



**DIRECTION DES ETUDES ET DES SERVICES
ACADEMIQUES**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES D'INGENIEUR
DE L'EQUIPEMENT RURAL**

Présenté par :

Aly Sané NIANG

Thème :

**Utilisation d'énergies renouvelables et amélioration
de la qualité des produits agroalimentaires séchés
au Burkina Faso**

MEMBRES DU JURY

- | | |
|----------------------|-----------|
| 1. Yézouma COULIBALY | Président |
| 2. Michel RIVIER | Encadreur |
| 3. Francis SEMPORE | Encadreur |
| 4. Mireille BARBIER | Encadreur |
| 5. Joël BLIN | Membre |

**UTER: Génie Industriel
et Energétique (G.E.I)**

juin, 2006

Dédicaces

A

❖ La mémoire de ma regrettée mère Adja Diarra Ndiaye, arrachée à mon affection

L'année dernière au cours de ma formation à l'EIER. Elle représentait beaucoup pour moi et s'est beaucoup investie pour mon éducation.

❖ La mémoire de mon regretté père qui fut un guide pour moi

Que le bon Dieu les accueille dans son paradis.

❖ Ma chère Diarra et sa maman Sokhna qui m'ont été d'un grand soutien moral

❖ Ma chère Khady qui a cheminé avec moi durant mon séjour à Ouagadougou

❖ Ma grande famille, en particulier mes frères et sœurs sans oublier ma belle famille

❖ Ibrahima KONATE et Mme de L'UEMOA chez qui je me suis senti en famille

durant tout mon séjour à Ouagadougou

❖ Mes amis et tous ceux qui ont partagé avec moi les moments inoubliables que j'ai

passés au Burkina Faso

Remerciements

Ce travail de mémoire est le fruit de la coopération entre le GEE et le CIRAD. Que les responsables de ces institutions trouvent ici l'expression de mes remerciements.

Je tiens à remercier particulièrement M. Michel RIVIER qui, grâce à sa disponibilité, son engagement dans mon travail et ses orientations, m'a permis de mener à bien ce travail.

Je remercie aussi M. Francis SEMPORE qui a été toujours disposé à m'écouter et à me guider dans mon travail.

Mes remerciements vont aussi vers Mme Mireille BARBIER qui s'est investie pour la bonne marche des analyses des paramètres de qualité des produits, l'interprétation des phénomènes expliquant les résultats et la mise à disposition d'une documentation qui m'a été d'un grand apport.

Je n'oublie pas M. Hamidou NAMATA qui m'a accompagné dans beaucoup de mes déplacements en entreprise.

Au niveau des unités de transformation, mes remerciements s'adressent à Mme Assétou TRAORE et Mme Djama DADIOARI qui m'ont accueilli dans leurs entreprises.

Je remercie enfin tous ceux qui, de près ou de loin, ont apporté leur contribution à ce travail. Je pense à Mme Claire Mouquet-Rivier qui n'a pas hésité à mettre sa balance à ma disposition lors de mes déplacements en entreprise, à M. Byll qui m'a assisté dans mes analyses de laboratoire, à Mme Sawadogo, Michel et Julienne pour leur disponibilité lors de mes analyses au DTA de l'IRSAT.

Je n'oublie pas le personnel du GEE et l'ensemble du corps professoral pour leur contribution à ma formation. Je citerai particulièrement M. Yézouma Coulibaly qui m'a initié à la biomasse-énergie.

AUTEUR : NIANG Aly Sané

Encadreurs : Michel RIVIER
Francis SEMPORE
Mireille BARBIER

Organismes encadreurs : CIRAD, GEE

THEME

Utilisation d'énergies renouvelables et amélioration de la qualité des produits agroalimentaires séchés au Burkina Faso.

RESUME

Devant la flambée des prix du pétrole sur le marché international et les pertes en aval de la production constatées au niveau de sa filière agricole, le Burkina Faso n'a d'autres choix, pour mieux valoriser ses produits agricoles, que de mettre en place des équipements de séchage fiables, adaptés au contexte local et utilisant des sources d'énergie maîtrisées.

Deux filières font l'objet de la présente étude : les produits roulés transformés pour satisfaire une demande locale et la mangue séchée destinée essentiellement à l'exportation.

Pour la filière « produits roulés », les diagrammes de transformation suivis au niveau de deux unités ayant des techniques de séchage différentes (séchage sur table à l'air libre pour le dégué et la bouillie et séchage avec le séchoir Atesta pour le dégué) ont permis d'arriver aux conclusions suivantes :

Le séchoir Atesta, formé de deux cellules ayant chacune 10 claies dont 9 sont ici utilisées, permet de sécher, en 18 h, environ 90 kg de dégué à 44% de teneur en eau initiale, en consommant près de 7 kg de gaz butane. Le produit séché a une masse de 55 kg ce qui signifie que lors du séchage 35 kg d'eau ont été évacuées soit une vitesse de séchage moyenne de près de 2 kg/h. Sa teneur en eau finale de 8 % fait que les conditions de sa conservation sont réunies mais pour économiser la consommation d'énergie, il est souhaitable de ramener le produit à la teneur en eau maximale de bonne conservation qui est de 12%, en diminuant par exemple le temps de séchage.

Les puissances développées varient de 9,5 kWth, au tout début du séchage, à 2,17 kWth vers la fin de l'opération. Partant de ces résultats, une puissance de dimensionnement de 8 kWth, soit 4 kWth par cellule, est proposée pour le séchage des produits roulés.

Pour les mangues séchées, les études déjà faites sur la filière donnent, sur Atesta, les résultats moyens consignés dans le tableau ci-dessous :

Masse de pulpe de mangue dans le séchoir	100 kg
Humidité initiale	83 %
Temps de séchage	20 h
Humidité finale du produit	15 %
Masse de produit séché obtenue	20 kg
Quantité d'eau évacuée	80 kg
Puissance maximale requise	20 kW

Le séchage se fait en deux étapes distinctes :

- La phase d'évacuation de l'eau libre à environ 80°C
- La phase suivante d'évacuation de l'eau libre à plus basse température (40°C)

Pour le séchage des produits roulés à l'air libre, on a obtenu un produit fini de même niveau de teneur en eau mais avec des conditions climatiques très favorables (air chaud et sec), ce qui ne sera pas toujours le cas. La durée de séchage trop longue (plus de 24 h) et les fortes teneurs en eau en amont du séchage offrent un cadre propice au développement des microorganismes. En effet, des expériences de laboratoire ont permis de prouver que les produits issus du séchage solaire à l'air libre sont de qualité microbiologique moindre que ceux obtenus avec le séchoir Atesta.

Le rendement énergétique du séchoir Atesta étant assez faible (autour de 30%), des améliorations, notamment l'intégration de la convection forcée, sont nécessaires.

Les niveaux de puissance requis durant le séchage à l'Atesta permettent de substituer le gaz à la biomasse dans ces unités. Les ressources, à travers par exemple les tiges de cotonnier ou la balle de riz, existent et les technologies sont éprouvées. Le couplage solaire/biomasse est envisagé pour limiter les puissances de dimensionnement pour la seule biomasse car le solaire pourrait servir soit à relayer la combustion de la biomasse après la phase de démarrage du séchage plus exigeante en puissance (phase d'évacuation de l'eau libre) soit à préchauffer l'air de séchage. Un cahier de charges fonctionnel est présenté pour mettre en place ces équipements de séchage.

Mots clés : produits roulés, mangue, énergie renouvelable, biomasse, séchage de produits alimentaires.

Table des matières

DEDICACES	I
REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIERES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTES DES FIGURES	VII
LISTES DES PHOTOS	VIII
SIGLES ET ABBREVIATIONS	IX
INTRODUCTION.....	1
CONTEXTE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS.....	2
1. PREMIERE PARTIE : LE SECHAGE DES PRODUITS ALIMENTAIRE	5
1.1. GENERALITES SUR LE SECHAGE.....	6
1.2. LES PRINCIPES DU SECHAGE.....	6
1.3. LES DIFFERENTES PHASES DU SECHAGE	7
1.4. FACTEURS CONDITIONNANT LE SECHAGE	8
1.5. LES PERTES DE QUALITE SOUVENT OBSERVEES LORS DU SECHAGE	8
1.6. LES EQUIPEMENTS DE SECHAGE UTILISES AU BURKINA FASO	11
2. DEUXIEME PARTIE : LES PRODUITS ROULES AU BURKINA FASO	21
2.1. TRANSFORMATION DES PRODUITS ROULES : CAS DU DEGUE ET DE LA BOUILLIE	22
2.2. QUALITE DES PRODUITS ROULES.....	32
2.2.1. Définition	32
2.2.2. Les critères de qualité	32
2.3. ÉTUDE EXPERIMENTALE DU SECHAGE	35
2.3.1. Essais en condition de production	35
2.4. ANALYSE DE LA QUALITE DES PRODUITS ROULES DANS LE PROCESSUS DE FABRICATION	56
2.4.1. Qualité sanitaire	58
2.4.2. Qualités organoleptiques.....	61
2.4.3. Evolution des teneurs en eau	63
2.5. QUELQUES RECOMMANDATIONS VISANT A AMELIORER LA PRATIQUE DE LA TRANSFORMATION DES PRODUITS ALIMENTAIRES	64
2.6. TYPOLOGIE DES ENTREPRISES DE TRANSFORMATION DES PRODUITS ROULES	66
3. TROISIEME PARTIE : LES MANGUES SECHEES.....	68
3.1. GENERALITES SUR LA MANGUE	69
3.2. LES PRINCIPALES ETAPES DANS LA FABRICATION DES MANGUES SECHEES ET LES PRECAUTIONS IMPORTANTES A PRENDRE	71
3.3. LE SECHAGE DE LA MANGUE.....	76
3.4. QUALITE DE LA MANGUE SECHEE	77
3.4.1. Qualité recherchée pour le produit fini.....	77
3.4.2. Impact du séchage sur la qualité de la mangue.....	78
3.5. TYPES DE SECHOIRS UTILISES.....	79
3.6. BESOINS ENERGETIQUES.....	79
3.7. COÛTS ENERGETIQUES	80
3.8. TYPOLOGIE DES ENTREPRISES	80
4. QUATRIEME PARTIE : INNOVATIONS DANS LE DOMAINE DU SECHAGE	83
4.1. UTILISATION DE SOURCES D'ENERGIE ALTERNATIVES	84
4.1.1. Les énergies renouvelables	84
4.1.2. La biomasse	85
4.1.3. L'énergie solaire.....	89
4.1.4. Couplage solaire/biomasse	89
4.2. PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT D'UNITES DE SECHAGE	93
4.2.1. Développement des séchoirs.....	93
4.2.2. Cahier des charges fonctionnel pour les équipements de produits roulés	95

4.2.3.	<i>Cahier des charges fonctionnel pour les équipements de mangues séchées.....</i>	<i>98</i>
CONCLUSION GENERALE		100
BIBLIOGRAPHIE.....		102
5.	<u>CINQUIEME PARTIE</u> : ANNEXES.....	103

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Avantages et inconvénients du séchoir Atesta.....	12
Tableau 1-2 : Avantages et inconvénients du séchoir coquillage	13
Tableau 1-3 : Avantages et inconvénients du séchoir gaz type cartier.....	15
Tableau 1-4 : Avantages et inconvénients du séchoir semi industriel à déshumidification	19
Tableau 1-5 : Avantages et inconvénients du séchoir semi continu type ITDG	20
Tableau 2-1 : Quelques spécifications requises pour la farine et semoule de mil	35
Tableau 2-2 : Vitesses de séchage des produits.....	38
Tableau 2-3 : Evolution des teneurs en eau	39
Tableau 2-4 : Suivi de la température et de l'humidité au cours du séchage	43
Tableau 2-5 : Evolution de la masse du produit sur les différentes claies.....	45
Tableau 2-6 : Teneurs en eau H sur les différentes claies séchées.....	46
Tableau 2-7 : Suivi de la claie 5 lors du séchage	47
Tableau 2-8 : Consommations d'énergie.....	48
Tableau 2-9 : Rendement énergétique du séchage.....	48
Tableau 2-10 : Evolution de la puissance au cours du séchage.....	49
Tableau 3-1 : Données expérimentales	79
Tableau 3-2 : Résultats expérimentaux des essais sur la mangue	80
Tableau 3-3 : Coût d'énergie par kilogramme de matière sèche	80
Tableau 3-4 : Types et nombre de séchoirs dans les différentes unités	81
Tableau 4-1 : Caractéristiques des séchoirs les plus utilisés au Burkina Faso	93
Tableau 4-2 : Caractérisation des fonctions pour le cas des équipements de produits roulés	97
Tableau 4-3 : Caractérisation des fonctions pour le cas des équipements de manges séchées	99

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma des échanges de chaleur et de matière lors d'un séchage par entraînement	6
Figure 1.2 : les différentes phases du séchage	8
Figure 1.3 : Séchoir Atesta	11
Figure 1.4 : Un séchoir coquillage	12
Figure 1.5 : Schéma d'un séchoir à gaz type cartier.....	14
Figure 2.1 : Diagramme de transformation primaire de l'unité A.....	23
Figure 2.2 : Diagramme de transformation primaire de l'unité B.....	24
Figure 2.3 : Diagrammes de transformation secondaires des unités A et B	25
Figure 2.4 : Bilan matière et teneurs en eau de la transformation du mil en dégué de l'unité A.....	26
Figure 2.5 : Durées des opérations unitaires de la fabrication du dégué de l'unité A.....	27
Figure 2.6 : Bilan matière et teneurs en eau de la transformation du mil en dégué de l'unité B.....	28
Figure 2.7 : Durées des opérations unitaires de la fabrication du dégué de l'unité B.....	29
Figure 2.8 : Bilan matière et teneurs en eau de la transformation du mil en bouillie de l'unité B	30
Figure 2.9 : Durées des opérations unitaires de la fabrication de la bouillie de l'unité B	31
Figure 2.10 : Schéma du séchoir avec la disposition des claies.....	44
Figure 2.11 : Rapport de séchage sur les différentes claies.....	45
Figure 2.12 : Evolution des teneurs en eau sur les claies durant le séchage	46
Figure 2.13 : Evolution de la masse sur la claie témoin	47
Figure 2.14 : Charge microbiologique du dégué au niveau des deux unités	59

<i>Figure 2.15 : Charge microbiologique de la bouillie issue de l'unité B.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 2.16 : Evolution de la charge microbienne au niveau de l'unité A.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 2.17 : Evolution des teneurs en eau durant le processus de transformation.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 2.18 : Synthèse du séchage des produits roulés sur un Atesta.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 3.1 : Principales zones de production de la mangue.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 3.2 : Comparaison des variétés Amélie, Kent et Brooks</i>	<i>71</i>
<i>Figure 3.3 : Evolution de la masse de la mangue durant le processus de transformation</i>	<i>75</i>
<i>Figure 3.4 : Evolution de l'air de séchage</i>	<i>76</i>
<i>Figure 3.5 : Synthèse du séchage des mangues sur Atesta</i>	<i>82</i>
<i>Figure 4.1 : Utilisation de la biomasse dans la première phase de séchage</i>	<i>91</i>
<i>Figure 4.2 : Utilisation du solaire dans la deuxième phase de séchage</i>	<i>92</i>
<i>Figure 4.3 : Relations entre le séchoir de produits roulés et les éléments de son environnement.....</i>	<i>96</i>
<i>Figure 4.4 : Relations entre le séchoir de mangues et les éléments de son environnement</i>	<i>98</i>

Liste des photos

<i>Photo 1-1 : Séchoir solaire tunnel.....</i>	<i>16</i>
<i>Photo 1-2 : Séchoir solaire Banco</i>	<i>17</i>
<i>Photo 1-3 : Séchoir semi industriel à déshumidification.....</i>	<i>17</i>
<i>Photo 2-1 : Séchoir table.....</i>	<i>37</i>
<i>Photo 2-2 : Mise en place de la toile</i>	
<i>Photo 2-3 : Etalage de la bouillie sur la toile</i>	<i>37</i>
<i>Photo 2-4 : Séchage dans la pièce</i>	
<i>Photo 2-5 : Séchage à l'air libre dans la cour</i>	<i>38</i>
<i>Photo 2-6 : Granules de Dégué de l'unité B</i>	
<i>Photo 2-7 : Granules de dégué de l'unité A</i>	<i>62</i>
<i>Photo 4-1 : Bagasse destinée à la combustion</i>	<i>89</i>

Sigles et abréviations

- PIB** : Produit Intérieur Brut
- PCI** : Pouvoir Calorifique Inférieur
- U V** : Ultra Violet
- CEAS** : Centre Ecologique Albert Schweitzer
- ER** : Energies Renouvelables
- CFU** : Colonie Format Unité
- IRSAT** : Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies
- DTA** : Département Technologie Alimentaire
- CNRST** : *Centre National de Recherche Scientifique et Technologique*
- CIRAD** : *Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement*
- GEE** : *Groupe des Ecoles EIER-ETSHER*
- CILSS** : *Comité Inter Etats de Lutte contre le Sécheresse au Sahel*

Introduction

Depuis quelques années, l'épuisement progressif des ressources d'énergie fossile, leur renchérissement continu et les contraintes environnementales grandissantes (effet de serre) ont conduit l'ensemble des pays de la planète, particulièrement les pays non producteurs de pétrole comme le Burkina Faso à rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement. Cette tendance s'accélère et semble devenue irréversible depuis que le prix du baril de pétrole a atteint la barre des 75 dollars il y a quelques semaines. Les énergies renouvelables, abondantes, propres et inépuisables répondent à ces enjeux, d'autant plus que ces Etats restent fortement dépendants du marché international.

Le thème de mes travaux de mémoire : « Utilisation d'énergies renouvelables et amélioration de la qualité des produits agroalimentaires séchés au Burkina Faso » montre qu'une prise de conscience, sur la nécessité d'exploiter au mieux ces « énergies de l'avenir », est entrain d'être faite.

L'étude portera sur le séchage des mangues et des produits roulés. Concernant les produits roulés, les granules de dégué et de bouillie, produits très présents dans l'alimentation des ménages du Burkina Faso et issus de la transformation du mil, seront concernés.

Ce rapport, sur la base d'une revue bibliographique, des essais en entreprise et des analyses de laboratoire passera en revue les technologies de séchage existantes au Burkina Faso, fera l'identification des diagrammes de transformation sur les produits alimentaires étudiés et évaluera leur qualité tout au long de leur processus de transformation afin de proposer des améliorations.

Contexte de l'étude et objectifs

Le Burkina Faso, comme bien d'autres pays de la sous région, a une économie essentiellement basée sur l'agriculture. Ce secteur emploie plus de 86% des actifs, procure 50% des recettes totales d'exportation et contribue pour environ 35% à la formation du PIB. Il s'agit d'une agriculture de subsistance basée avant tout sur les cultures vivrières (mil, sorgho, maïs, riz) qui occupent l'essentiel des superficies cultivées (Abesf, 2001) mais on assiste aussi à un développement spectaculaire des cultures de rente (coton, amande de cajou, karité, sésame,...) destinées en grande partie à l'exportation. Avec une production annuelle de près de 700 000 tonnes, le Burkina Faso est devenu aujourd'hui le premier producteur africain de coton graine. Sa production céréalière en fait l'un des plus gros producteurs des pays du sahel. Les résultats prévisionnels de la campagne agricole 2005/2006 publiés par le CILSS indiquent pour le Burkina Faso une production céréalière totale de 4 064 648 tonnes. Cette production est en hausse de 40% par rapport à la campagne précédente et de 36% comparativement à la moyenne des cinq dernières années (Rapport mensuel de la sécurité alimentaire, janvier 2006).

Malgré ces progrès notoires, beaucoup d'efforts restent à faire pour valoriser au mieux ces produits agricoles afin d'atteindre des objectifs de développement durable. En effet, on assiste à beaucoup de pertes en aval de la production, souvent par manque d'unités de transformation. Et si elles existent, les coûts de production restent trop élevés et constituent un véritable facteur limitant pour les entreprises.

Pour la mangue fraîche, les quantités produites sont assez importantes : pour une production fruitière estimée à 287 407 tonnes, les mangues en représentent 56% soit plus de 160 000 tonnes (Cirad-amis DOC n° 36/04, septembre 2004). Mais le caractère saisonnier du produit fait qu'une grande partie de la production « pourrit », entraînant par la même occasion un manque à gagner très important, et pour les producteurs, et pour l'économie nationale.

En ce qui concerne les céréales, l'urbanisation galopante a entraîné des changements dans les habitudes alimentaires ; les gens ont de moins en moins de temps pour les transformer à la maison suscitant du coup un important marché local de produits céréaliers transformés. Beaucoup d'unités dites « semi industrielles » ont vu le jour pour répondre à cette demande de plus en plus importante mais aussi de plus en plus exigeante en terme de qualité.

L'une des solutions les plus fiables à la conservation des mangues mais aussi de valorisation des produits céréaliers reste le séchage.

Quelques modèles de séchoir ont vu le jour et équipent déjà certaines unités de production de mangues et de produits roulés séchés, bien que les technologies efficaces de séchage restent très peu développées. Le séchage traditionnel des produits à l'air libre au rayonnement solaire est largement utilisé avec tous les risques sanitaires qu'il comporte. Pour les séchoirs « plus ou moins adaptés » dans les entreprises agroalimentaires, la contrainte principale reste le coût de l'énergie : le gaz est le plus souvent utilisé. Son prix est aujourd'hui subventionné par le gouvernement burkinabé à environ 60%. Et comme ce prix sur les marchés internationaux est indexé sur celui du pétrole, produit qui coûte de plus en plus cher (et qui est sujet à beaucoup de spéculations), on peut s'attendre à des augmentations importantes (au Mali par exemple, la bouteille de 12 kg est à 12.000 Fcfa pour un prix de 4.000 Fcfa au Burkina). Il est alors devenu urgent et même « vital » pour le Burkina Faso mais aussi pour l'ensemble des pays en développement non producteurs de pétrole, de régler cet épineux problème énergétique de façon durable. L'utilisation de la biomasse et/ou du solaire apparaît comme une alternative fiable à ces énergies conventionnelles. La ressource est disponible, mais n'est pas suffisamment explorée.

Le Burkina Faso produit beaucoup de biomasse à travers les tiges de coton, les coques d'arachide et de karité, la balle de riz, les noyaux de mangue, etc. Et souvent, ces produits, non seulement ne sont pas valorisés mais constituent souvent des charges pour les entreprises qui les rejettent. Il faudra cependant veiller pour leur exploitation à se conformer aux conventions internationales relatives à la protection de l'environnement. En plus, le pays, de par sa situation géographique, est sujet à un ensoleillement important d'où l'intérêt d'exploiter le solaire qui reste une énergie « propre et inépuisable ».

Le projet « Utilisation d'énergies renouvelables et amélioration de la qualité des produits agroalimentaires séchés au Burkina Faso », financé par le Fonds de Solidarité Prioritaire (FSP Recherche) du Ministère français des Affaires Étrangères, répondra certainement à beaucoup de ces préoccupations. Il a pour objectif général d'améliorer la compétitivité du secteur de la transformation des produits agricoles nationaux par la mise en place de systèmes énergétiques performants et fiables sur des équipements de transformation appropriés. Ce projet met à contribution une équipe mixte de recherche composée de chercheurs du CNRST, du CIRAD, et du GEE et se fera en plusieurs activités spécifiques dont les résultats doivent permettre d'atteindre les objectifs fixés.

