	-	2	205 240	410 480
Pistolet à peinture	-	1	43 494	43 494
Briques réfractaires 22× 11 × 6	cm	250	100	25 000
Filtre à air	-		2303,4	2303,4
Total A				1 771 524,56
B-Main d'œuvre				
		Nbr d'heures	Prix/heure de travail (Fcfa)	Prix total (Fcfa)
Main d'œuvre	-	30	13 000	390 000
Coût d'étude du projet	-	-	-	110 000
Total B				500 000
C-Divers				
Transport, amortissement et divers	-	-	-	120 000
Coût global A+B+C				2 391 524,56

Le coût global de l'équipement est ainsi évalué à **deux millions trois cent quatre-vingt-onze mille cinq cent vingt-cinq (2 391 525) Fcfa**.

IV.3 Guide d'utilisation de notre équipement

IV.3.1 III.1 Règle de sécurité

La réalisation de l'équipement ainsi que son utilisation doivent être fait 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 ;

- ✓ Placer l'équipement à l'abris des intempéries.

IV.3.2 Actions de maintenance

Pour le bon fonctionnement et le respect de la durée de vie de notre équipement, des opérations de maintenance préventive systématique devront être exécutées. Nous allons ainsi effectuer des opérations suivantes sur notre équipement.

- ✓ Nettoyage de l'équipement après usage ;
- ✓ Faire une maintenance préventive tous les 3 mois sur l'équipement ;
- ✓ Remplacement systématique du filtre à air après 500 cycles de séchage ;
- ✓ Lubrification des paliers après 1000 cycles de séchage avec un lubrifiant approprié ;
- ✓ Lubrification du motoréducteur après 100 cycles de séchage ;
- ✓ Renouvellement de la peinture une fois après tous les 4 ans ;

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Rendus au terme de notre travail qui portait sur : « **Etude et la réalisation d'un séchoir écologique des produits agricoles (séchage contrôlé, calibré et dynamique)** ». Il ressort que la solution proposée de produire la chaleur à l'aide de la combustion des coques de cacao pour le séchage des produits agricoles est concluante. L'air chaud produit dans la chambre de combustion est distribué dans la chambre de séchage, ladite chambre tournant à la vitesse de 26tr/minutes permet d'homogénéiser le séchage. Nous avons mené nos expériences sur un des produits agricoles dont la bonne qualité du produit repose principalement sur la qualité du séchage et permet ainsi de valoriser le produit sur le marché international : il s'agit des fèves de cacao dont le Cameroun est 5ième producteur mondial. Il ressort qu'avec notre équipement, nous réduisons drastiquement le temps de séchage dudit produit estimé ici à environ 15h au lieu de 7 à 15 jours pour le séchage artisanal tout en rassurant la bonne qualité du produit. Notons qu'un tel résultat a été obtenu par la combustion de 2 792,81 kg de cabosses de cacao sèche. Pour parvenir à ce résultat, nous avons mené une étude scientifique cohérente notamment grâce aux outils techniques tels que l'analyse fonctionnelle qui nous a permis d'établir un cahier de charges fonctionnelles qui regroupe les exigences et contraintes liées au séchage et à son environnement, d'adopter le modèle de séchoir à réaliser. Les logiciels AUTOCAD et SOLIDWORKS ont permis l'étude comportementale, le dimensionnement et la modélisation de la structure de notre équipement. Nous ne saurons dire ici que ce travail est exhaustif, il pourrait faire l'objet de nombreuses améliorations telles que :

- Le recyclage de l'air ;
- L'adaptation d'une unité Co-génératrice d'énergie ;
- Elaborer un plan de maintenance adapté au système ;
- L'installation d'un système asservi constitué principalement de : thermostat, ventilateur, électrovannes, limiteur de débit et d'un motoréducteur permettrait de mieux contrôler le séchage des produits. Nous restons à cet effet ouvert à toutes critiques et suggestions.

La vulgarisation de ce dispositif pour le séchage des produits agricoles contribuerait non seulement à mettre sur le marché des produits sec de bonne qualité mais aussi à accroître l'économie agricole camerounaise.

Nous avons rencontré d'énormes difficultés dans ces travaux : difficile accès à la documentation sur les coques de cacao, la collecte des informations, le manque de matériel idéal à la construction du dispositif.