La présente étude porte sur la première activité intitulée « Analyse du besoin par filière et type de procédé ». Sous la principale responsabilité du CIRAD, elle vise, à terme, les objectifs suivants :

- Recenser les techniques de séchage de mangues et de certains produits granulés existants au Burkina Faso et d'élaborer une typologie par secteur et par produit ;

- Analyser les risques de dégradation et/ou de contamination des matières premières jusqu'au produit final
- Elaborer un cahier des charges fonctionnel pour le dimensionnement des installations de séchage et de fourniture d'énergie

Mais, les objectifs spécifiques assignés à ce stage concernent, pour les deux filières (produits roulés et mangues séchées):

- L'identification des diagrammes de transformation sur les produits étudiés
- L'identification des consommations énergétiques globale et par phase de séchage (le cas échéant).
- L'identification des entreprises à travers le nombre et le type d'équipements de séchage installés.
- L'identification des critères déterminant la qualité des produits selon les transformateurs : couleur, forme, rhéologie du produit, etc.
- L'analyse de l'impact des techniques de séchage existantes dans les deux filières sur la qualité sensorielle et sanitaire des produits.

1. Première partie : Le séchage des produits alimentaires

1.1. Généralités sur le séchage

Le séchage est une opération ayant pour but d'éliminer de l'eau d'un corps humide (solide ou liquide) par évaporation de cette eau ; le produit final obtenu étant toujours un solide (Bimdenet J., 1984)

C'est l'un des procédés les plus anciens utilisés pour la conservation des aliments ; il permet, par abaissement de l'activité de l'eau du produit (voir fiche en annexe 4), de le stabiliser. En effet, dans les aliments déshydratés, du fait de la faible activité de l'eau, les microorganismes ne peuvent pas proliférer, et la plupart des réactions chimiques et enzymatiques de détérioration sont ralenties (Cheftel, 1976)

1.2. Les principes du séchage

Deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire par évaporation l'eau d'un produit : l'ébullition ou l'entraînement. L'idée la plus simple consiste à porter le produit à la température d'ébullition de l'eau qui ainsi se vaporise. Mais sécher à des températures basses, en utilisant l'air comme gaz d'entraînement, est souvent préférable pour éliminer une grande quantité d'eau tout en préservant la qualité nutritionnelle du produit (Bimbenet, Duquenoy, Trystram, 2002).

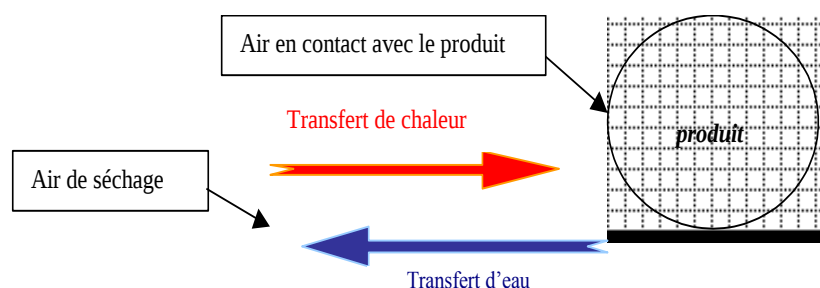
Le séchage par entraînement est utilisé pour le séchage des produits alimentaires que nous étudions.

➤ Le séchage par entraînement

Il consiste à placer un produit humide dans un courant d'air suffisamment chaud et sec. Il s'établit un écart de température et de pression partielle de vapeur d'eau tel que :

- L'air apporte au produit l'énergie nécessaire à la vaporisation de son eau
- L'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet de la différence de pression de vapeur d'eau entre l'air et la surface du produit.

Figure 1.1 : Schéma des échanges de chaleur et de matière lors d'un séchage par entraînement



Source : (Bimbenet, Duquenoy, Trystram, 2002).

1.3. Les différentes phases du séchage

On distingue communément trois phases pendant le séchage d'un produit. Ces trois phases ont des durées respectives très dépendantes de la structure du produit (voir figure 1.2)

- Phase 1 : Lorsqu'un produit est introduit dans un séchoir, sa température va tout d'abord s'équilibrer de telle sorte qu'après cette phase de mise en température, sa température sera la température humide (θ_h) de l'air de séchage .
- Phase 2 : S'en suit une période pendant laquelle la température du produit est stationnaire et égale à θ_h . Pendant cette phase la vitesse de séchage est constante et la quantité de chaleur apportée par l'air au produit est totalement absorbée par la vaporisation de l'eau :

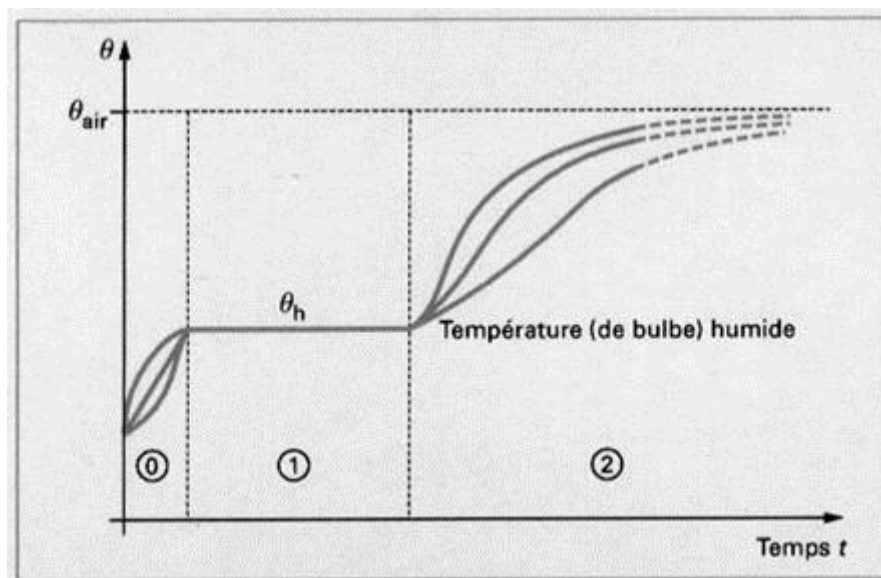
$Q = m \cdot \Delta H_v$ avec ΔH_v l'enthalpie de vaporisation (énergie latente de vaporisation)

Cette période n'existe que tant que la surface du produit est alimentée en eau par l'intérieur. Elle correspond à l'évaporation de l'eau libre.

La vitesse de séchage peut être accélérée soit en réchauffant davantage la température de l'air avant son arrivée sur le produit soit en augmentant la vitesse de circulation de l'air au niveau du produit. Il est important de savoir que l'augmentation de la température de l'air de séchage est limitée par la nature du produit à sécher (sa thermo sensibilité).

- Phase 3 : Le séchage est caractérisé par une dernière période dite de ralentissement. Elle intervient quand la surface en contact avec l'air s'appauvrit en eau, le surplus de chaleur cédé par l'air provoque l'augmentation de température de la surface puis de l'ensemble du produit.

Cette phase correspond à l'évaporation de l'eau liée. Si, durant cette phase, on maintient le débit de l'air et sa température, le produit peut voir sa température admissible dépassée ce qui entraîne sa dégradation. Il faut alors veiller à ce que cette situation n'arrive pas en contrôlant l'augmentation de la température du produit.

Figure1.2: les différentes phases du séchage

Source : www.u-bourgogne.fr,TP

1.4. Facteurs conditionnant le séchage ¹

De nombreux facteurs interviennent au cours du séchage, déterminant sa rapidité et la qualité du produit obtenu :

- La température de l'air ou de la surface chauffante, en contact avec l'aliment
- L'humidité de l'air
- La vitesse de circulation d'air permettant l'évacuation de la vapeur d'eau formée
- Les caractéristiques du produit (composition, texture, épaisseur, surface)

1.5. Les pertes de qualité souvent observées lors du séchage

Des réactions biochimiques et physico-chimiques sont souvent à l'origine de la perte de qualité des produits séchés. Parmi elles, on distingue :

1.5.1. Le brunissement enzymatique ²

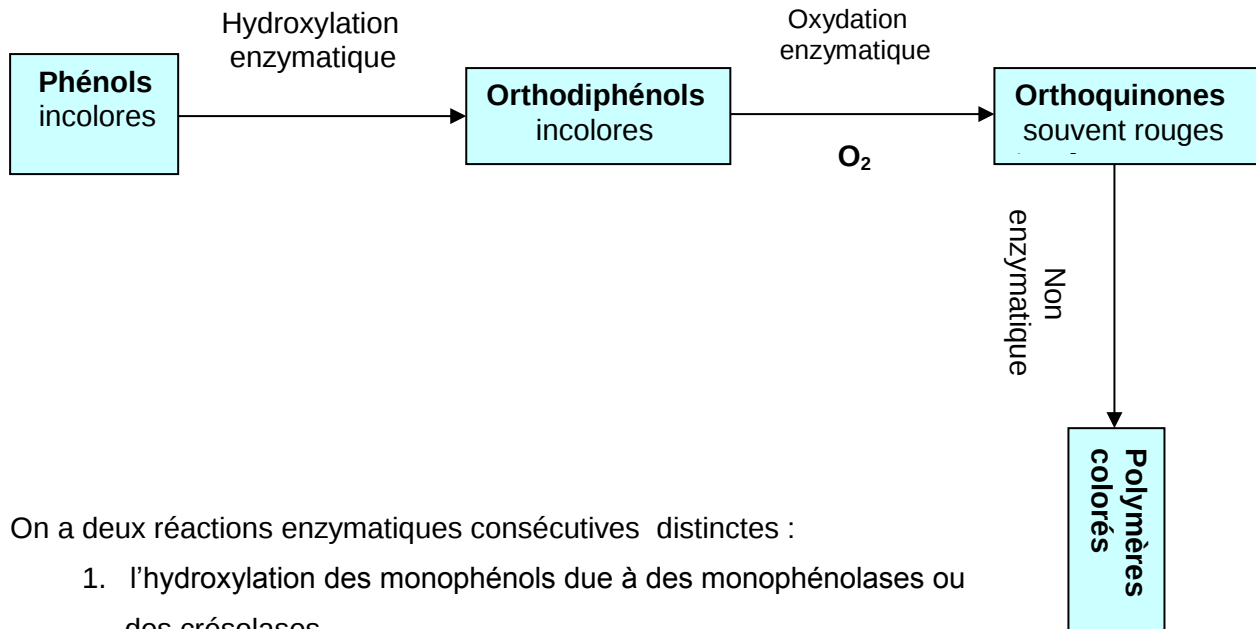
Le brunissement enzymatique correspond à la transformation de composés phénoliques en polymères colorés, le plus souvent bruns-rouges ou noirs, par le biais d'enzymes. Il s'observe alors souvent chez les végétaux riches en composés phénoliques et pose des problèmes de coloration indésirables.

¹ Cours de technologie alimentaire, Formation d'Ingénieurs 3^e année du GEE, Michel RIVIER, Cirad, 2005

² Cours de technologie alimentaire, Formation d'Ingénieurs 3^e année du GEE, Claire Mouquet-RIVIER, IRD, 2005

Les pigments qui se forment sont désignés par le terme général de mélanines ; leur teinte finale est brune ou noire mais des couleurs intermédiaires existent (rose, rouge).

- Les différentes étapes de la réaction :



On a deux réactions enzymatiques consécutives distinctes :

1. l'hydroxylation des monophénols due à des monophénolases ou des crésolases.
2. l'oxydation des diphénoles due à des molyphénoloxydases, des polyphénolases ou des catécholases.

Ces enzymes et leurs substrats sont généralement localisés dans des compartiments tissulaires distincts, séparés par des membranes diverses donc la réaction ne se produit que lorsque les tissus végétaux ont subi des altérations causées notamment par des mécanismes physiques comme des chocs ou des ruptures de tissus (cas des cristaux de glace lors d'une congélation mal maîtrisée) qui permettent leur mise en contact.

Le brunissement enzymatique est favorisé par l'oxygène, par un pH compris entre 5 et 7 et par des blessures du produit.

Quelques actions pour prévenir le brunissement enzymatique

- Inactiver les enzymes par des traitements thermiques comme le blanchiment
- Addition de composés réducteurs (acide ascorbique) qui transforment les quinones en phénols ;
- Immersion des aliments (fruits), après pelage et découpe, dans de l'eau légèrement salée ou additionnée de saccharose ou glucose pour limiter l'accès de l'oxygène au tissu végétal.
- Abaissement du pH pour ralentir le brunissement enzymatique

1.5.2. Le brunissement non enzymatique

Le brunissement non enzymatique ou « réaction de maillard » est un ensemble très complexe de réactions aboutissant à la formation de pigments bruns ou noirs (mélanoidines) et à des modifications d'odeur et de saveur, favorables ou non. Il se manifeste lors des traitements technologiques ou de l'entreposage des aliments transformés. Il est accéléré par la chaleur et apparaît donc particulièrement lors des opérations de cuisson et de déshydratation mais il peut aussi se produire à température ordinaire à plus long terme. Il peut provoquer l'indisponibilisation des acides aminés ou de la vitamine C. La réaction est favorisée par un pH entre 3 et 10, une teneur en eau entre 7 et 15 %, et sa vitesse augmente fortement avec la température.

Quelques actions pour prévenir le brunissement non enzymatique

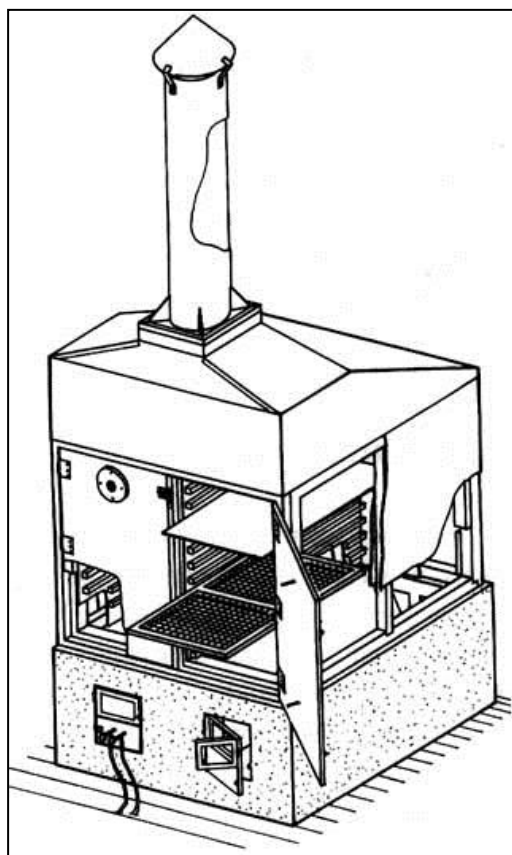
- Surveiller la température et l'humidité : entreposer les aliments déshydratés à une température inférieure à 25°C
- Limiter la durée de stockage
- Ajouter des agents inhibiteurs : l'anhydride sulfureux et les sulfites
- Abaisser le pH pour ralentir la réaction, ce qui n'est pas souvent compatible avec les qualités organoleptiques de l'aliment.
- Eliminer les substrats : on oxyde les oses ou on les élimine par fermentation

1.6. Les équipements de séchage utilisés au Burkina Faso

1.6.1. Le séchoir Atesta

C'est le type de séchoir le plus utilisé au Burkina Faso pour le séchage des mangues et des produits roulés. Il a été introduit dans le pays en 1992.

Figure 1.3 : Séchoir Atesta



CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

Description générale: le séchoir est constitué de:

- une semelle en briques de dimensions 1,8 m x 1,8 m x 0,7 m
- deux cellules de séchage concomitantes, pourvues chacune d'une entrée d'air et d'un brûleur et pouvant recevoir 12 claies de 0,7 m² chacune.
- Un brûleur à rampe de gaz butane par cellule
- Une cheminée circulaire métallique, protégée à l'intérieur par un doublage en contre plaquée qui assure la circulation de l'air

Principe : séchage à gaz à convection naturelle

Promoteur : modèle créé par le Centre Ecologique Albert Schweitzer et diffusé par l'association burkinabé Atesta

Système d'aération: l'entrée d'air se fait par le bas, à l'arrière du séchoir. Débit d'air ajustable: 250 m³ /h maximal.

Capacité: 5,5 kg de produits frais / m² de claie, soit 66 kg de produits frais par cellule. On y met environ 100 kg de mangues fraîches parées par jour.

Chargement: frontal, après ouverture de la porte d'accès à la gaine de séchage. Opération discontinue.

Matériaux: ciment, brique, sable, gravillon, bois, claie en bois avec tamis en corde ou de type moustiquaire.

Réalisation: peut facilement être construit en fonction de la disponibilité locale des matériaux.

Durée de vie: 10 ans en moyenne

Coût : 1 000 000 Fcfa environ.

Rendement énergétique : de l'ordre de 30 %.

Utilisateurs: coopératives, groupements de femmes, privés.

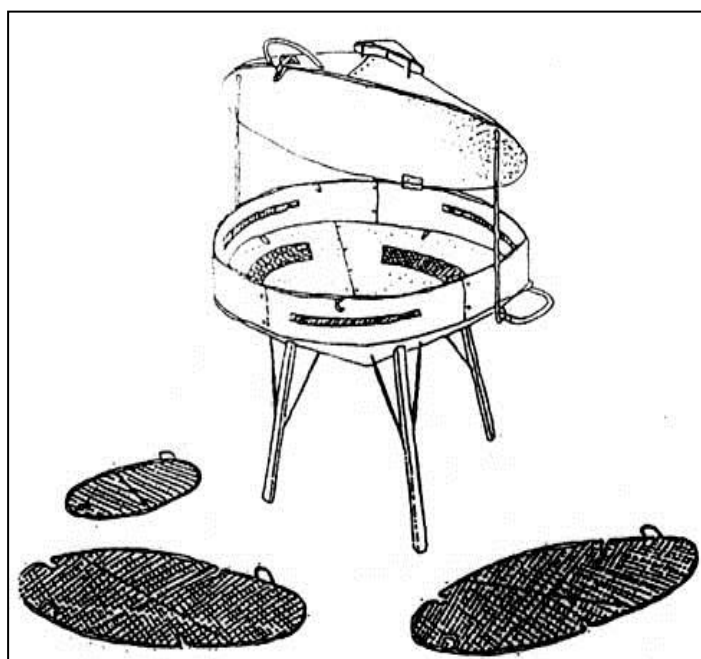
Produits séchés: fruits (surtout les mangues), légumes (oignons, gombo,...), produits céréaliers

Tableau 1-1 : Avantages et inconvénients du séchoir Atesta

Avantages	• Facilement réalisable • Utilisation de matériaux locaux • Faible coût de fabrication et d'entretien • Séchage même en saison humide grâce à l'utilisation du gaz comme source d'énergie • Séchage d'une vaste gamme de produits • Réduction du temps de séchage par rapport au solaire • Qualité de produit séché satisfaisante : pas de poussière, pas d'altération • Entretien réduit
Inconvénients	• Problème d'hétérogénéité de séchage • Difficulté de contrôle de la température • Durée de séchage assez longue • Problème de brunissement • Mauvais rendement énergétique

1.6.2. Le séchoir coquillage

Figure 1.4 : Un séchoir coquillage



CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

Description générale: il est composé de deux cônes métalliques reliés par une charnière. Il est conçu pour protéger les aliments des insectes et de la poussière. Diamètre: 70, 90 et 110 cm selon les modèles 1, 2 ou 3. Surface de séchage: 0,5; 1,4 ou 2,2 m².

Principe : séchage solaire indirect à convection naturelle.

Système d'aération: la circulation

d'air par convection naturelle est faible (quelques m³/h). Cela contribue à la montée en température de l'air et à l'efficacité du séchoir en fin de séchage.

Capacité: environ 5 kg de produit frais/m² de claie en saison sèche, soit 2,5 à 10 kg de produit frais selon les modèles de séchoir. La vitesse de séchage est réduite par ciel couvert.

Chargement: opération discontinue ou semi continue (claie de finition dans le bas du séchoir).

Matériaux: tôle 10/10, fers de 6 et 8 mm de diamètre et cornières, claie avec tamis en nylon, grillage galvanisé maille fine, peinture noire mate, antirouille.

Réalisation: le séchoir coquillage est réalisable à partir de matériaux disponibles localement. Toutefois, une attention particulière doit être portée au respect précis des plans par les artisans afin de conserver les performances du séchoir.

Durée de vie: matériel robuste. La durée de vie est estimée à dix ans. L'entretien du séchoir est très limité: il est lié au renouvellement du tamis des claies et de la peinture noire des tôles (doit résister aux UV, couche antirouille recommandée).

Coût de fabrication: de 13 000 à 44 000 F CFA selon la capacité.

Tableau 1-2 : Avantages et inconvénients du séchoir coquillage

Avantages	• Réalisable à partir de matériaux disponibles localement. • Fiable et résistant. • Coût de fabrication et d'entretien peu élevé. • Forme très bien acceptée par les utilisatrices. • Ne nécessite aucune intervention en cours de séchage. • Peut être utilisé en semi continu (claie de finition). • Permet de sécher aussi bien les fruits et légumes que les produits carnés. • Produits séchés d'assez bonne qualité hygiénique et organoleptique. Peu de poussière et pas d'infestation par les insectes.
Inconvénients	• L'efficacité dépend fortement des conditions climatiques • Paramètres de séchage peu réglables • Qualité organoleptique du produit difficilement maîtrisable • L'efficacité du séchage est fortement liée à la qualité de fabrication et au respect des plans du séchoir: une formation et un suivi temporaire des artisans sont souhaitables. • Faible capacité de chargement de produits • Faible vitesse de séchage

Utilisateurs: familles, coopératives, groupements de femmes.

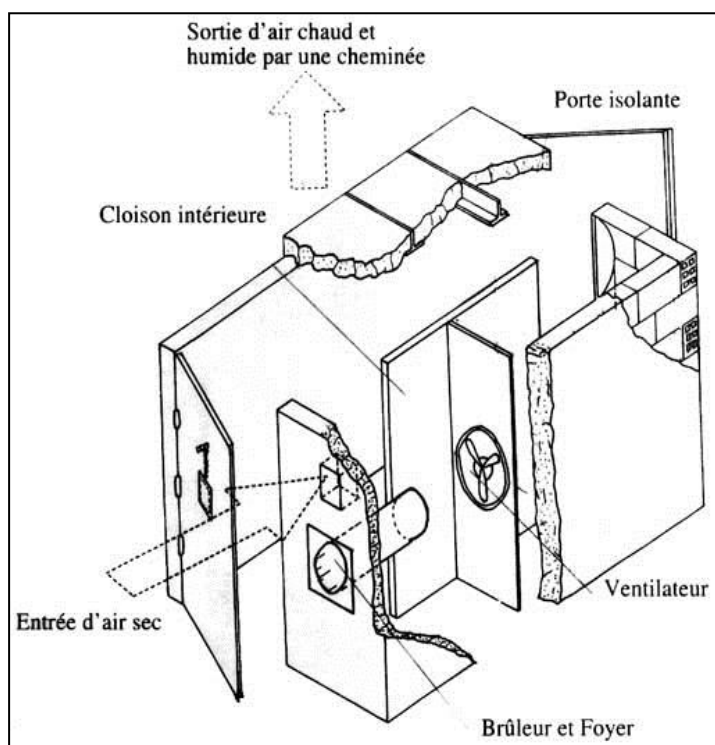
Produits séchés: fruits (mangues), légumes (tomates, oignons, gombo, légumes feuilles), produits céréaliers (fonio, farine), viandes, poissons mais le séchage des mangues destinées

à l'exportation ne se fait presque plus avec le coquillage car ne peut pas donner des produits répondant à la qualité exigée.

Période d'utilisation: période de production couvrant la saison sèche, de décembre à juin. Utilisation du séchoir en fin de saison pluvieuse pour le séchage des feuilles et du gombo, de septembre à octobre.

1.6.3. Le séchoir à gaz type cartier

Figure 1.5 : Schéma d'un séchoir à gaz type cartier



CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

Description générale: le séchoir est composé

- d'un bâti en briques cuites (L x l x h: 4,6 m x 2,2 m x 2 m). Les briques du toit sont soutenues par des barres métalliques en T de 5 x 2,4 cm;
- d'une cloison intérieure en briques cuites permettant la circulation de l'air en boucle et délimitant 2 couloirs: 1 couloir dans lequel l'air est chauffé puis propulsé, et 1 couloir pouvant recevoir 2 chariots de 32 claies chacun pour le

séchage des produits.

Principe : séchage à gaz à convection forcée

Promoteur : GERES, Groupe Energies Renouvelables au Burkina

Système de chauffe: un brûleur torche (puissance moyenne: 40 kW) incorporé dans un foyer avec pare-flamme

Système d'aération: il est constitué de

- 1 moteur électrique (220 V, triphasé);
- 1 ventilateur tripale (1500 tours/min, 8 000 m³/h) relié au moteur par une courroie
- 1 trappe d'entrée d'air frais à ouverture modulable pour contrôler le taux de recyclage de l'air et d'humidité dans le séchoir;
- 1 conduit de sortie d'air humide par le toit.

Système de contrôle et de régulation: le séchoir est conçu de manière à assurer la sécurité de l'installation (contrôle de flamme, protection électrique) et la régulation des paramètres de séchage (régulation automatique de la température, contrôle de l'humidité dans le séchoir).

Capacité: 1 à 2 chariots de 32 claies chacun. 8 kg de produit frais / m² de claie soit 130 kg de produits frais par chariot. 175 kg de mangues fraîches sont séchées en 24h.

Approvisionnement du séchoir: par fournée ou en semi-continu.

Matériaux: Bâti et portes: briques cuites, ciment, fers en T, tôles plates de 2 mm d'épaisseur, fers carrés de 3 cm de côté, isolant.

Chariots: roulettes folles, fers cornières et fers plats de 2 cm.

Claies: bois dur pour le cadre, moustiquaire Nylon ou en acier non oxydable pour le tamis.

Réalisation: assez facile. Un respect scrupuleux des plans par un maçon compétent est indispensable. Système de ventilation et de chauffe en général importés.

Durée de vie: plusieurs dizaines d'années pour le bâti, les systèmes de chauffe et de ventilation. Le tamis des claies représente le matériel d'usure.

Coût de fabrication: 6 500 000 Fcfa dont 3 800 000 Fcfa de matériel importé (1995).

Utilisateurs: coopérative

Produits séchés: mangue, papaye, banane

Destination: marchés locaux et exportation en Europe

Période d'utilisation: d'avril à octobre pour les mangues

Mode d'utilisation: par fournée. Aucun prétraitement n'est actuellement employé lors du séchage des mangues.

Tableau 1-3 : Avantages et inconvénients du séchoir gaz type cartier

Avantages	• Entretien limité • Durée de vie de plusieurs dizaines d'années. • Régulation et contrôle des paramètres de séchage température, hygrométrie. Le débit d'air peut être ajusté. • Manipulation simple du séchoir ; souplesse d'utilisation (par fournée ou en semi continu, à co-courant ou contre-courant).. • Convient au séchage des fruits, des légumes, des viandes et des poissons • Homogénéité du séchage. Produits séchés de très bonne qualité, même sans prétraitement • Très bon rendement énergétique • Le séchoir peut servir à pasteuriser des produits séchés à humidité intermédiaire (30-35 %). • Existence de plusieurs modèles de séchoirs (capacité différente, utilisation du fioul,...).
Inconvénients	• Nécessite un approvisionnement régulier et important du séchoir en

- matières premières
- Nécessite des capacités techniques pour conduire et entretenir le séchoir.
- Nécessite des capacités de gestion de l'activité

1.6.4. Séchoir cabane (Camilla Gomez Eslava, 2005)

Ce séchoir a la particularité que les produits sont placés sur des claies surélevées ; elles sont superposées sur 3 ou 4 étages sous un bâti en bois avec des parois en plastique.

L'aération se fait par des ouvertures sur le haut et le bas avec parfois l'ajout d'une petite cheminée en hauteur (Broutin, Totté et al, 2003). Ce système permet un gain d'espace et la possibilité de permutation des claies pour un séchage plus homogène mais le rayonnement solaire n'est pas direct sur la totalité des claies entraînant une perte d'énergie thermique et une augmentation du temps de séchage.

1.6.5. Séchoir solaire tunnel

Photo 1-1 : Séchoir solaire tunnel



Séchoir solaire tunnel

- Usage artisanal
- Séchage solaire direct
- Encombrement : 150 cm x 150 cm x 60 cm
- Capacité : 20 kg de fruits frais
- Coût départ atelier : 145 000 F CFA

Source : les produits du CAES, www.caes-ong.net

1.6.6. Séchoir solaire Banco

Photo 1-2 : Séchoir solaire Banco



Séchoir solaire Banco

- Usage artisanal
- Séchage solaire direct à convection naturelle
 - Capacité : 120 kg de produits frais
 - Encombrement : 620 cm x 250 cm x 235 cm
 - Volume : 16 m³
 - Coût départ atelier : 600 000 F CFA

Source : les produits du CAES, www.caes-ong.net

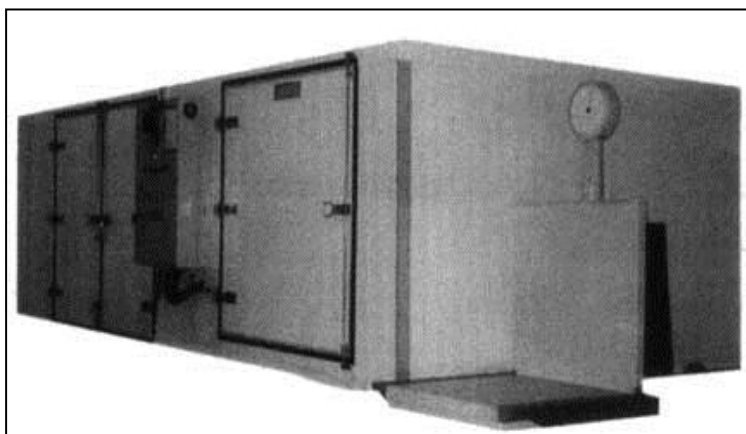
Il a été conçu par le CAES au Burkina Faso en 1990. Le chargement du séchoir se fait à partir des faces latérales et il a quatre entrées d'air par l'avant et quatre entrées sur les faces latérales.

1.6.7. Autres types de séchoirs

Il existe d'autres types de séchoirs pour les produits alimentaires mais qui ne sont pas encore diffusés au Burkina Faso.

➤ Séchoir semi industriel à déshumidification

Photo 1-3 : Séchoir semi industriel à déshumidification



Ce type de séchoir convient particulièrement à des applications délicates comme le séchage des plantes aromatiques ou le séchage "biologique" des fruits et légumes, pour conserver les

qualités des produits sensibles à la chaleur.

La gamme du séchoir est très variable; d'une centaine de kg d'eau extraits par jour à plusieurs tonnes. Les séchoirs les plus petits sont à claies mais les modèles les plus courants sont à tapis. Tous types de produits peuvent y être séchés.

PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

En contact avec le produit à sécher, l'air brassé par les ventilateurs absorbe une partie de l'eau contenue dans le produit. Cette eau se condense en rencontrant la batterie froide (évaporateur), elle est récupérée dans un bac et s'écoule par une canalisation appropriée.

L'air est ensuite réchauffé au contact de la batterie chaude (condenseur) et recommence son circuit. Cet air à haut pouvoir séchant est diffusé au travers d'une paroi perforée de conception spéciale garantissant une distribution optimale et homogène à travers les produits à sécher. Ce cycle est exécuté 500 à 1 200 fois par heure selon les produits.

Comme pour tout système frigorifique, la production de chaleur est supérieure à la production de froid; la différence étant équivalente au travail mécanique du compresseur frigorifique. Pour éviter une élévation de la température de l'air dans le séchoir, un échangeur intégré, alimenté par l'eau du process, évite automatiquement toute surchauffe et permet de récupérer l'excès de calories généré par le compresseur. Cette eau chaude peut être valorisée dans un autre secteur du process. Ce procédé permet un séchage basse température (+ 20°C, + 40°C) quelle que soit l'hygrométrie ambiante puisqu'il ne chauffe pas l'air pour abaisser son humidité relative, mais diminue sa teneur absolue en eau.

SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

Ce modèle fonctionne comme un système frigorifique, sa consommation est 100 % électrique. Son ratio de consommation varie entre 0,5 et 1 kWh/kg eau (contre 1,5 kWh/kg eau pour un séchage thermique) sans inclure la récupération d'eau chaude de désurchauffe. Ce procédé performant peut donc être économiquement intéressant lorsque le coût du kWh électrique n'est pas plus de 2 à 3 fois supérieur au kWh gaz ou fioul.

Ce système énergétique fonctionne à base d'équipements électriques qui, ensemble, mettent en jeu une puissance installée nominale importante. Elle est fonction du dimensionnement et proportionnelle à la capacité évaporatoire: de 7 à 70 kW pour une déshumidification de 5 à 150 kg eau / h.

La technologie de ce modèle de séchoir nécessite donc un environnement favorable: réseau électrique fiable (absence de coupures et de variations de tension)

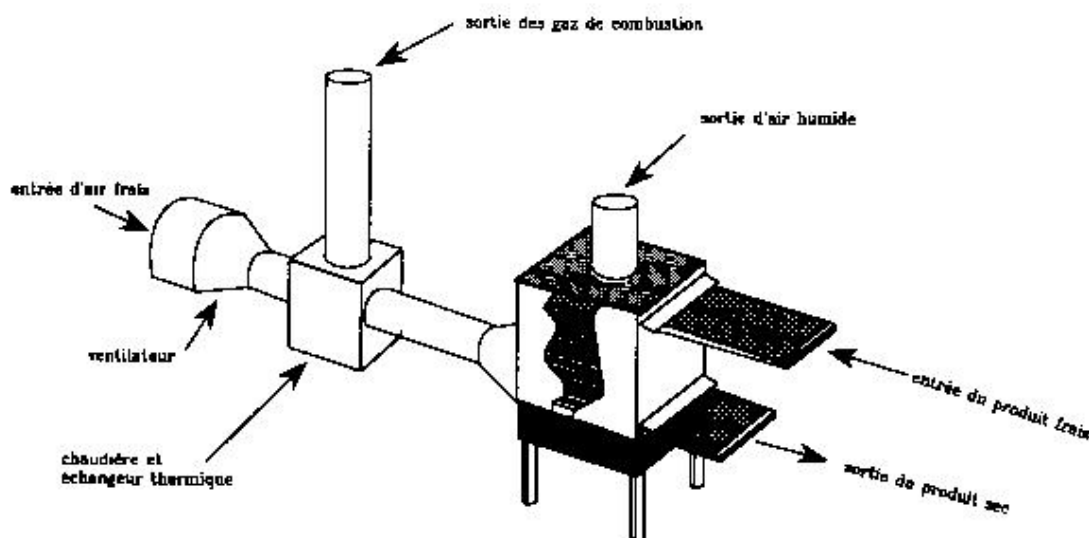
DIFFUSION

Actuellement, il existe quelques exemplaires de ce modèle de séchoir auprès d'opérateurs africains (Togo, Réunion). L'évolution du secteur industriel et des marchés porteurs pour les pays africains peut laisser présager un développement de ce procédé.

Tableau 1-4 : Avantages et inconvénients du séchoir semi industriel à déshumidification

Avantages	• Performances énergétiques • Qualité du produit fini • Contrôle du procédé • Fiabilité grandissante en pays tropicaux
Inconvénients	• 100 % électrique • Coût d'investissement élevé • Haute technologie • Equipement importé. • Contexte industriel rigoureux

➤ Le séchoir semi-continu type ITDG3



Usage : Artisanal

Énergie : Séchoir à gaz ou au fioul à convection forcée

Référence : ITDG

Caractéristique du séchoir : Le séchoir est constitué de :

- Une cellule de séchage en acier L 1,4 m x larg. 1,2 m x H. 2,2 m.

³ Source : Rapport final d'étude bibliographique, Cirad-amis DOC n° 36/04, septembre 2004

- 15 claies de 0,8 m² chacune
- Un système de chauffage et de ventilation

Système de chauffe : il est constitué de :

- Brûleur au gaz ou au fioul, puissance maxi 60 kW
- L'air frais est chauffé par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur dans le cas d'un chauffage au fioul.

Capacité : il peut contenir 3,75 kg de produits frais par m² de claie soit environ 45 kg par cellule

Matériaux : Plaques et barres d'acier galvanisé, bois, tamis pour les claies

Durée de vie : matériel solide

Réalisation : délicate, réalisable en partie selon la disponibilité des matériaux et le savoir-faire technique local.

Tableau 1-5 : Avantages et inconvénients du séchoir semi continu type ITDG

Avantages	• Très bonne qualité hygiénique des produits • Convient au séchage des fruits, des légumes, des plantes.
Inconvénients	• Investissement important • Le mode semi continu peut être un inconvénient (quantité de produit)

2.

**Deuxième partie : Les produits
roulés au Burkina Faso**

Les produits roulés sont des granules fabriquées à partir d'une farine de céréale humidifiée et roulée manuellement. Ils occupent une place importante dans l'alimentation des ménages du Burkina Faso. Ce sont, entre autres, le dégué, la bouillie et le couscous. Cette étude se limitera au dégué et à la bouillie pour des raisons de contrainte de temps et de budget.

Le dégué tout comme la bouillie, dans le cas de notre étude, désignent des granules issues de la transformation du mil. Après roulage de la farine, les granules sont précuits pour obtenir du dégué, ce qui n'est le cas de la bouillie.

2.1. Transformation des produits roulés : cas du dégué et de la bouillie

La transformation des produits a été suivie dans deux unités, l'une utilisant le séchoir Atesta (Entreprise Succulence) et l'autre un séchage à l'air libre dans une pièce à l'intérieur de la maison ou dans la cour (Entreprise Tout Super). La fabrication du dégué a été suivie au niveau des deux unités et pour la bouillie, elle s'est faite seulement dans l'unité séchant en intérieur de maison. Dans la suite du rapport, l'unité utilisant le séchoir Atesta sera nommée Unité A et celle séchant sur table en intérieur de maison et à l'air libre, Unité B.

2.1.1. Diagrammes de transformation

Les produits ont été classés en deux catégories selon le degré de transformation du produit brut. Jusqu'à l'étape d'obtention de la farine, il s'agit d'une transformation primaire. De la farine au produit fini, c'est la transformation secondaire.

2.1.1.1. Transformation primaire

La transformation primaire est identique pour la fabrication du dégué et de la bouillie. Elle se déroule comme indiqué par les diagrammes donnés par les figures 2.1 et 2.2 ci-dessous.

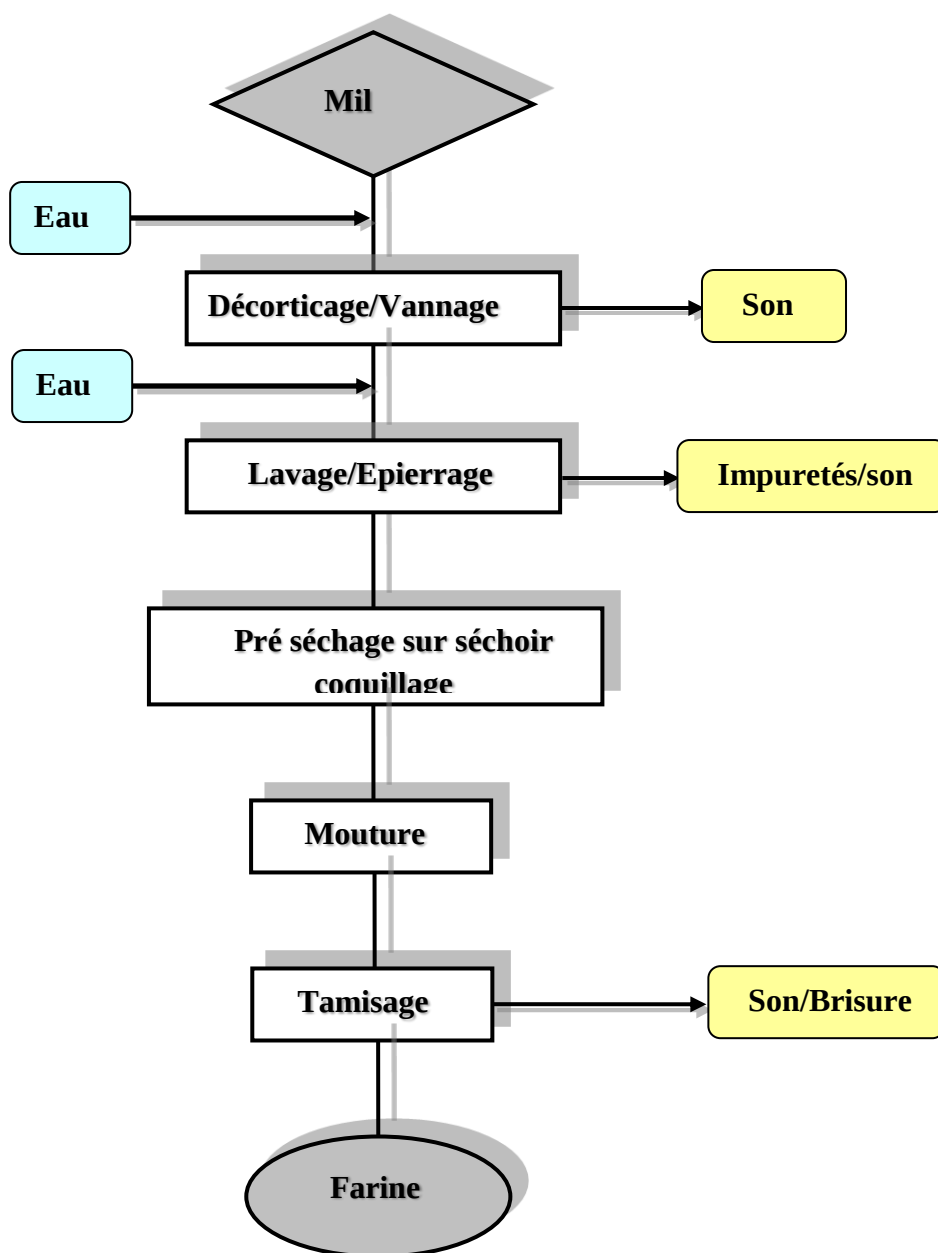
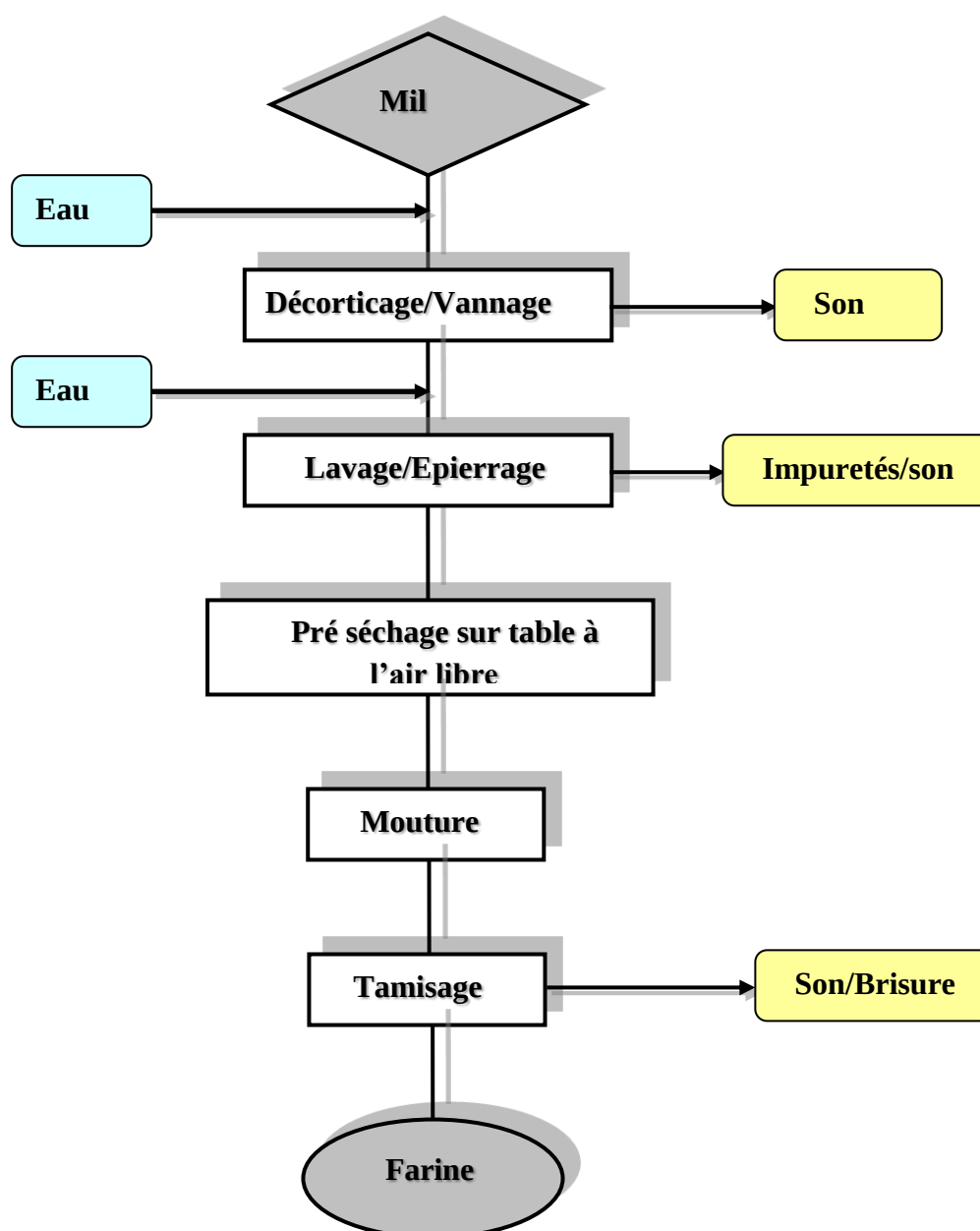
Figure 2.1 : Diagramme de transformation primaire de l'unité A