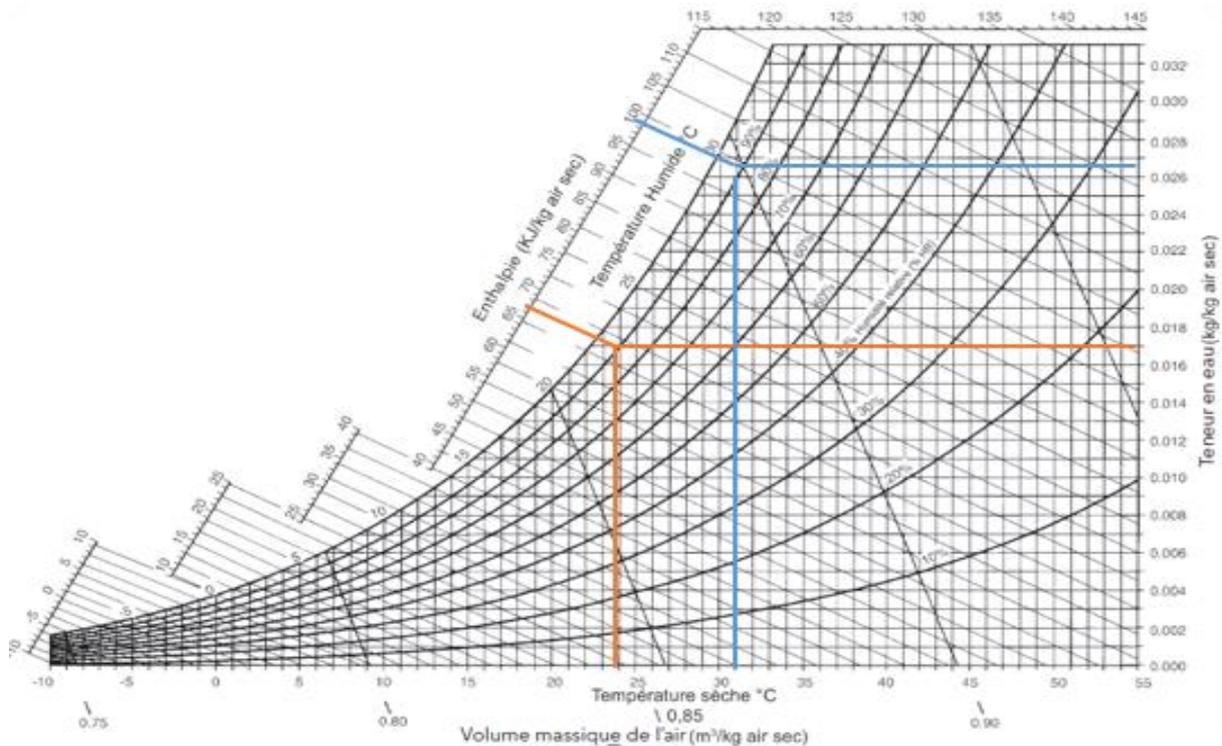
BIBLIOGRAPHIE

- [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
- [3].-ETAPA ETAPA MAXIME ET TCHINDA TSAGUE JULIOCE, conception et dimensionnement d'un sechoir industriel de feve de cacao, fgi cameroun 2015 (non publié).
- [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. & Cavaillé R. (1991). Opérations unitaires, Séchage, II. Appareillage et choix d'un procédé. *Techniques de l'ingénieur*, J 2482.1-J 2482.18.
- [7]. Schlünder E.U. (1989). On the mechanism of the constant drying rate period. *Drying 89*, Ed. A.S. Mujumdar, 226-229.
- [8]. Toei R. (1996). Theoretical fundamentals of drying operation. *Drying Technology*, (14(1), 1-194.
- [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. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 359-364.
- [11]. Ibrahim Doymaz, «Air dryng characteristics of tomatoes,,» *Journal of Food Engineering* 78, 2007.
- [12].A.A.EL-Sebaii, S.Abdoul-Enein,M.R.I.Ramadan, H.G.EI-Gohary, Empirical correlations for dryng kinetics of some fruits and vegetables *Energy*, 2002.
- [13]. D. P. (. Inci turk Togrul, «Mathematical modelling of solar dryer of apricos in thin layers,» *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.
- [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.
- [30]. https://www.chococlic.com/Le-sechage-des-feves-de-cacao_a136.html.
- [31]. https://conseils-thermiques.org/contenu/comparatif_isolants.p
- [32]. A. Dascalescu, le séchage et ses applications industriels, DUNOD, Paris-1969.
- [33] Marne Abdou DIAGNE. Conception d'un séchoir à cylindre rotatif pour les produits granulés à base de céréales (application au « Arrow »), UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR
- [34] Metho-i4403-Choix-Moteur-asynchrone.v114.odt - 12 mai 14 - Rév. 13