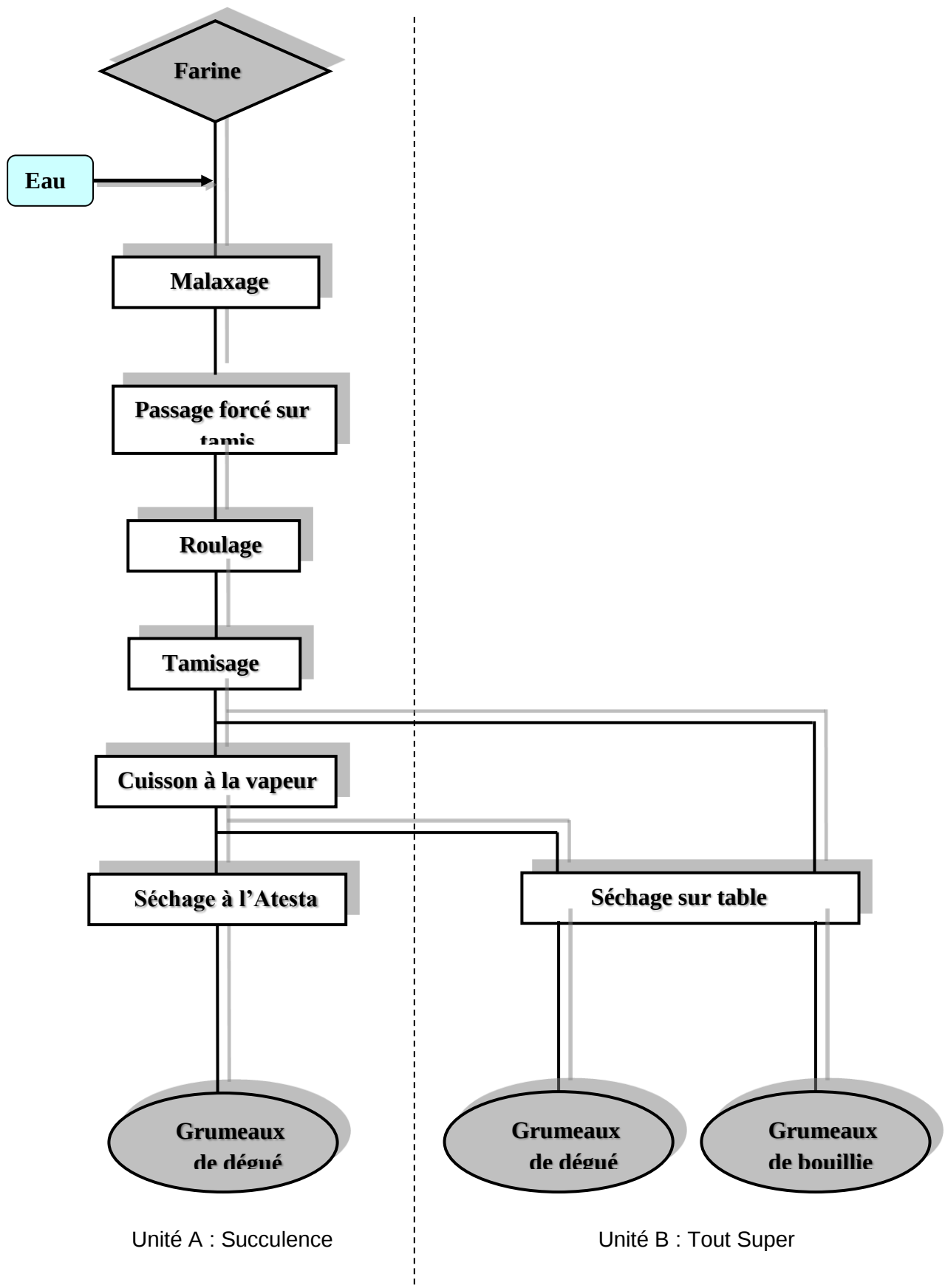
Figure 2.2 : Diagramme de transformation primaire de l'unité B

2.1.1.2. Transformation secondaire

Elle débute après l'obtention de la farine et se poursuit jusqu'au produit fini, séché en vue de sa conservation. La différence fondamentale dans cette phase, entre la bouillie et le dégué, réside au niveau de l'opération de précuisson qui s'applique seulement au dégué afin de lui conférer des caractéristiques rhéologiques (compacité) même lorsqu'il est plongé dans l'eau bouillante pour le réhydrater. Ce qui n'est pas le cas de la bouillie qui doit être consistante après sa préparation, ce qui demande sa désagrégation en périphérie au contact de l'eau chaude.

La figure 2.3 ci-dessous présente les diagrammes de transformation des deux unités

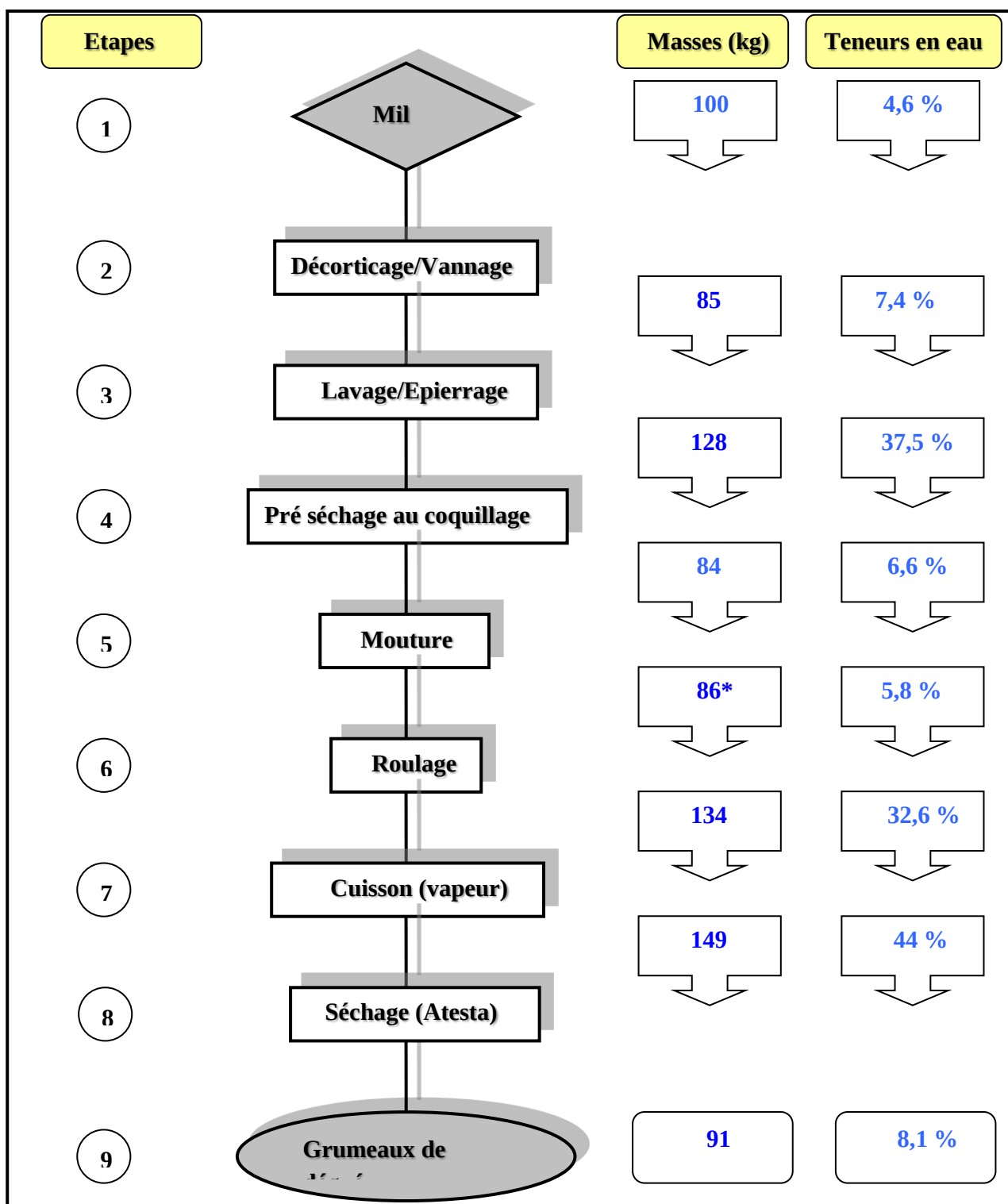
Figure 2.3 : Diagrammes de transformation secondaires des unités A et B



2.1.2. Bilan matière et teneurs en eau de la transformation du mil en bouillie et en dégué

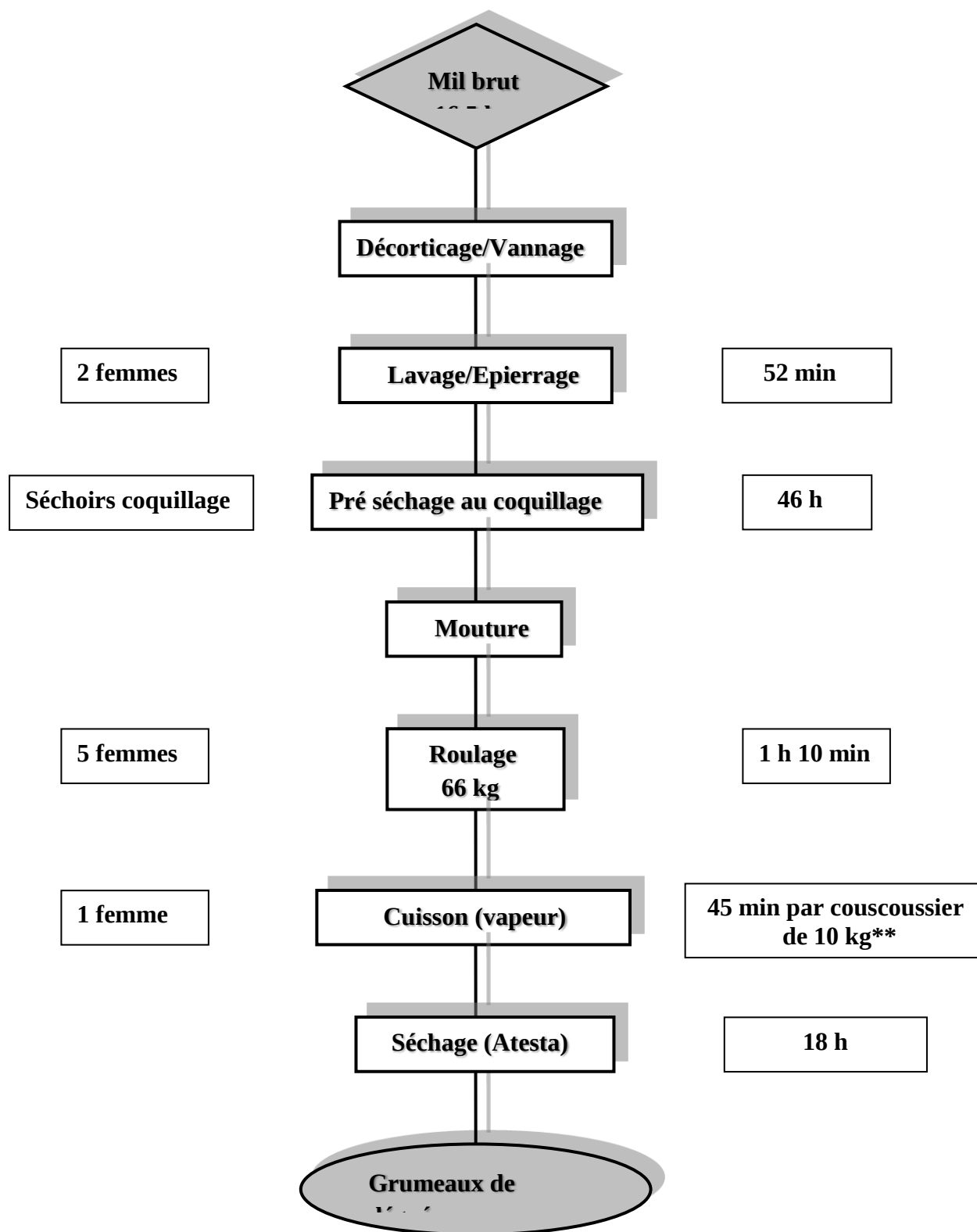
L'évolution de la matière, des teneurs en eau et les durées des opérations unitaires ont été suivies tout au long des processus de transformation et les résultats sont donnés dans les figures 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 et 2.9.

Figure 2.4 : Bilan matière et teneurs en eau de la transformation du mil en dégué de l'unité A



* Une augmentation de poids a été constatée après la mouture, ce qui n'était pas attendu. Cela est, peut être, dû à un apport de matière au niveau du moulin.

Figure 2.5 : Durées des opérations unitaires de la fabrication du dégué de l'unité A



**L'opératrice consacre 30 min pour faire bouillir l'eau servant à la cuisson vapeur.

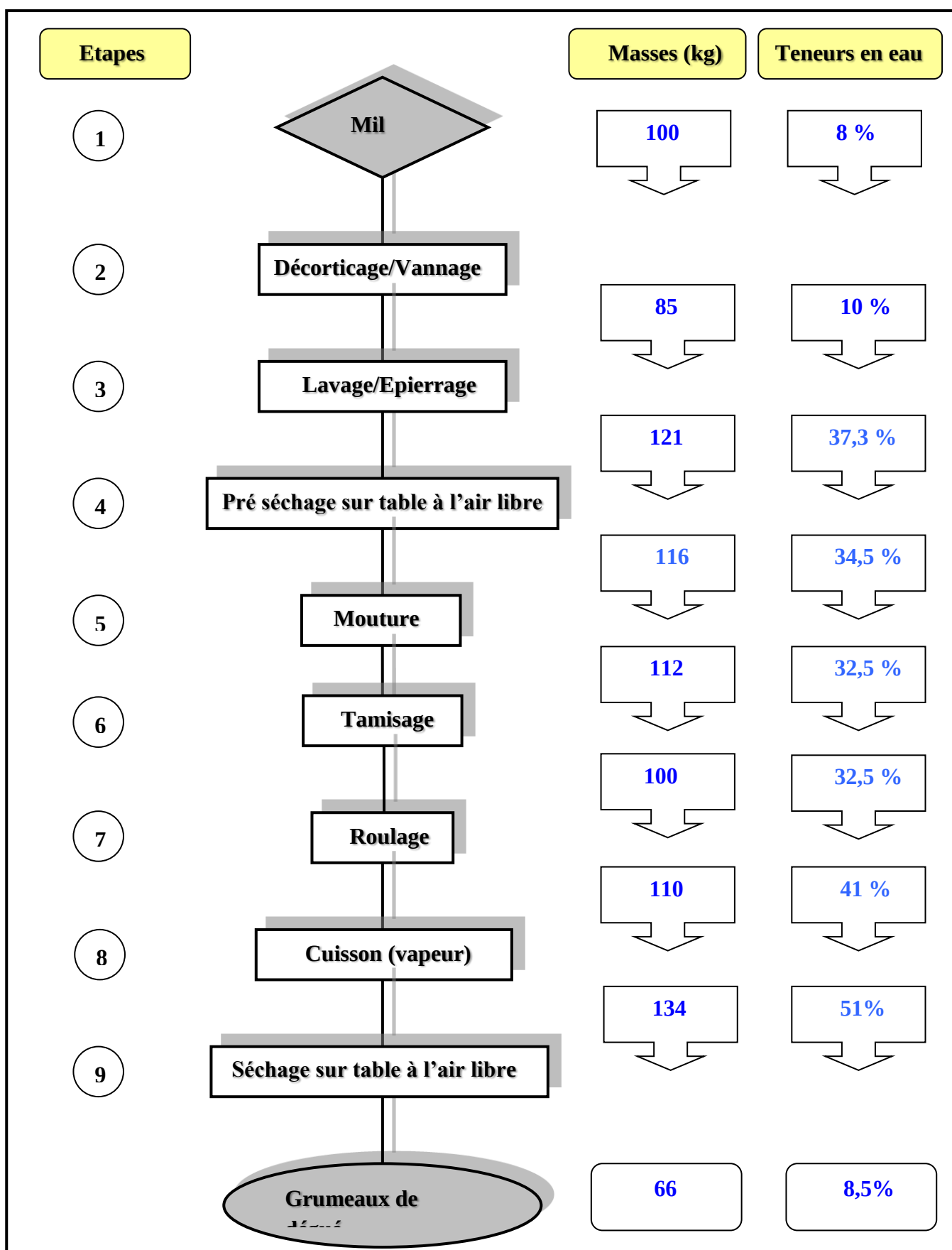
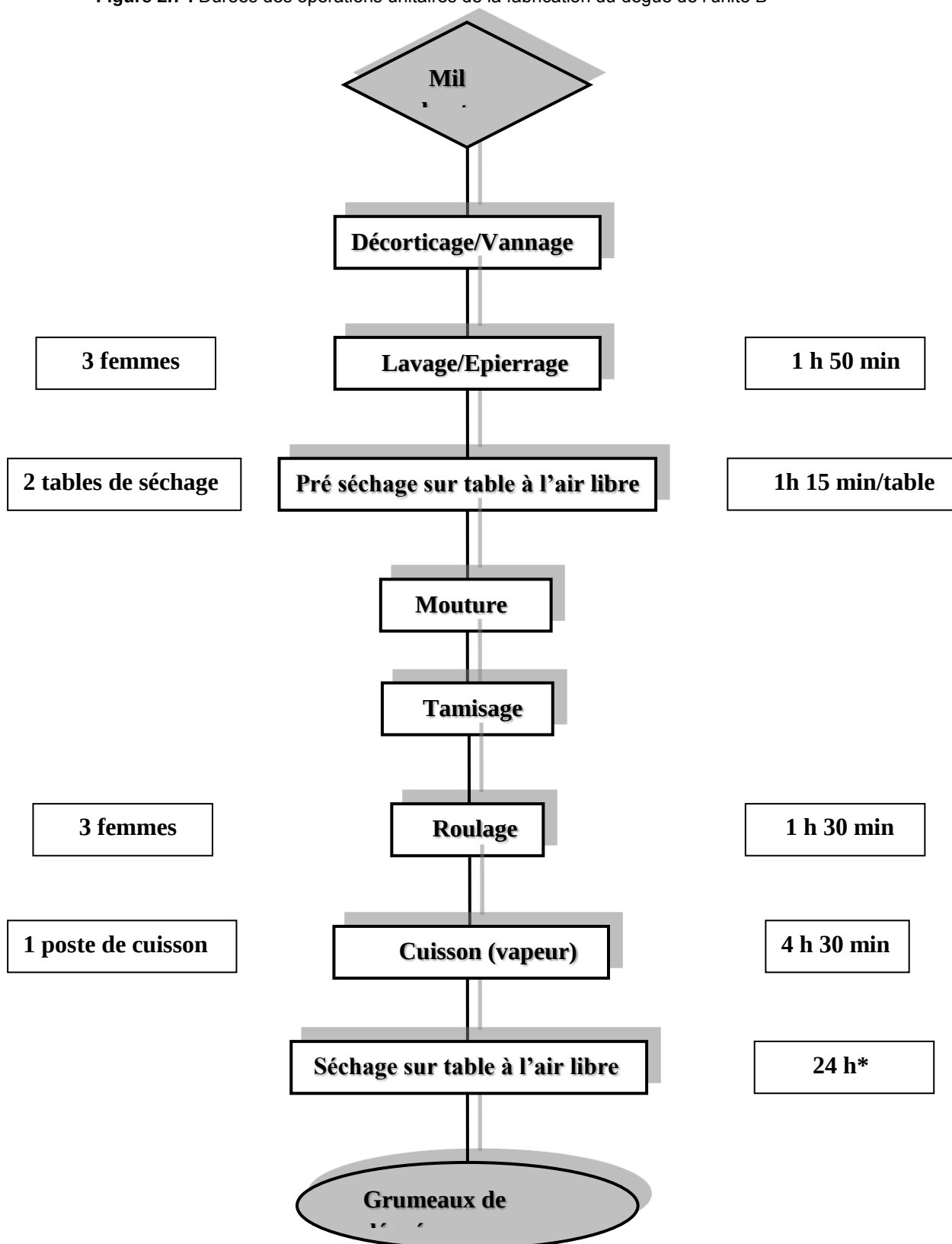
Figure 2.6 : Bilan matière et teneurs en eau de la transformation du mil en dégué de l'unité B

Figure 2.7 : Durées des opérations unitaires de la fabrication du dégué de l'unité B

*C'est une durée correspondant à la période sèche, avec des conditions favorables au séchage (air chaud et sec) donc il faut s'attendre à davantage de temps de séchage en saison humide.

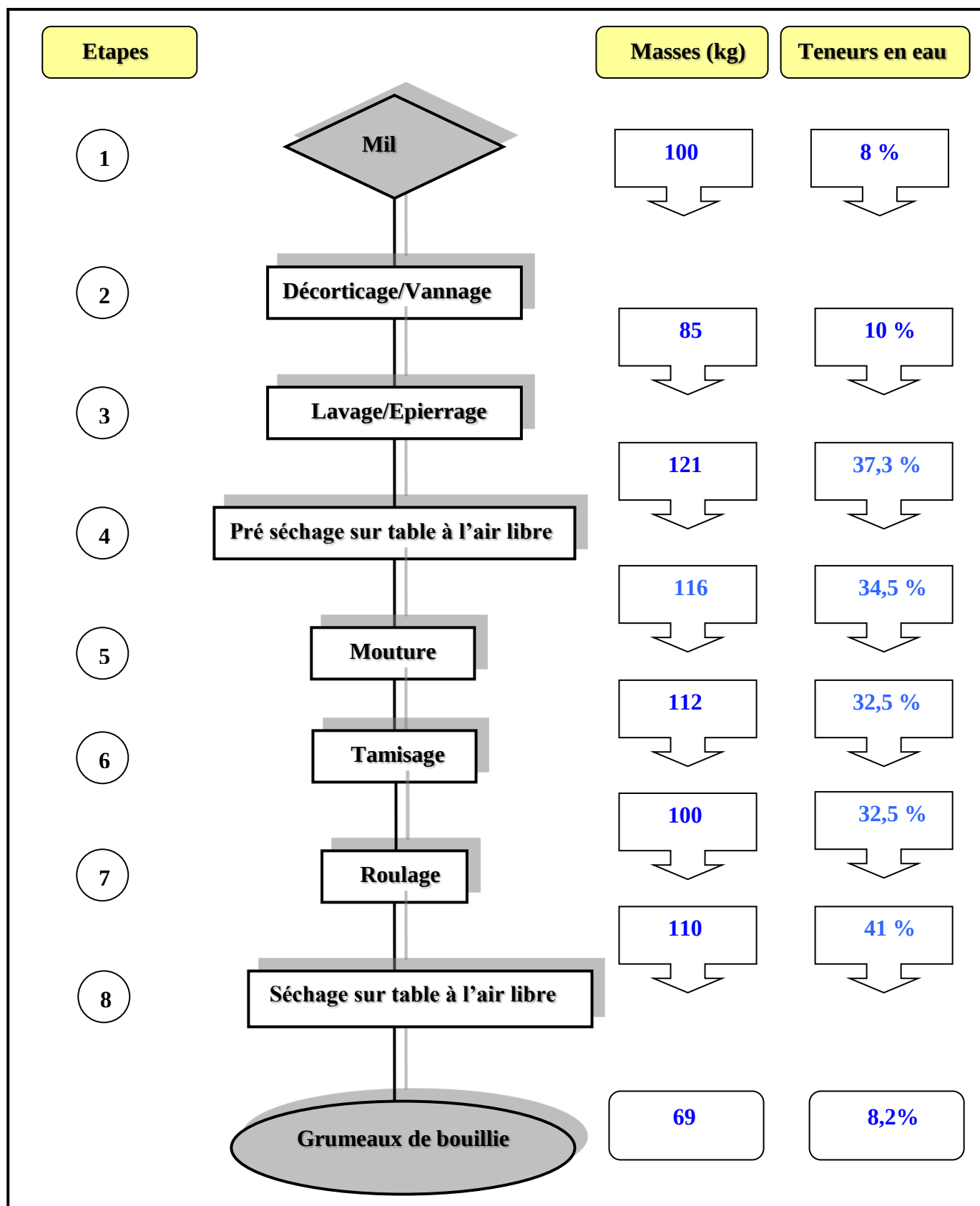
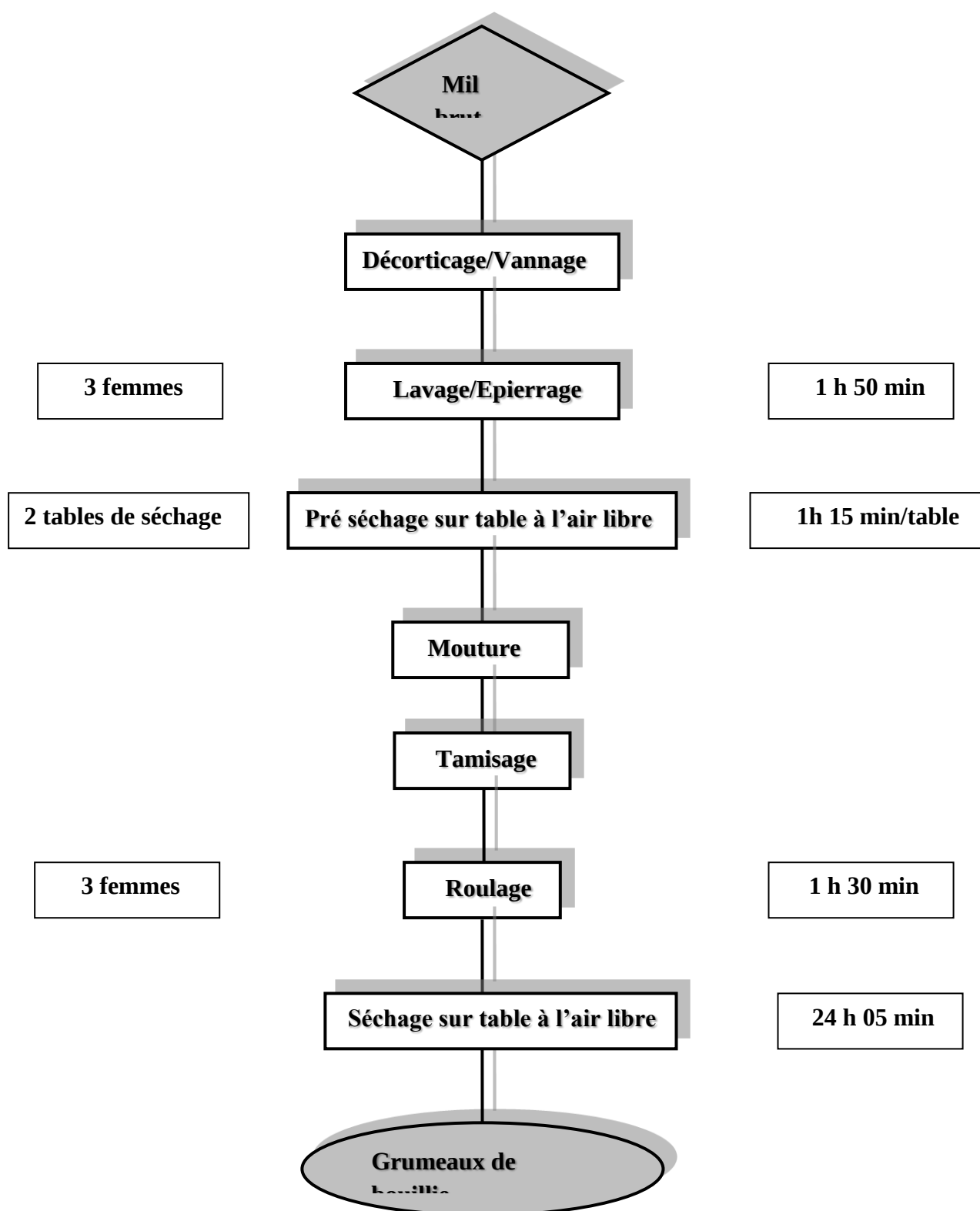
Figure 2.8 : Bilan matière et teneurs en eau de la transformation du mil en bouillie de l'unité B

Figure 2.9 : Durées des opérations unitaires de la fabrication de la bouillie de l'unité B

2.2. Qualité des produits roulés

2.2.1. Définition

La qualité ne traduit souvent pas la même chose selon que l'on est transformateur ou consommateur mais on ne peut parler de qualité des produits alimentaires sans évoquer les quatre « S » : santé, sécurité, service et satisfaction. La santé et la sécurité renvoient à la composition nutritionnelle et aux aspects réglementaires et sanitaires (bactériologie, pollution, toxicologie). Le service et la satisfaction concernent plutôt les aspects commerciaux. La dimension « service » vise à améliorer les conditions de commercialisation, la distribution, la facilité de préparation. La dimension « commerciale » prend en compte la qualité organoleptique et la valeur symbolique (Cécile Broutin, 2004).

La qualité est un élément très important dans la transformation des produits roulés non seulement parce qu'elle permet de bien vendre et conquérir de nouveaux marchés mais aussi parce qu'elle limite les risques sanitaires pour les consommateurs. Mais il est important de préciser que la qualité ne s'articule pas seulement au niveau du produit mais elle doit prendre en compte tout le « système entreprise ».

De plus en plus la méthode HACCP⁴ est pratiquée mais sa mise en œuvre dans les petites unités s'avérerait difficile d'où la nécessité de l'adapter au contexte local avec l'appui de techniciens du domaine. On améliorerait ainsi sensiblement la qualité des produits par des pratiques simples.

2.2.2. Les critères de qualité

Les critères de qualité des produits roulés pour un consommateur sont des caractéristiques organoleptiques, hygiéniques, nutritionnelles ou physiques que doivent présenter ces produits pour que la personne considère qu'ils sont de bonne qualité (Chazal A., 2003). Ainsi, nous allons présenter ces critères tels que perçus par les transformateurs mais aussi comme le préconisent les normes qui, souvent, ont un caractère obligatoire.

2.2.1.1. Selon les transformateurs

Les transformateurs recherchent la qualité demandée par les clients car leur préoccupation première est de vendre ce qu'ils produisent. Des enquêtes chez les transformateurs, sont ressorties les conclusions suivantes :

⁴ Hazard Analysis Critical Control Point qui signifie Points Critiques pour la Maîtrise des Dangers ; c'est un système préventif de maîtrise des dangers pour assurer la salubrité des produits

➤ Pour la couleur

Il n'y a pas de couleurs précises reconnues et acceptées par tous mais de façon générale, les granules de dégué doivent être assez foncés mais sans être noirs pour être prisées car on aime son aspect sombre dans le yaourt.

Pour la bouillie, plus elle est claire, plus elle est considérée comme étant de bonne qualité.

La couleur du produit fini dépend directement de la couleur de la matière première et il existerait quatre variétés de mil, de couleur différente. Il s'agit donc de bien choisir le mil à l'achat pour assurer la couleur souhaitée après transformation

➤ Pour la granulométrie

La taille des grains est variable d'un transformateur à l'autre. L'essentiel semble être d'avoir des granules de même taille et de même forme (homogénéité) pour le produit destiné à la vente. Il faut surtout éviter que le consommateur, en retournant le sachet contenant le produit, constate que des particules de plus petite granulométrie se déposent au fond.

➤ Pour la propreté

Le produit doit être exempt de tout corps étranger visible : insectes, sable, cheveux, impuretés, etc.

2.2.1.2. Selon les normes

Des normes existent sur le plan international concernant les produits céréaliers mais il n'existe pas encore des normes spécifiques au Burkina Faso.

On distingue les normes obligatoires et les normes facultatives⁵.

Les normes obligatoires sont articulées autour des aspects suivants :

- La santé des populations (absence de produits toxiques, d'additifs prohibés, etc.)
- La qualité globale (indications sur les qualités organoleptique, nutritionnelle, hygiénique, microbiologique et physico-chimique du produit.)
- L'étiquetage (information claire et objective du consommateur)
- L'emballage (utilisation d'emballage adéquat pour une bonne conservation du produit)
- La loyauté dans les transactions (mention de la date limite de consommation du produit)

Les normes facultatives doivent donner des indications sur les points suivants :

- Les procédés de fabrication

⁵ Atelier sous-régional sur la réglementation et la gestion de la qualité des produits agroalimentaires transformés, Dakar, 27 et 28 mars 2001

- Les informations nutritionnelles
- Une bonne présentation de l'emballage
- La formation du personnel
- L'adéquation des locaux et des équipements

Des normes sur les produits roulés sont à l'étude au Burkina Faso et devrait s'inspirer du Codex *Alimentarius*. C'est une norme qui s'applique à la farine destinée à la consommation humaine directe et dérivée du mil chandelle. Elle stipule que:

➤ Concernant les critères généraux sur les facteurs de qualité

- La farine de mil chandelle doit être saine, propre à la consommation humaine et de qualité alimentaire.
- La farine de mil chandelle doit être exempte d'odeurs et de goûts anormaux ainsi que d'insectes vivants
- La farine de mil chandelle doit être exempte de souillures (impuretés d'origine animale, y compris les insectes morts) en quantités susceptibles de présenter un danger pour la santé.

➤ Concernant les critères spécifiques sur les facteurs de qualité

La teneur en eau maximale est de 11 %⁶. Une teneur en eau moindre peut être exigée pour certaines destinations, compte tenu du climat, de la durée de transport et de celle du stockage. Les gouvernements acceptant la norme sont priés d'indiquer et de justifier les critères applicables dans leur pays.

➤ Concernant l'hygiène

- Dans la mesure où le permettent les bonnes pratiques de fabrication, le produit doit être exempt de matières indésirables.
- Lorsqu'il est soumis à des méthodes appropriées d'échantillonnage et d'examen, le produit doit être :
 - Exempt de microorganismes en quantités susceptibles de présenter un risque pour la santé
 - Exempt de parasites susceptibles de présenter un risque pour la santé
 - Exempt de substances provenant de microorganismes en quantités susceptibles de présenter un risque pour la santé.

➤ Concernant le conditionnement

- La farine de mil chandelle doit être emballée dans des récipients préservant les qualités hygiéniques, nutritionnelles, technologiques et organoleptiques du produit.

⁶ C'est une valeur adaptée au Burkina Faso car le Codex Alimentarius fixe le maximum à 13 %.

- Les récipients, y compris les matériaux d'emballage, doivent être fabriqués avec des matériaux sans danger et convenant à l'usage pour lequel ils sont destinés. Ils ne doivent transmettre au produit aucune substance toxique, ni aucune odeur ou saveur indésirable.
- Lorsque les produits sont emballés dans des sacs, ceux-ci doivent être propres, robustes et solidement cousus ou scellés.

Devant l'absence de normes sur les produits issus de la transformation secondaire, on pourrait se référer à ces normes pour apprécier la qualité du produit destiné à la consommation directe c'est-à-dire le produit fini.

Les critères microbiologiques applicables à ces aliments concernant les bactéries, levures et moisissures préconisent les limites données par le tableau 2.1 :

Tableau 2-1 : Quelques spécifications requises pour la farine et semoule de mil

FACTEURS DE QUALITE MICROBIOLOGIQUE - DESCRIPTION	LIMITE MAXIMALE
Flore aérobique mésophile	10^4 CFU/g au maximum
Coliformes	10 CFU/g au maximum
Levures	10^3 CFU/g au maximum
Moisissures	10^3 CFU/ g au maximum
Staphylocoques pathogènes	0 CFU/ g

2.3. Étude expérimentale du séchage

2.3.1. Essais en condition de production

Des essais sur les séchages à l'air libre et sur le séchoir Atesta ont été réalisés en vue de comprendre le processus et de déterminer les impacts des procédés sur la qualité des produits séchés.

2.3.1.1. Séchage à l'air libre

Le processus de séchage a été suivi deux fois au sein de l'entreprise Tout Super afin de comparer les résultats. Ainsi ce sont des valeurs moyennes qui sont données dans la suite.

Le séchage a duré près de 24h. Mais il faut préciser que la première phase du séchage s'est faite à l'intérieur de la pièce (de 13h 30min à 8 h le lendemain) avant que les produits ne soient placés au contact du rayonnement solaire, dans la cour de la maison.

1) But de l'essai :

- Mesurer les conditions de séchage (température et humidité ambiantes)
- Prendre des échantillons pour déterminer les teneurs en eau des produits avant et après le séchage.

- Mesurer la durée de séchage

2) Matériels utilisés

- Une balance
- Un chronomètre
- Une étuve
- Une centrale d'acquisition (température, humidité)

3) Méthodologie

- Prélèvement d'un échantillon pour déterminer la teneur en eau initiale
- Pesée du produit avant le séchage
- Mesurer le temps de séchage
- Pesée du produit après le séchage
- Prélèvement d'un échantillon du produit séché pour déterminer la teneur en eau.

4) Description de l'expérimentation

Il s'agit ici de sécher du dégué et de la bouillie, préalablement fabriqués. Le séchage se fait sur des tables en tamis plastique de dimensions 4m x 1m (voir photo 2.1).

Il dure près de 24h et se fait en deux étapes : la première, dans une pièce à l'intérieur de la maison, du début du séchage vers 15 h, au lendemain vers 8 h et la deuxième, de 8h à la fin du séchage vers 16h. Mais il faut préciser que le produit est étalé sur la table au fur et à mesure que le roulage se faisait donc à partir de 13h 30 ; l'ensemble du produit a commencé à sécher vers 15h, heure considérée comme étant l'heure de début du séchage.

Le produit est placé sur une toile noire déroulée sur la table afin d'attirer le rayonnement solaire (voir photo 2.3) ; lorsque le produit est exposé au rayonnement solaire direct, dans la maison, il est recouvert d'un tissu noir afin de faire monter la température de l'air au contact du produit (voir photo 2.5).

Quelques mesures de température et d'humidité ont été relevées afin d'apprécier les conditions de séchage.



Photo 2-1 : Séchoir table



Photo 2-2 : Mise en place de la toile



Photo 2-3 : Etalage de la bouillie sur la toile



Photo 2-4 : Séchage dans la pièce



Photo 2-5 : Séchage à l'air libre dans la cour

5) Résultats - Discussion

- Les conditions de l'air ambiant durant l'essai sont les suivantes :

Température moyenne : 35° C Humidité relative moyenne : 40 %

Tableau 2-2 : Vitesses de séchage des produits

	Masse du produit avant séchage (kg)	Masse du produit séché (kg)	Quantité d'eau extraite (kg)	Durée séchage (h)	Vitesse séchage (kg/h)
Bouillie	26,6	18,4	8,2	24	0,342
Dégué	26,6	18,5	8,1	24	0,338

Les quantités à sécher quotidiennement sont peu importantes et les vitesses de séchage sont très faibles. La durée de séchage aurait pu être améliorée si les produits étaient aussitôt mis au contact du rayonnement solaire mais l'opératrice soutient qu'elle a une meilleure qualité de produit après un premier séjour dans la pièce (problème de brunissement pour la bouillie si elle sèche directement au soleil). En effet, si elle mettait directement le produit au soleil donc à une température beaucoup plus élevée alors qu'il a encore une forte teneur en eau, les réactions de brunissement pourraient être favorisées car l'eau facilite le contact entre les éléments biochimiques impliqués dans ces réactions. Si ces réactions sont à éviter, il est compréhensible de vouloir les ralentir en utilisant une température de séchage moins élevée en début de séchage jusqu'à ce que la teneur en eau soit moindre mais cela comporte le risque de favoriser le développement de microorganismes dont le développement est optimum dans ces conditions de teneur en eau et de température. Les

solutions permettant d'éviter ce développement de microorganismes ou ces réactions de brunissement pourraient donc améliorer le procédé et donc la qualité du produit soit en gardant une faible température de début de séchage et en incorporant des agents conservateurs antimicrobiens, soit en utilisant une température plus forte tout en utilisant des agents conservateurs qui inhibent les réactions de brunissement (en dénaturant les éléments biochimique à l'origine de ces réactions ou en les isolants).

L'air au contact du produit, séché au soleil dans la cour, est monté jusqu'à une température de près de 70°C, ce qui montre que la technique de séchage est assez efficace. Elle serait sûrement plus efficace si un système de circulation naturelle de l'air était prévu car l'eau extraite du produit a du mal à s'échapper du séchoir surtout que la toile déroulée sur la table ne favorise pas cette évacuation. Il serait plus judicieux de peindre le tamis en noir pour avoir le même effet d'absorption des rayons solaires tout en favorisant l'évacuation de l'eau.

Tableau 2-3 : Evolution des teneurs en eau

	Humidité avant séchage	Humidité après séchage
Bouillie	41 %	8,2 %
Dégué	51 %	8,5 %

Les teneurs en eau finales sont relativement faibles et restent inférieures à la teneur en eau de conservation de ce type de produits alimentaires mais vu que les produits ne sont sortis de la pièce qu'après un séjour de près de 17 h dans la pièce, on peut penser que dans la première phase du séchage, la vitesse a été très faible, ce qui pourrait favoriser le développement de microorganismes (moisissures). Cependant, le fait de sécher dans la pièce et de mettre un tissu sur les produits placés dans la cour a certainement pour effet de réduire considérablement la contamination par la poussière et les corps étrangers.

6) Conclusion

Cette méthode de séchage, bien que de durée très longue, donne des résultats assez bons, du moins en ce qui concerne les teneurs en eau finales. Les autres paramètres déterminant la qualité du produit seront évalués au laboratoire pour donner une appréciation plus exacte sur le produit. Mais il demeure de façon générale que le séchage pratiqué à l'air libre est une technique qui a ses limites :

- Elle n'est pas adaptée à de grandes quantités de produits à sécher
- Elle ne permet pas d'obtenir des produits de bonne qualité (poussières, pourrissement, etc.)

- Elle est fortement dépendante des conditions climatiques ; et si le temps de séchage est trop long, il y a dégradation du produit (fermentation).

2.3.1.2. Séchage au séchoir Atesta

Un essai sur le séchage du dégué a été réalisé à l'entreprise Succulence. Il s'est déroulé le 8 mai de 15h 40 min à 9h 40 min le lendemain soit 18h de séchage.

1) But de l'essai :

- Mesurer les conditions de séchage (température et humidité ambiantes)
- Mesurer la cinétique de séchage du produit sur une claie témoin
- Mesurer les consommations d'énergie globales et par phase de séchage (éventuellement)
- Déterminer les puissances par phase de séchage
- Prendre des échantillons pour déterminer les teneurs en eau des produits avant et après le séchage

2) Matériels utilisés

- Une balance
- Un chronomètre
- Une étuve
- Une centrale d'acquisition (température, humidité)

3) Méthodologie

- Prélèvement d'un échantillon pour déterminer la teneur en eau initiale
- Pesée de toutes les claies vides avant l'opération de séchage (tare)
- Mise en place de la centrale d'acquisition pour les mesures de température et d'humidité
- Pesée de la bouteille de gaz avant le séchage
- Pesée de toutes les claies chargées avant l'opération de séchage
- Pesée d'une claie témoin toutes les heures
- Mesurer le temps de séchage
- Pesée de la bouteille de gaz toutes les heures mais aussi lors des changements de régime
- Pesée de toutes les claies chargées après l'opération de séchage
- Prélèvement d'un échantillon du produit séché pour déterminer la teneur en eau finale.

4) Description de l'expérimentation

L'expérience consiste à suivre l'opération de séchage de dégué dans une unité qui utilise un séchoir Atesta (séchoir à combustion de gaz et à convection naturelle).

Le séchoir est formé de 2 cellules avec chacune 9 claies. Chaque claie est chargée du produit préalablement précuit à la vapeur puis pesée sur une balance. Les masses sur les claies sont d'environ 5 kg. Pour suivre la cinétique de séchage, il était prévu de mesurer chaque heure la masse d'une claie témoin mais cela n'a pas pu se faire (la transformatrice n'ayant pas donné son autorisation) ; les phases de permutations ont été mises à profit pour peser cette claie témoin. Il y a eu 4 permutations des claies. La consommation d'énergie a pu être suivie régulièrement par des pesées de la bouteille de gaz chaque heure mais aussi lors des changements de régime du brûleur.

Certains paramètres de fonctionnement sont mesurés par une centrale d'acquisition ; il s'agit de :

- La température de l'air ambiant
- La température de l'air avant le produit (température de l'air chauffé dite « d'attaque »)
- La température de l'air après le produit
- L'humidité de l'air ambiant
- L'humidité de l'air avant le produit (air chauffé par la combustion du gaz)

L'humidité de l'air après le produit (air sortant du séchoir) n'a pu malheureusement être mesurée pour des raisons techniques bien qu'elle soit un paramètre très important pour apprécier la qualité du séchage.

Ces paramètres sont suivis durant tout le séchage (chaque heure).

Le débit du gaz est réglé en fonction de la température atteinte à l'intérieur du séchoir. L'opératrice a décidé de ne pas dépasser 85 °C sur le thermomètre accompagnant le séchoir ; Ainsi, elle joue sur la vanne pour avoir des températures autour de cette valeur.

D'autres paramètres seront calculés pour évaluer les performances du séchage à savoir :

- La vitesse de séchage V

$$V = \frac{m_1 - m_2}{t_1 - t_2} \text{ avec } m_1 \text{ et } m_2 \text{ les masses mesurées aux instants } t_1 \text{ et } t_2$$

- Le rapport de séchage Rs

C'est le quotient de la masse de produit après séchage sur sa masse initiale.

- La teneur en eau à base humide H (teneur en eau avant et après séchage)

$$H = \frac{M_e}{M_t} \text{ avec } M_t = M_e + M_s; M_t \text{ la masse totale du produit, } M_e \text{ la masse d'eau}$$

contenue dans le produit et M_s la masse de matière sèche du produit.

- La cinétique de séchage

Elle représente la variation de la teneur en eau du produit en fonction du temps.