ANNEXES

Annexe 1 : Diagramme psychométrique



Annexe 2 : Abaque pour valeurs du coefficient d'échange de l'air

Géométrie et Orientation de la paroi	Coefficient de Convection laminaire h (W/m ² °C)	Dimension Caractéristique (m)
Plaque verticale dont la hauteur est inférieure à 30 cm (ou cylindrique verticale)	$h = 1,42 \left(\frac{\Delta\theta}{H} \right)^{0,25}$	H : hauteur de la plaque
Plaque verticale dont la hauteur est supérieure à 30 cm (ou cylindre vertical)	$h = 1,78 \Delta\theta^{0,25}$	
Cylindre horizontal	$h = 1,32 \left(\frac{\Delta\theta}{D_e} \right)^{0,25}$	De : diamètre extérieur du cylindre
Plaque horizontale chauffant vers le haut	$h = 1,32 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{0,25}$	L : largeur de la plaque
Plaque horizontale chauffant vers le bas	$h = 0,66 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{0,25}$	L : largeur de la plaque
Sphère	$h = \left(1,14 + \frac{0,17}{D} \right) \Delta\theta^{0,25}$	D : diamètre de La sphère

Annexe 3 : Abaque pour choix du moteur

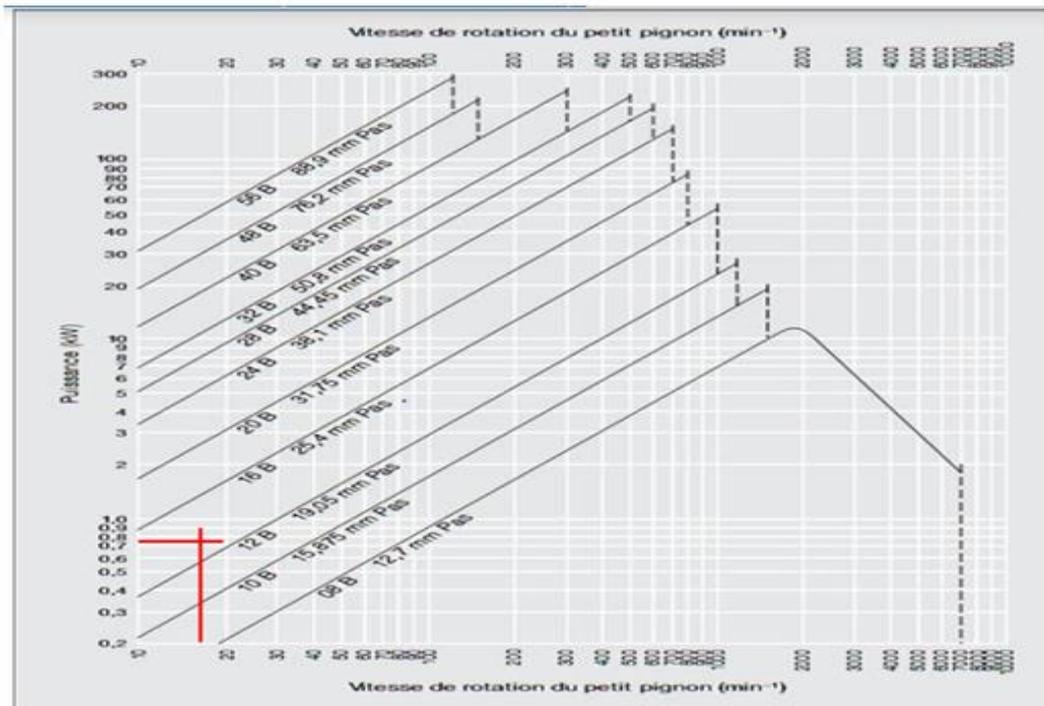
Type de moteur DRN..	P _N kW	M _N Nm	n _N tr/min	I _N 380 V A	cosφ	η _{50%} %	η _{75%} %	η _{100%} %	I _v /I _N	M _v /M _N M _v /M _N	M _K /M _N
DRN 80MS 2	0.75	2.5	2855	1.66	0.84	80.2	82.0	81.4	5.9	2.8 2.5	2.9
DRN 80M 2	1.1	3.65	2860	2.35	0.85	83.1	84.1	83.0	6.6	3.0 2.5	2.9
DRN 90S 2	1.5	4.95	2886	3.25	0.83	83.7	85.0	84.2	6.6	2.7 2.5	2.9
DRN 90L 2	2.2	7.2	2905	4.55	0.85	86.1	86.7	85.9	7.4	2.5 2.1	3.0
DRN 100LM 2	3	9.9	2894	6.1	0.85	88.9	88.7	87.2	7.7	3.3 2.6	3.5
DRN 112M 2	4	13	2948	7.9	0.86	88.1	88.7	88.1	10.6	2.9 1.3	3.3
DRN 132S 2	5.5	17.9	2935	9.9	0.92	90.3	90.2	89.2	10.0	3.0 2.1	3.7
DRN 132S 2	7.5	24.5	2936	14.8	0.85	90.6	90.8	90.1	9.6	3.3 2.0	3.4