- Le rendement énergétique du séchage

$$\eta = \frac{M_e \cdot L_v}{M_g \cdot PCI} \text{ avec } M_e \text{ la masse d'eau évaporée, } L_v \text{ la chaleur latente}$$

d'évaporation de l'eau qui vaut 2250 kJ/kg, M_g la masse de gaz brûlé, PCI le pouvoir calorifique inférieur du gaz butane qui vaut 45600 kJ/kg

5) Résultats expérimentaux - Discussion

Tableau 2-4 : Suivi de la température et de l'humidité au cours du séchage

Suivi de quelques paramètres durant le séchage						
	Paramètres de l'air à l'entrée		Paramètres de l'air à la sortie		Paramètres de l'air ambiant	
Durée séchage	Température air entrant (°C)	Humidité relative (%)	Température (°C)	Humidité relative (%) ***	Température (°C)	Humidité relative(%)
0 h	75,5	8,3	46,6	-	39,26	36,7
1 h	88,3	3,6	51,5	-	39,59	31,2
2 h	92,94	2,1	56,4	-	39,37	31
3 h *	74	6,1	55,7	-	37,13	35
4 h	64,95**	7,9	58,3	-	37,02	33,4
5 h	65,5**	9,1	58,4	-	37,7	38
6 h *	98,23	2	57,2	-	38,25	39,6
7 h	89,34	2,9	57,6	-	37,87	39,3
8 h	88,46	3,2	58,3	-	36,9	41,6
9 h	91,6	2,3	59,3	-	36,72	41,9
10 h	87,24	2,7	54,9	-	35,94	38,8
11 h	95,57	1	60,2	-	35,51	39,8
12 h	99,34	0,4	64	-	35,19	41,4
13 h	98,24	0,7	63,5	-	34,8	43
13h 20 min*	92,18	1,5	63,9	-	36,67	38,7
14 h	87,68	2,3	62,9	-	36,73	36,73
18 h	69,75	0,79	57,6	-	38,6	38,4

* Heures de permutation des claies

** Ces valeurs assez faibles pourraient s'expliquer par le fait qu'après la permutation, le capteur de température n'a pas été posé au même endroit qu'au début du séchage; cela peut être aussi dû au fait que le séchoir a été ouvert.

Les interventions sur le débit de gaz ont le plus souvent servi à maintenir la température de séchage autour de 85°C d'après le thermomètre du séchoir mais la baisse continue des températures après 12 h de séchage indique une baisse de régime du gaz ; il faut préciser que lorsque celui-ci indique 80°C, la centrale d'acquisition indique près de 90°C soit un écart d'environ 10°C. Cela montre bien que le capteur du séchoir, positionné là où il est, ne donne pas une indication très exacte de la température à proximité du produit.

*** le capteur d'humidité n'a pu être mis en place au niveau de la sortie de l'air de séchage

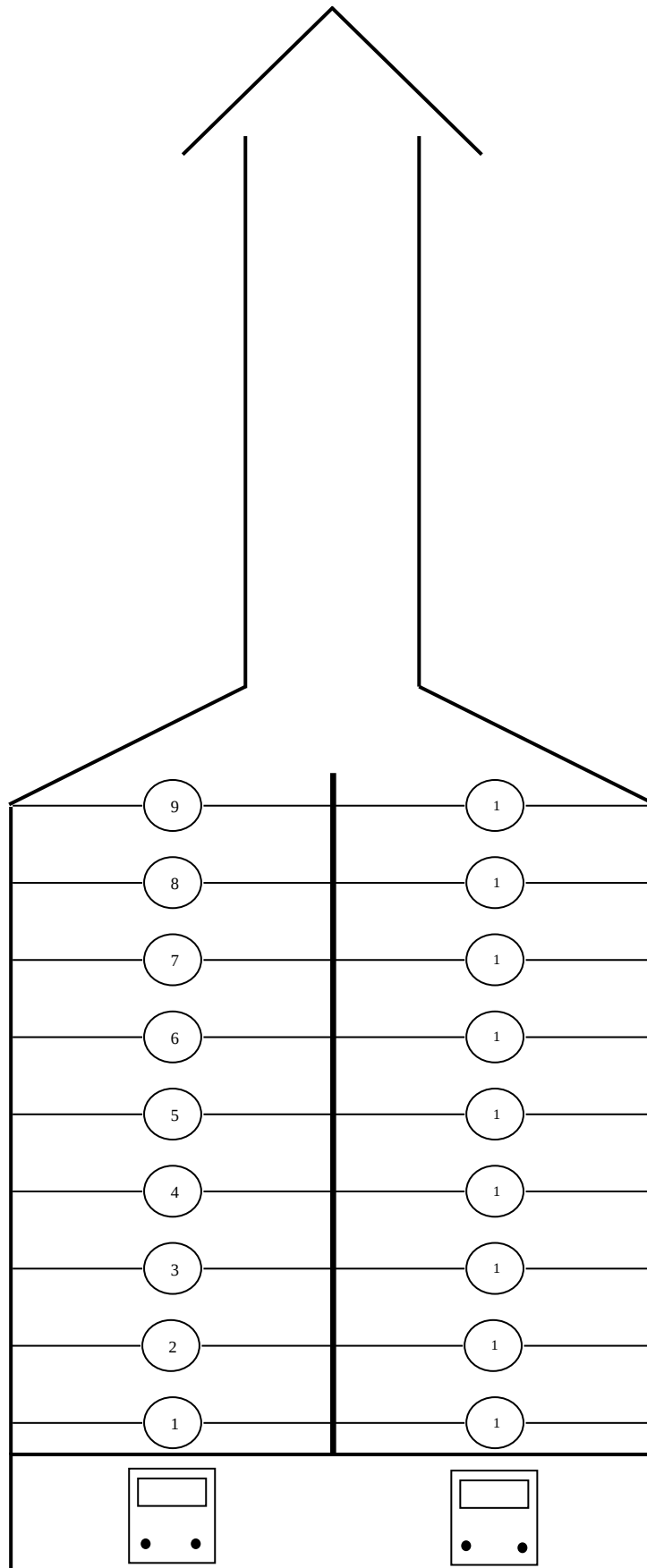
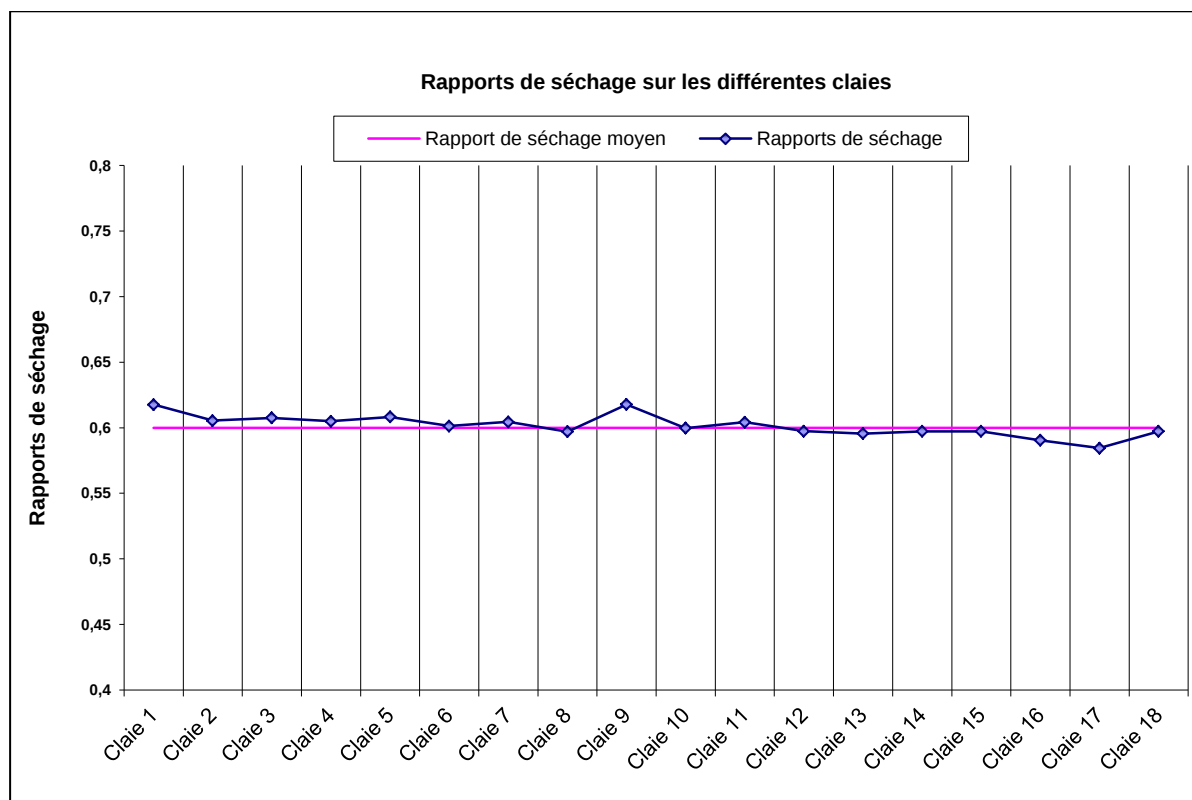
Figure 2.10 : Schéma du séchoir avec la disposition des claies

Tableau 2-5 : Evolution de la masse du produit sur les différentes claies

Claies	Poids avant séchage (g)	Poids après séchage (g)	Masse d'eau perdue (g)	Rapport de séchage (%)
Claie 1	5039	3112	1927	61,76
Claie 2	5000	3027	1973	60,54
Claie 3	5001	3038	1963	60,75
Claie 4	5000	3025	1975	60,50
Claie 5	5000	3041	1959	60,82
Claie 6	5001	3007	1994	60,13
Claie 7	5000	3022	1978	60,44
Claie 8	5000	2985	2015	59,70
Claie 9	5000	3089	1911	61,78
Claie 10	5039	3022	2017	59,97
Claie 11	5000	3021	1979	60,42
Claie 12	5000	2987	2013	59,74
Claie 13	5000	2978	2022	59,56
Claie 14	5000	2986	2014	59,72
Claie 15	5000	2986	2014	59,72
Claie 16	5001	2953	2048	59,05
Claie 17	5001	2923	2078	58,45
Claie 18	5001	2987	2014	59,73
Total	90 083	54 189	35 894	
Moyenne				60,15
Ecart type				1,25

Le tableau 2.5 montre que les pertes en eau sur les différentes claies sont relativement homogènes, ce qui prouve que les opératrices ont une assez bonne maîtrise du séchage à travers les permutations des claies. Cela se traduit par des rapports de séchage Rs, sur les différentes claies (comme en moyenne) proches de 60 % comme illustré par la figure 2.11.

Figure 2.11 : Rapport de séchage sur les différentes claies

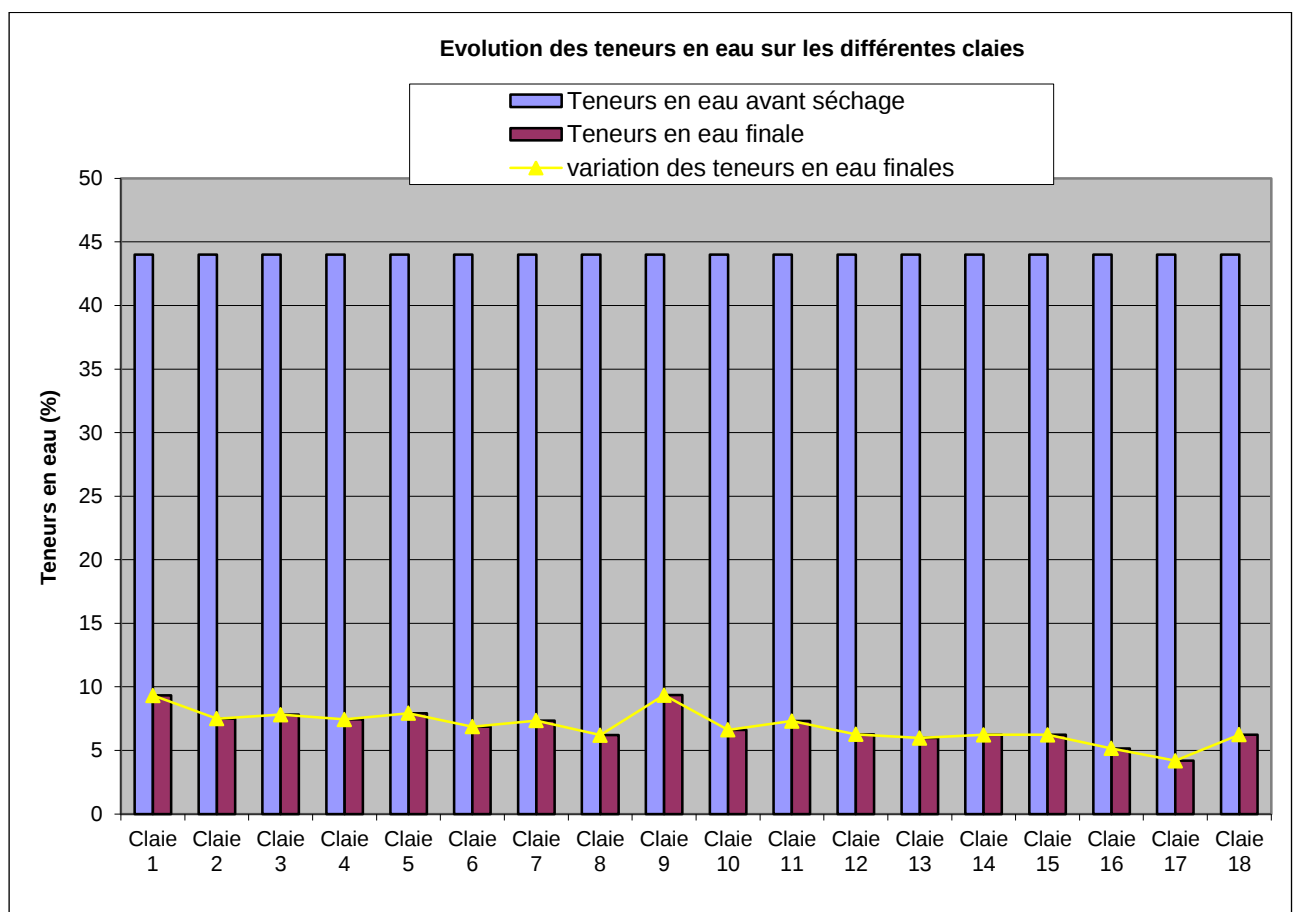
▪ Variation des teneurs en eau des différentes claies avant et après le séchage

Un échantillon a été prélevé sur la claie 5 avant le séchage afin de déterminer sa teneur en eau au laboratoire. La valeur de 44 % mesurée, a été considérée comme étant celle de toutes les autres claies. A partir des pertes de masse des claies durant le séchage (tableau 2.5 précédent), il a été procédé au calcul des teneurs en eau (tableau 2.6) illustrées par la figure 2.12. Parallèlement, un échantillon a été prélevé sur la claie 5 séchée afin de mesurer la teneur en eau en laboratoire et vérifier les résultats obtenus par calcul. Le faible écart entre les deux valeurs (7,93 % par le calcul et 8,1 % par le test de laboratoire) confirme les valeurs de la figure 2.12.

Tableau 2-6 : Teneurs en eau H sur les différentes claies séchées

Claies	Claie1	Claie 2	Claie 3	Claie 4	Claie 5	Claie 6	Claie 7	Claie 8	Claie 9
H (%)	9,32	7,50	7,82	7,44	7,93	6,87	7,35	6,20	9,36
Claies	Claie10	Claie11	Claie12	Claie13	Claie14	Claie15	Claie16	Claie17	Claie18
H (%)	5,98	7,32	6,26	5,98	6,23	6,23	5,16	4,19	6,24

Figure 2.12 : Evolution des teneurs en eau sur les claies durant le séchage



Les teneurs en eau sur les différentes claies tournent autour d'une moyenne de 7%. La claie 5 (claie témoin) a une teneur en eau qui passe de 44 % à près de 8 %. Les claies qui ont le moins séchées ont des teneurs en eau de près de 10 % et celles qui ont le plus séchées sont autour de 6 %, mis à part la claie 17 dont le taux d'humidité est à 4,2 %. Considérant que la teneur en eau de conservation est de 12/13 %, on peut dire que le produit a globalement trop séché et que l'on pourrait envisager de diminuer le temps de séchage afin d'économiser du gaz et ainsi dépenser moins d'argent, mais aussi d'en gagner plus lors de la commercialisation par une augmentation de la masse du produit fini.

6) Vitesse de séchage sur une claie témoin

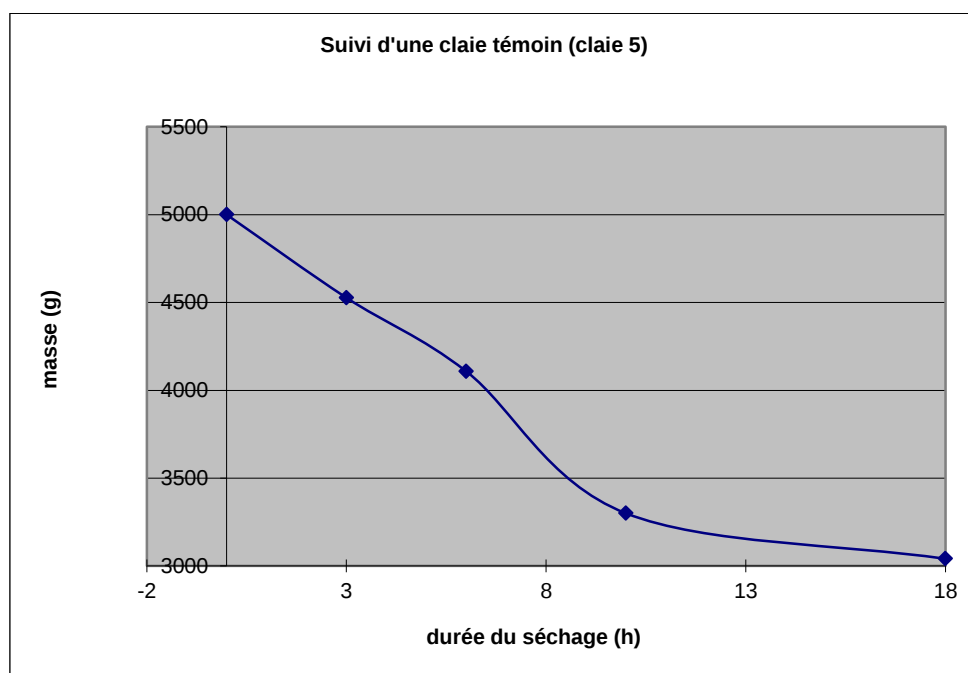
Il n'a pas été possible de peser la claie témoin (claie 5) toutes les heures car la transformatrice ne nous en a pas donné l'autorisation. Le suivi de cette claie pendant les permutations au cours du séchage a donné les résultats consignés dans le tableau 2.7 :

Tableau 2-7 : Suivi de la claie 5 lors du séchage

Suivi d'une claie témoin (claie 5)					
Durée séchage (h)	0	3	6	10	18
Poids produit (kg)	5,000	4,527	4,108	3,300	3,041
Vitesse de séchage (kg/h)	0	0,16	0,14	0,20	0,03

On constate d'après les résultats du tableau 2.7 que la vitesse de séchage chute brusquement et de façon linéaire après dix heures de séchage. En effet, on observe entre 0 et 10 h de séchage une perte en eau de 1,7 kg soit 87 % de la perte totale pour seulement 0,26 kg d'eau évacuée dans les huit dernières heures, soit 13 % du total extrait. Cela laisse supposer deux phases distinctes dans le processus de séchage.

Figure 2.13 : Evolution de la masse sur la claie témoin



L'allure de la courbe de l'évolution de la masse de la claie témoin (figure 2.13) confirme l'hypothèse selon laquelle le séchage s'est déroulé en deux phases :

- La phase d'évacuation de l'eau libre dans les dix premières heures du séchage caractérisée par une importante perte en eau
- La phase d'évacuation de l'eau liée dans les huit dernières heures

7) Besoins énergétiques

Tableau 2-8 : Consommations d'énergie

<i>Quantité de gaz consommé (kg)</i>	<i>Durée de séchage (h)</i>	<i>Masse de produit après séchage (kg)</i>	<i>Consommation spécifique de gaz (kg/kg de produit sec)</i>	<i>Consommation horaire de gaz (kg/h)</i>
6,6*	18	54,19	0,122**	0,37

* Correspond à 83,6 kWh

** Correspond à 1,55 kWh/kg de produit séché

Tableau 2-9 : Rendement énergétique du séchage

<i>Masse d'eau extraite (kg)</i>	<i>Chaleur latente d'évaporation de l'eau (kJ/kg)</i>	<i>Masse de gaz butane brûlé (kg)</i>	<i>Pouvoir calorifique inférieur du gaz (kJ/kg)</i>	<i>Rendement énergétique du séchage (%)</i>
35,9	2 250	6,6	45 600	27

Le rendement de 27 % est relativement faible mais la valeur calculée est proche de ce qui a pu être relevé sur la bibliographie des séchoirs à convection naturelle.

Tableau 2-10 : Evolution de la puissance au cours du séchage

Différents régimes	De 0 à 40 min	De 40 min à 1h 05 min	De 1h 05 min à 3h 46 min	De 3h 46 min à 10h 16 min	De 10h 16 min à 13h 35 min
Temps correspondant (s)	2400	3900	9660	7440	25500
Gaz consommé (kg)	0,5	0,5	1	0,7	2,4
Energie correspondante (kJ)	22800	22800	45600	31920	109440
Puissance correspondante (kWth)	9,50	5,85	4,72	4,29	4,29

Différents régimes	De 13h 35 min à 14h 43 min	De 14h 43 min à 15h	De 15h à 16h 56 min	De 16h 56 min à 17h 25 min	De 17h 25 min à 18h
Temps correspondant (s)	4080	1020	6960	1740	2100
Gaz consommé (kg)	0,6	0,1	0,5	0,2	0,1
Energie correspondante (kJ)	27360	4560	22800	9120	4560
Puissance correspondante (kWth)	6,71	4,47	3,28	5,24	2,17

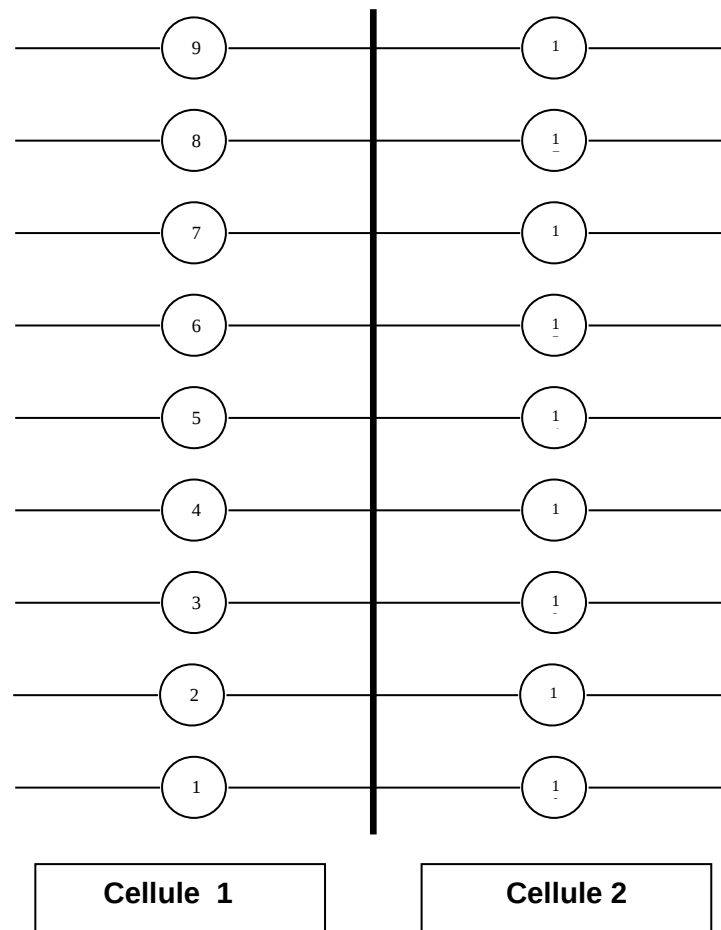
- Puissance moyenne : 4,64 kWth
- Puissance maximale : 9,5 kWth

Les puissances lors du séchage passent de 9,5 à 2,17 kWth mais il est important de préciser que la phase de démarrage, correspondante à 9,5 kWth ne dure que 40 min (pour faire monter la température de séchage). Donc il sera important de tenir compte de cet état de fait pour le dimensionnement des séchoirs. Il serait judicieux, ici par exemple, de dimensionner à une puissance de 6 kWth quitte à augmenter un peu le temps de séchage ou chercher à améliorer le rendement de séchage pour éviter le surdimensionnement des séchoirs.

8) Suivi des permutations des claies

Les claies ont été permutées 4 fois durant le processus de séchage, cela dans le but d'homogénéiser le séchage. Les permutations se sont déroulées respectivement après 3 h, 6 h, 13h et enfin 16h de séchage. Lors des permutations, le produit sur les claies est brassé manuellement ; certaines claies sont permutées et d'autres gardent leur position mais sont retournées (rotation de 180° suivant l'axe horizontal.) car selon l'opératrice, l'air chaud ne parvient pas uniformément sur la claie.

En début de séchage, les claies numérotées sont disposées comme suit dans les deux cellules :



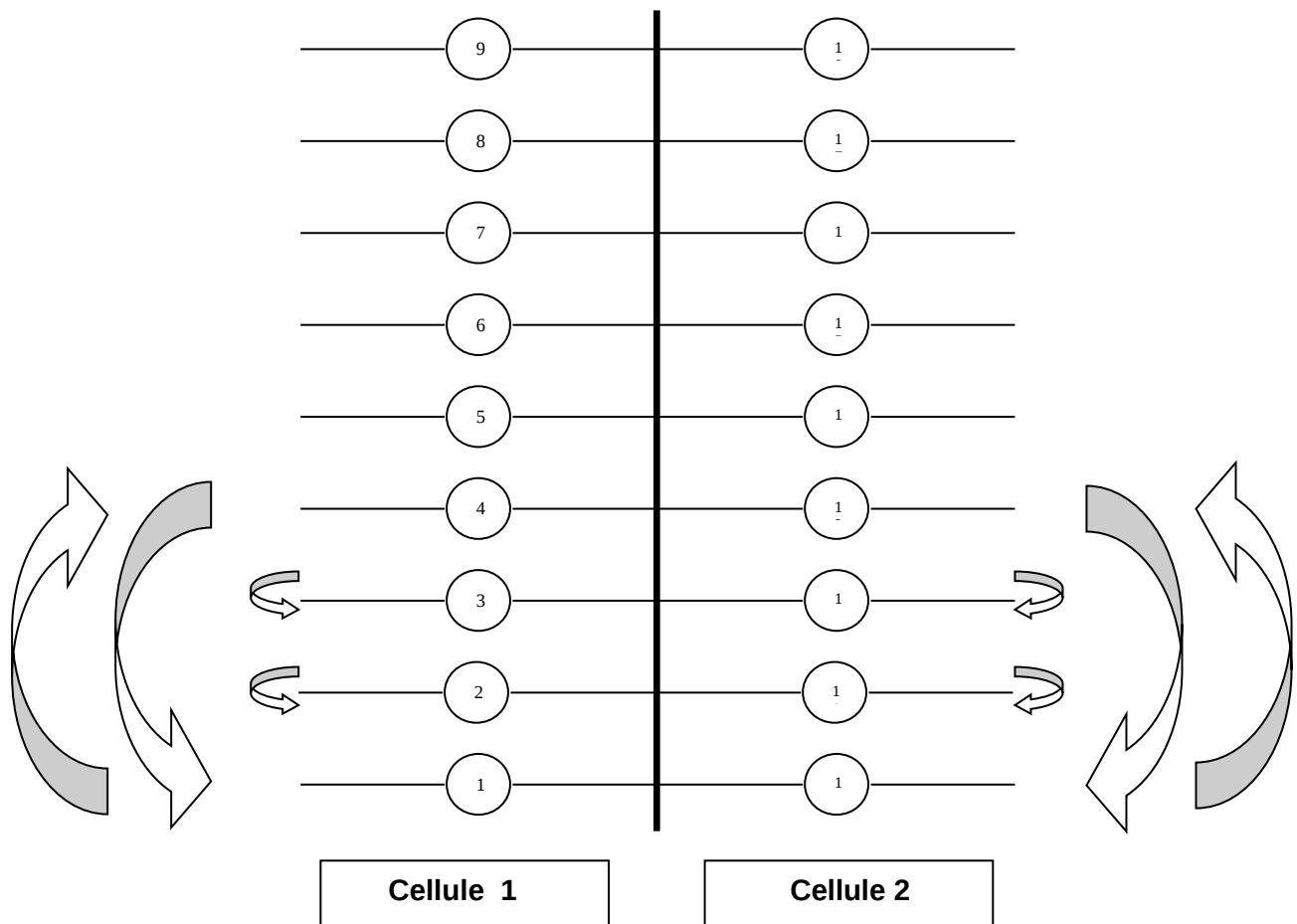
Protocole de permutation des claies

a. Première permutation

Elle intervient après trois heures de séchage.

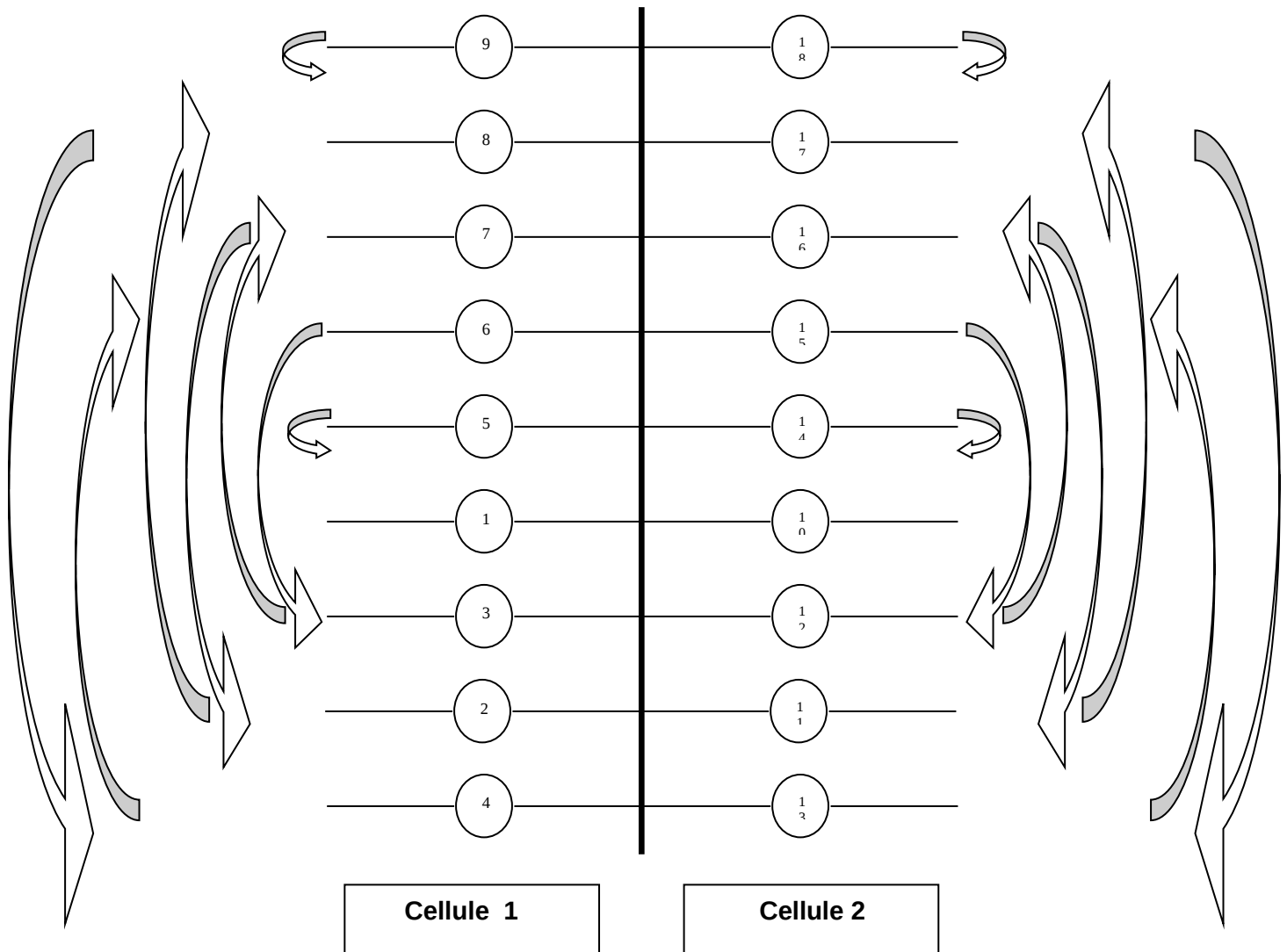
Les claies 1 et 4 sont permutées, de même que les claies 10 et 13.

Les claies 2, 3, 11 et 12 sont retournées.



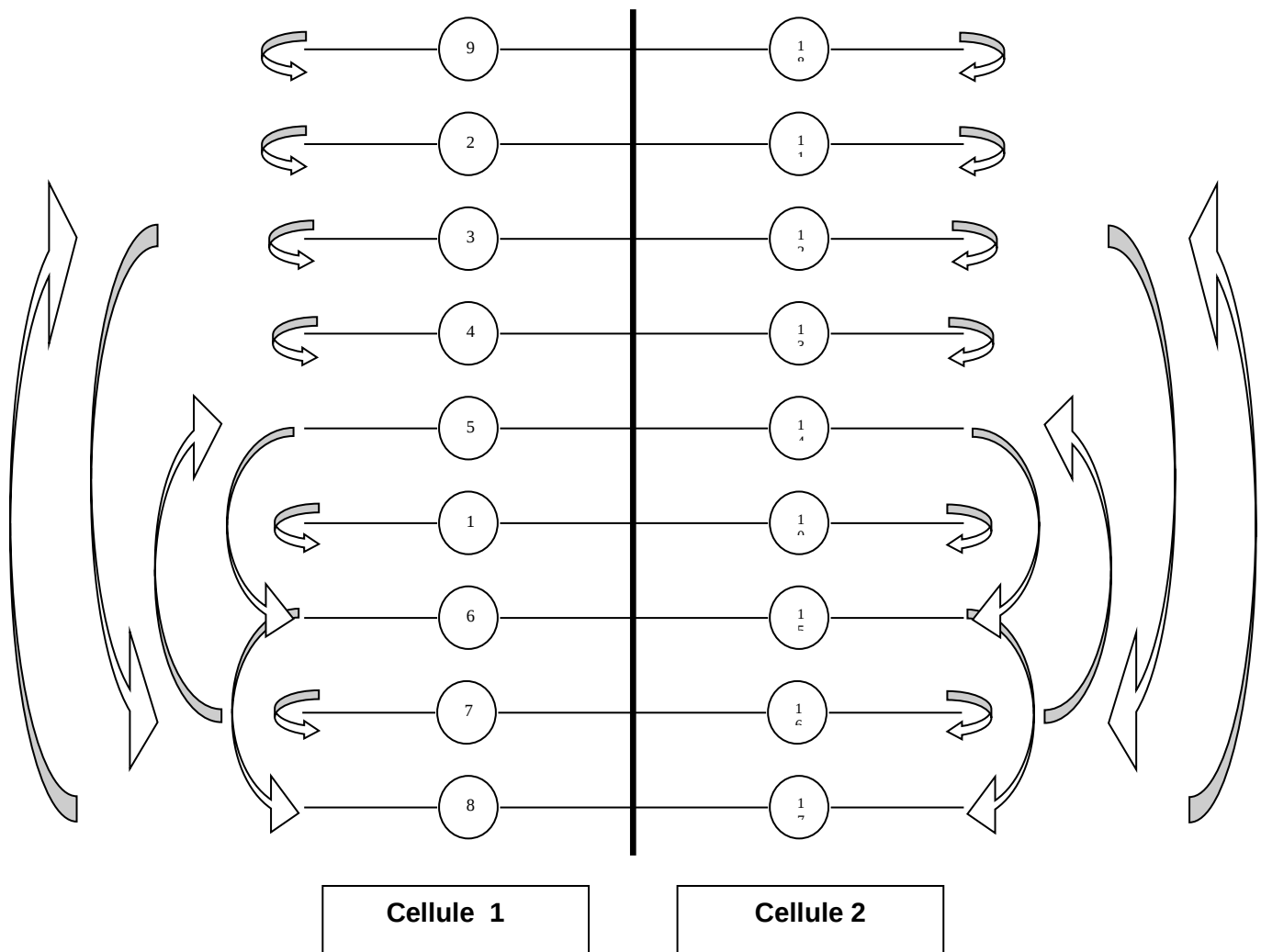
b. Deuxième permutation :

Elle s'est effectuée à 21h 31 min soit après environ 6 heures de séchage.



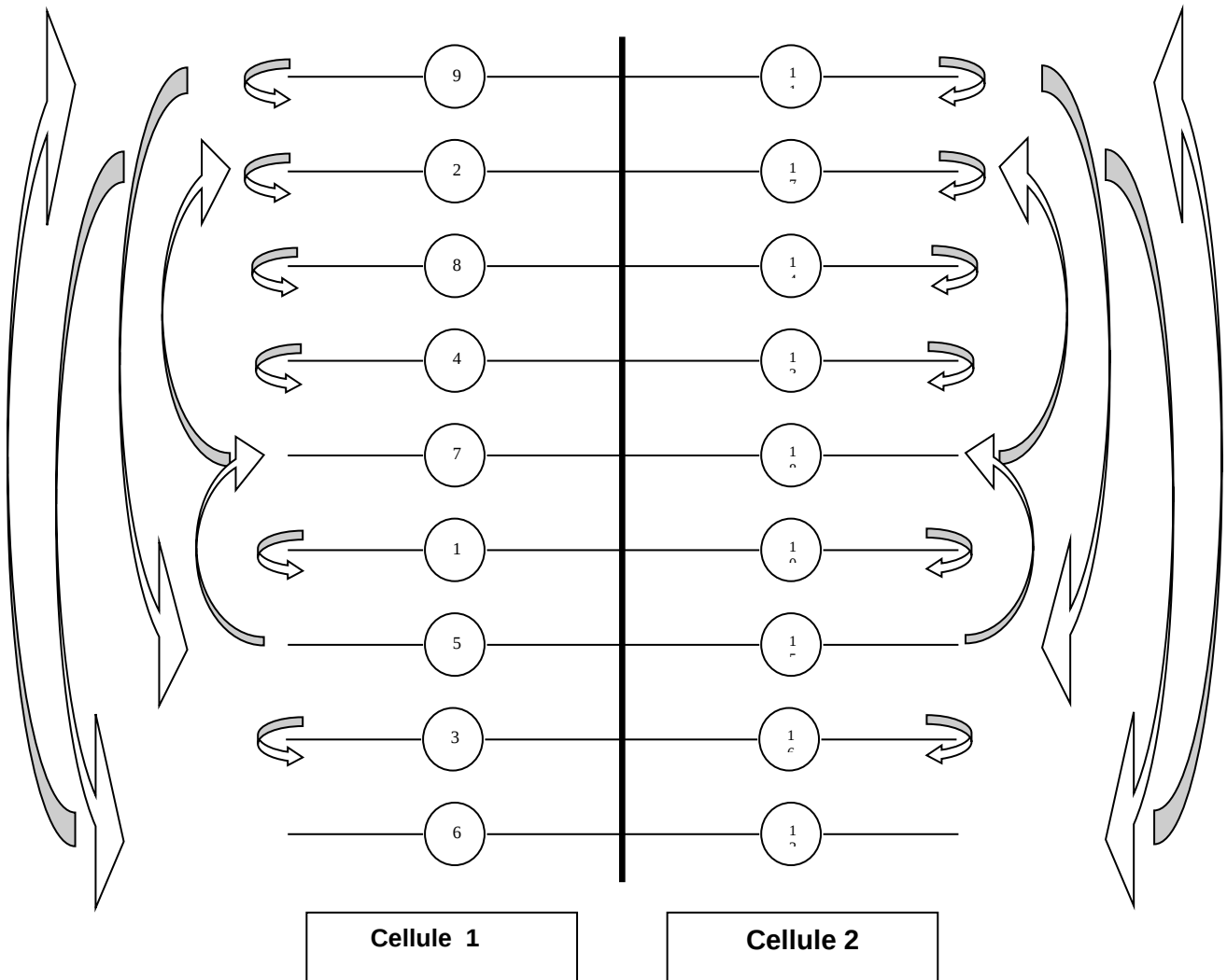
c. Troisième permutation

Elle est intervenue vers 5h du matin soit après plus de 13h de séchage



d. Quatrième permutation

La quatrième et dernière permutation prévue est intervenue à 7h 20 min, après près de 16 heures de séchage.



➤ Observations en fin de séchage

Après 16 h 20 min de séchage, estimant que le séchage sur la cellule 2 est presque à son terme, l'opératrice a coupé l'un des deux brûleurs de cette cellule pour laisser l'autre à faible régime.

Après 17h 25min de séchage, l'opératrice a procédé à un dernier brassage du produit sur les claies.

Au bout de 17h 45 min de séchage, l'un des deux brûleurs de la cellule 1 est à son tour éteint et les deux cellules fonctionnent chacune avec un brûleur.

A 20 min de la fin du séchage, une dernière « semi permutation », apparemment non prévue, intervient et la claie 9 est mise en première position jusqu'à la fin du séchage, de

même que la 18. Les autres changements de claies ne semblent suivre aucun protocole prédéfini mais se font après que l'opératrice ait apprécié le séchage des produits « en les croquant ».

On peut dire que le protocole de permutation des claies est efficace au vu des résultats obtenus.

On peut aussi remarquer les valeurs de R_s des claies de la première cellule sont majoritairement au dessus de la moyenne de 0,6 contrairement à celles de la deuxième cellule, ce qui signifie que la première cellule « a un peu moins bien séché » que la deuxième. Cela peut s'expliquer par le fait que la puissance du brûleur peut varier d'une cellule à l'autre car elle n'est appréciée que visuellement pour son réglage. En effet, l'opératrice a soutenu que cela est dû au fait que durant la nuit « le feu » sur la deuxième cellule était plus intense.

Enfin, la figure 2.11 montre aussi que les produits sur les claies 1 et 9 avec un R_s égal à 0,62 sont moins secs que les autres. On pouvait s'y attendre car pour la claie 9, elle est restée en haut de la cellule presque 16h soit après plus de 80% du temps de séchage ; or cette position est la moins favorable pour le séchage car l'air y est plus humide après avoir traversé toutes les claies. La claie 1 quant à elle, après avoir séjourné 3h à la première position (position la plus favorable) est restée à la position 4 jusqu'à la fin du séchage sans être permutée. En fait, on remarque que les claies qui ont le plus séchées sont celles qui ont séjourné le plus de temps aux trois premières positions comme la claie 17 (claie qui a le plus séché) qui est restée près de 7h à la première position de la cellule 2.

e. Conclusion

Le protocole de permutation des claies, bien qu'approximatif vers la fin du séchage, est assez efficace car on n'a pas observé des écarts notables dans les rapports de séchage. Cependant, on pourrait certainement améliorer la conduite du séchage en faisant en sorte que toutes les claies aient un minimum de temps de séjour aux trois premières positions (au moins 4 à 5h). Cela pourrait se faire par exemple en intercalant une permutation supplémentaire entre la sixième heure et la treizième heure de séchage, laps de temps relativement long.

Il serait aussi utile de prévoir un système de contrôle des brûleurs afin de s'assurer d'avoir les mêmes puissances au niveau des deux cellules. Cela permettra d'avoir un séchage plus homogène.

2.4. Analyse de la qualité des produits roulés dans le processus de fabrication

Pour évaluer la qualité des produits roulés, une série d'analyses a été faite durant le processus de fabrication. Ces analyses, dont la plupart ont été faites dans les laboratoires de l'IRSAT, ont pour but de mesurer les paramètres suivants :

- Les coliformes totaux

Ce sont des microorganismes indicateurs dont le dénombrement permet de déceler le niveau de pollution d'origine organique mais ils ne signalent pas nécessairement une pollution fécale. Les principaux genres inclus dans le groupe sont : Citrobacter, Entérobacter, Escherichia, Klebsiella et Serratia (CEAEQ, 2000). La presque totalité des espèces sont non pathogènes et ne représentent pas de risque direct pour la santé (Edberg et al., 2000 ; OMS, 2000), à l'exception de certaines souches d'Escherichia coli ainsi que de rares bactéries pathogènes opportunistes.

- La flore totale

Elle représente l'ensemble des microorganismes vivants présents dans l'aliment.

- Les agents pathogènes

Ce sont les germes qui représentent un risque pour la santé des consommateurs donc il est important de s'assurer que leur charge dans les aliments destinés directement à la consommation ne dépasse pas les normes. Ils ont souvent pour origine la pollution fécale.

- Les levures et moisissures

Une levure est un champignon unicellulaire apte à provoquer la fermentation des matières organiques animales ou végétales. Les moisissures qui sont filamenteuses peuvent produire des mycotoxines, substances dangereuses pour la santé. Elles posent également des problèmes de qualité quand l'humidité du produit permet leur développement (ceci se produit souvent peu après ouverture des emballages, entraînant une absorption de l'humidité de l'air par le produit, et donc des conditions favorables à une croissance de ces germes).

- Les matières étrangères

Ce sont des substances indésirables qui ne doivent pas contaminer une denrée alimentaire. Il s'agit de se conformer aux normes en vigueur et d'éviter le rejet du produit par les consommateurs. Dans le cas des produits étudiés ici, le sable notamment, est à éviter ainsi

que d'autres contaminants potentiels tels que les excréments d'animaux, les débris, les insectes, leurs œufs, etc.

- Les staphylocoques

Ce sont des bactéries pathogènes de forme arrondie, dont les individus sont groupés en forme de grappe, abondante dans la nature et vivant souvent sur la peau et les muqueuses. Une espèce, le staphylocoque doré (*S. aureus*), provoque des infections banales ou graves, telles que le furoncle, l'anthrax, le panaris, la sinusite, etc. L'ingestion d'entérotoxines produites par les souches de *S. aureus* est à l'origine d'intoxications alimentaires.