Annexe 4 : Abaque pour facteur de service

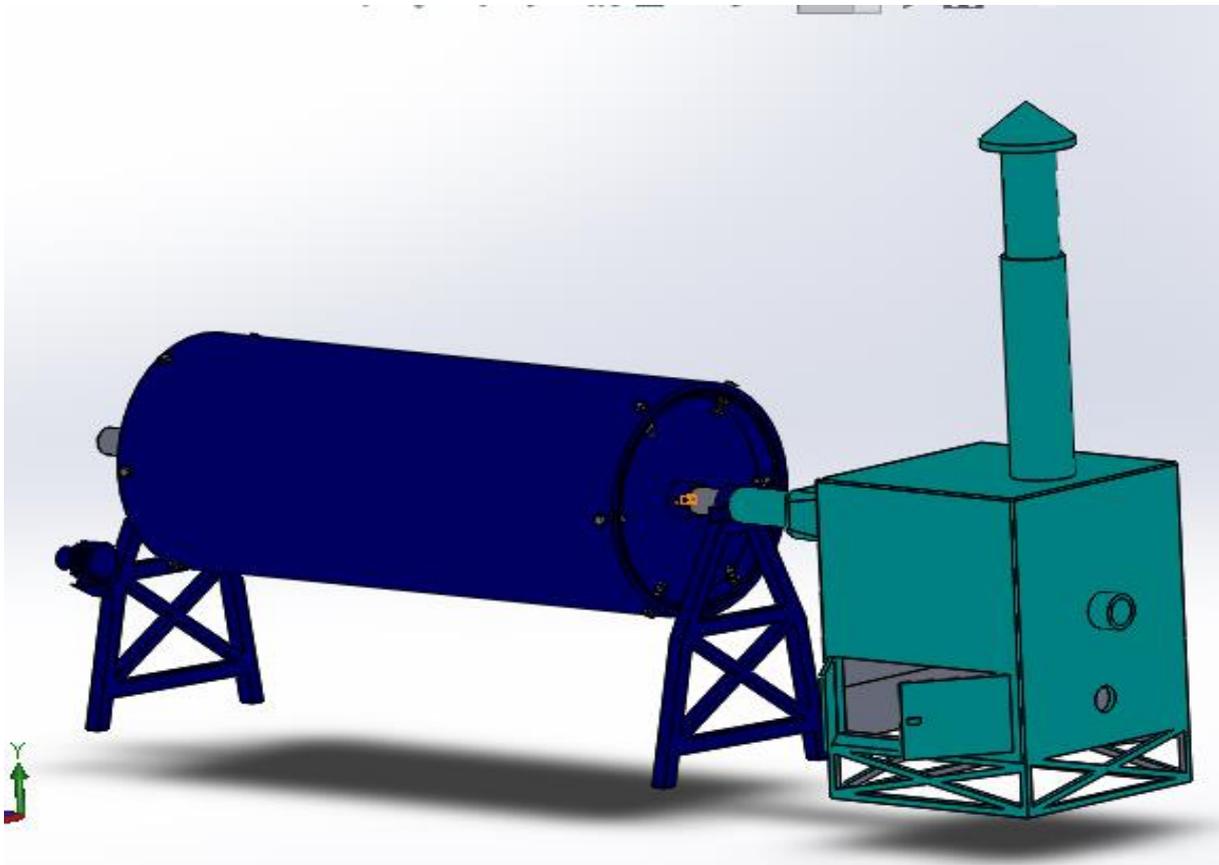
Tableau 15.9 — Facteur de service K_s

Type de machine entraînée	Type de moteur		
	Moteur à combustion interne avec transmission hydraulique	Moteur électrique ou turbine	Moteur à combustion interne avec transmission mécanique
Agitateur (produit liquide)	1,0	1,0	1,2
Broyeurs et concasseurs	1,4	1,5	1,7
Compresseurs			
— centrifuges	1,2	1,3	1,4
— à pistons			
3 cylindres et plus	1,2	1,3	1,4
1 ou 2 cylindres	1,4	1,5	1,7
Convoyeurs et élévateurs			
— charge ou alimentation uniforme	1,0	1,0	1,2
— charge ou alimentation non uniforme	1,2	1,3	1,4
Cribles	1,2	1,3	1,4
Génératrices	1,0	1,0	1,2
Grues	1,2	1,3	1,4
Machinerie générale			
— charge uniforme	1,0	1,0	1,2
— charge modérée ou avec chocs modérés	1,2	1,3	1,4
— chocs sévères, renversement de la charge, conditions difficiles	1,4	1,5	1,7
Pompes			
— centrifuges	1,0	1,0	1,2
— à pistons (3 cylindres ou plus)	1,2	1,3	1,4
Ventilateurs	1,0	1,0	1,2

Annexe 5 : Abaque pour Choix de la chaine



Annexe 6 : vue 3D du dispositif de séchage



Annexe 7 : phases de fabrication du séchoir



Annexe 8 : chambre de séchage