- La texture

La texture est très importante dans l'acceptabilité du produit. Les caractéristiques recherchées varient selon le produit et concernant les produits roulés séchés, il ne faut pas que le granule soit friable. La texture dépend de la composition biochimique des produits, des réactions entre les composants (ex : l'eau et les autres composants) et des conditions opératoires (pressions appliquées par exemple aux granules lors de l'opération de roulage, les niveaux de températures à différentes phases du séchage). En effet le dégué par exemple qui subit une précuisson avant séchage, subit des modifications de texture lors de cette précuisson par la gélification (partielle) de l'amidon favorisée par la teneur en eau du produit, la vapeur et la température élevée, l'amidon qui devient alors comme une colle qui permet de réduire la friabilité des granules. Cette technique est utilisée également pour réduire le taux de brisure dans la production de riz étuvé.

- La colorimétrie

La couleur du produit pose des problèmes organoleptiques visuels décisifs pour la décision d'achat par un client ou un consommateur. Il faut qu'elle corresponde aux habitudes du consommateur pour pouvoir se vendre.

Dans le souci d'améliorer la pratique de la transformation et d'œuvrer pour l'amélioration de la qualité du produit, trois points de prélèvement ont été ciblés : le début du processus de transformation pour apprécier la matière première (charge initiale du produit concernant la microbiologie), avant et après le séchage pour évaluer l'impact du séchage sur le produit. L'analyse du produit juste avant le séchage permettra, sur le plan de l'hygiène, d'avoir une idée sur les pratiques des transformatrices et sur les équipements utilisés.

2.4.1. Qualité sanitaire

La qualité sanitaire concerne les caractéristiques du produit pouvant affecter la santé collective. On s'intéressera à la charge du produit en levures et moisissures, en staphylocoques, en flore totale et en coliformes totaux. L'objectif est de déterminer, par leur présence, les indicateurs de mauvaises pratiques d'hygiène mais aussi les agents pathogènes. La recherche des matières étrangères n'a pu être effectuée par le laboratoire.

○ Résultats-discussion

		Levures et moisissures (CFU/g)			Staphylocoques (CFU/g)			Flore totale (CFU/g)			Coliformes totaux (CFU/g)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Unité A		0	4E01	0	0	0	0	1,4E05	4,3E03	5,1E05	5,9E04	1,4E02	6,7E03
Unité B	Dégué	3,9E03	-	4,3E02	0	-	0	6,3E05	-	1,0E06	1,2E05	-	1,1E05
	Bouillie	3,9E03	-	4,0E06	0	-	0	6,3E05	-	1,3E07	1,2E05	-	1,4E04

1 : matière première (mil décortiqué)

2 : avant le séchage

3 : après le séchage

Les produits de l'unité B n'ont pu être analysés à l'étape 2 pour des raisons de manque de coordination entre l'unité et le laboratoire d'analyse. La denrée étant périssable, il n'a pas été possible de la garder le temps que le laboratoire puisse démarrer les analyses.

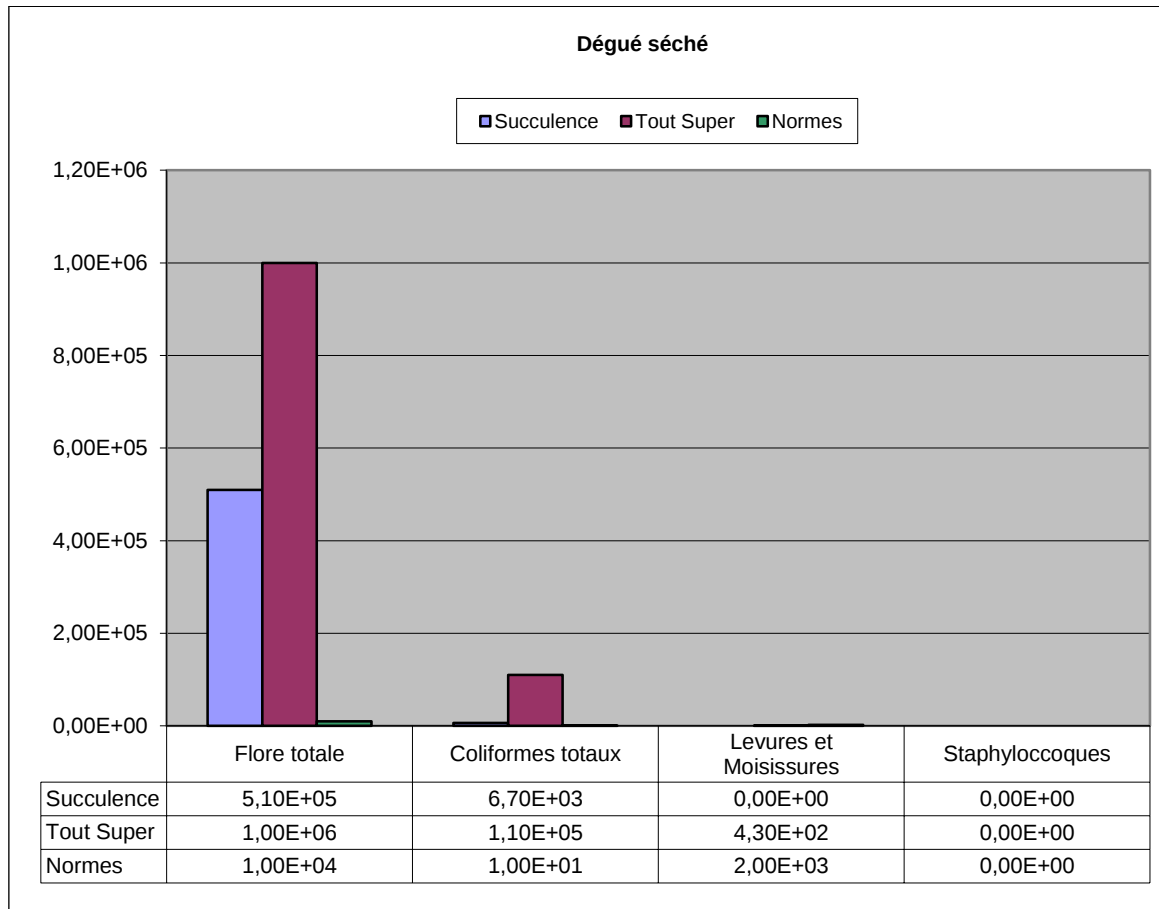
Les résultats des analyses microbiologiques nous permettent de tirer les conclusions générales suivantes :

➤ Concernant les produits finis

Le dégué de l'unité A est moins chargé en microorganismes que celui de l'unité B.

On observe une absence de staphylocoques pour les deux unités, ce qui est conforme aux normes.

Les produits de l'unité B, séchant à l'air libre, sont contaminés en levures et moisissures, bien que ne dépassant pas les normes, alors que celles-ci sont absentes sur les produits de l'unité A séchant avec Atesta (figure 2.14).

Figure 2.14 : Charge microbologique du dégué au niveau des deux unités

Ces résultats confirment certaines hypothèses avancées sur la qualité des produits des deux unités selon lesquelles les produits de l'unité B sont, de par leur procédé de fabrication, plus sujet au développement de moisissures et d'autres microorganismes que ceux de l'unité A.

En outre, les normes sur les coliformes totaux et la flore totale sont dépassées au niveau des deux unités, ce qui indique que les pratiques d'hygiène dans le processus de transformation, y compris le séchage, sont à améliorer. En effet, le dépassement des normes n'implique pas nécessairement un risque pour la santé publique mais doit, tout de même, alerter sur la nécessité de surveiller davantage la chaîne alimentaire.

Cependant, on note une absence de staphylocoques, germes pathogènes, pour l'ensemble des produits des deux unités, ce qui constitue un bon indice.

➤ Concernant la matière première

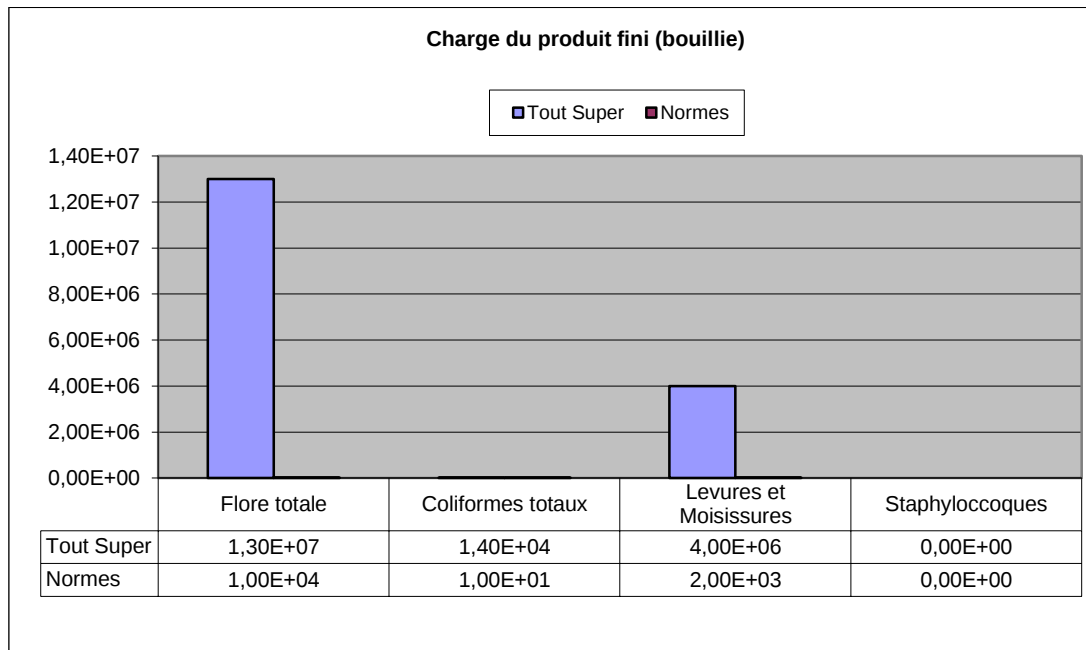
La matière première utilisée au niveau de l'unité A est moins infestée que celle de l'unité B. Il est important pour cette dernière d'améliorer son système d'approvisionnement et de stockage de cette matière première afin de limiter au maximum la charge microbologique

initiale du produit. En effet, elle pourrait contribuer à rendre le produit fini, destiné à être vendu, impropre à la consommation.

➤ **Autres observations importantes**

Les grumeaux de bouillie issus de l'unité B, en plus d'avoir des charges en coliformes et en flore totale dépassant les normes, sont colonisés par des levures et moisissures au delà de la limite permise comme indiqué par la figure 2.15 ci-dessous.

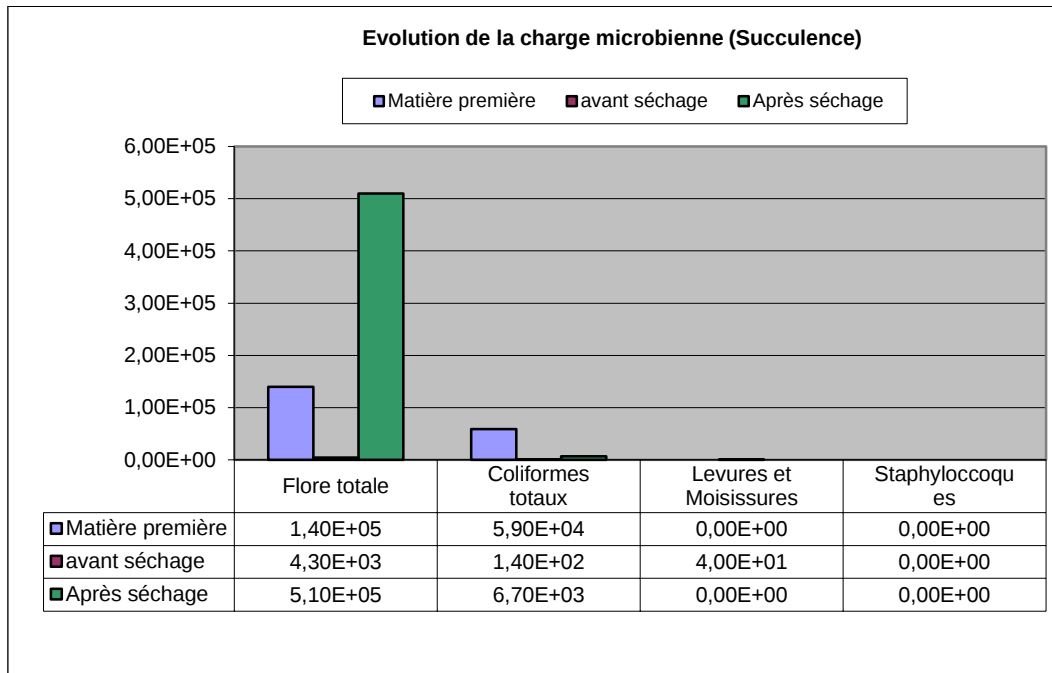
Figure 2.15 : Charge microbologique de la bouillie issue de l'unité B



Ce taux excessif de levures et moisissures constitue un danger pour la santé à cause du risque de production de mycotoxines par ces microorganismes. Mais il confirme l'idée, déjà émise, selon laquelle le séchage à l'air libre dans une pièce a favorisé le développement de moisissures du fait d'une vitesse de séchage trop faible.

L'évolution du produit au niveau de l'unité A (figure 2.16) montre que le séchage n'a eu pour effet, sur le plan microbiologique, que de détruire les levures et moisissures. En effet, il est établi que les températures atteintes par le produit au cours du séchage ne permettent pas une destruction efficace de tous les microorganismes donc seules les bonnes pratiques d'hygiène peuvent maintenir la charge microbienne dans les limites acceptables. L'augmentation de la flore totale et des coliformes prouve que le processus de séchage doit être mieux surveillé et qu'il faille, par exemple, éviter de brasser le produit sur les claies avec la main au moment des permutations.

L'absence des levures et des moisissures après le séchage s'explique par le fait que ces microorganismes ne survivent pas en général à des températures supérieures à 65°C.

Figure 2.16 : Evolution de la charge microbienne au niveau de l'unité A

2.4.2. Qualités organoleptiques

L'acceptabilité ou l'appétence d'un aliment dépend à la fois de certaines de ses caractéristiques physiques et chimiques, que l'on peut regrouper sous le terme de qualités organoleptiques, et de la perception que les consommateurs ont de ces qualités organoleptiques à travers les cinq sens que sont : la vision, l'odeur, le goût, l'ouïe et le toucher.

Elles concernent dans ce cas la couleur, l'odeur et la texture.

Pour apprécier la couleur, un référencier a été utilisé (nuancier de couleur). Pour l'odeur et la texture, l'appréciation est sensorielle.

- Analyse des résultats
 - Concernant la couleur

L'étude de la couleur s'est faite grâce au nuancier de couleur « Système Technocolor, CHABAUD S.A. »

		Codes des couleurs		
		Couleur mil	Couleur avant séchage	Couleur après séchage
Dégué	Unité A	E5-1	E7-34	E6-35
	Unité B	E4-56/E5-1	E7-34	E7-35
Bouillie	Unité B	E5-1	E9-56	E9-56

Les couleurs de la matière première pour les deux unités ne sont pas très différentes, mais celle de l'unité B contient plus de grains de couleur sombre. Pour le dégué, les produits avant le séchage sont assez proches, mais c'est à l'issue du séchage que des différences notables sont constatées ; le dégué séché en intérieur de maison et sur table conserve pratiquement sa couleur ; par contre, celui séché avec l' « Atesta » change notablement en passant à une couleur tirant vers « le roux » (voir photos 2.6 et 2.7). Le dégué ayant subi un traitement à la vapeur est supposé libérer des sucres plus susceptibles aux réactions à l'origine de ce brunissement quand la température de séchage atteint un niveau assez élevé comme dans le cas du séchage avec l'Atesta.

La bouillie a aussi conservé sa couleur blanchâtre après le séchage sur table.



Photo 2-6 : Granules de Dégué de l'unité B



Photo 2-7 : Granules de dégué de l'unité A

- Concernant l'odeur

La matière première n'a pas d'odeur particulière si ce n'est l'odeur caractéristique du mil. Il en est de même pour les « produits avant séchage » mais après le séchage, ces odeurs caractéristiques disparaissent. Cela montre que le séchage a un impact certain sur l'odeur du produit mais cela ne constitue pas, selon les transformateurs, un problème majeur pour le consommateur car l'essentiel est que le produit n'ait pas une mauvaise odeur.

- Concernant la texture

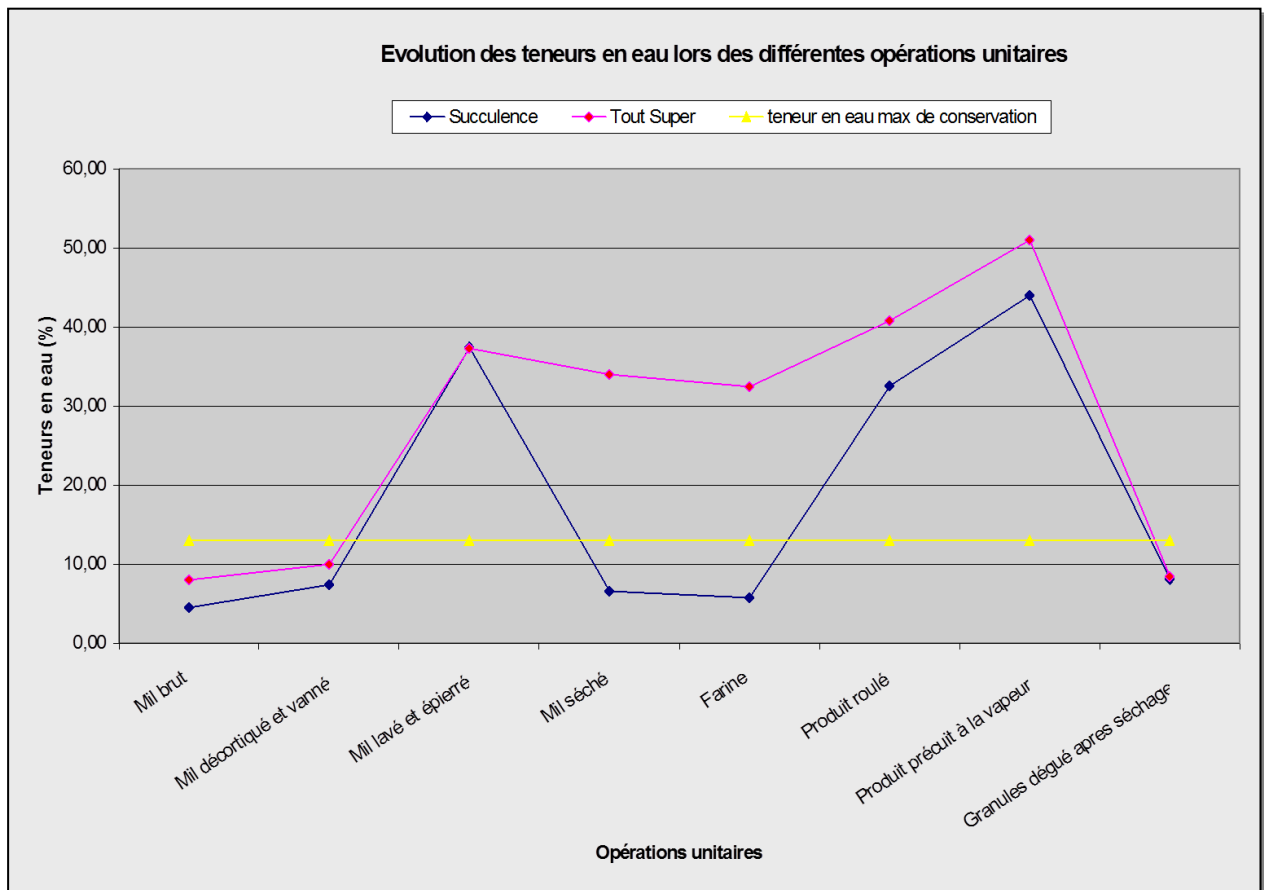
La texture est intimement liée à la teneur en eau du produit. Ainsi le produit séché durcit et devient « craquant » pour le cas du dégué. Mais sa dureté doit être telle que le granule ne soit pas friable et mais aussi qu'il ne soit pas délitescent pendant sa réhydratation au moment de la consommation. Le granule de bouillie, tout en restant assez compact, est moins dur que celui de dégué ; il est plus sensible à la friction (on observe de la poudre de bouillie dans les sachets de granules). Cette différence de texture est sûrement due au passage des granules de dégué à la vapeur avant le séchage comme expliquée précédemment.

2.4.3. Evolution des teneurs en eau

Les opérations unitaires effectuées tout au long du processus de transformation ont consisté soit à des apports soit à des prélèvements d'eau dans le produit. La figure 2.15 ci-dessous montre l'évolution des teneurs en eau au niveau des deux unités.

Les teneurs en eau au niveau de l'unité Tout Super sont plus élevées que celles de Succulence tout au long du processus de transformation mais on observe après séchage des valeurs bien en dessous de la valeur limite maximale qui est de 13%, et ce pour les deux unités. Les différences notables se situent au niveau du mil séché (après lavage) et de la farine (après mouture) : les valeurs de l'unité A sont en dessous de 10 % pendant que celles de l'unité B sont supérieures à 30%. Cela s'explique par le fait qu'au niveau de l'unité A, le séchage du mil lavé se fait sur des séchoirs coquillage pendant près de deux jours alors qu'à Tout Super le séchage se fait sur table à l'air libre durant moins d'une heure. On a donc des farines d'humidités très différentes (6% et 32%) qui n'ont donc pas la même stabilité microbologique mais puisque le produit est aussitôt transformé, les risques de dégradation ne sont pas élevés. Mais, il est important de constater que pour l'unité B, presque tout au long du processus de transformation, les teneurs en eau sont au dessus de 30 % ; cela augmente les risques de développement de bactéries et de réactions biochimiques comme la fermentation.

Figure 2.17 : Evolution des teneurs en eau durant le processus de transformation



○ Conclusion

Les résultats précédents montrent que le séchage en intérieur de maison et à l'air libre donne un produit fini de qualité comparable à celle obtenue avec le séchoir Atesta en ce qui concerne le goût, l'odeur et la teneur en eau. Par contre, la couleur est moins bien préservée avec l'Atesta qu'avec le séchage à l'air libre. Cela peut avoir un effet négatif sur la qualité globale mais ces qualités organoleptiques ne sauraient primer sur les qualités sanitaires qui restent une exigence vis-à-vis des transformateurs car pouvant causer des problèmes de santé publique.

Comme on pouvait légitimement le craindre, du fait des conditions de séchage défavorables (séchage durant près de 24 heures avec une teneur en eau de départ d'environ 50 %), les produits de l'unité B sont plus dégradés, sur le plan microbiologique, que ceux de l'unité A. En effet, la flore totale sur le produit fini est bien au delà des limites permises par les normes. Donc à défaut de pouvoir améliorer la technique de séchage, une attention particulière doit être portée sur le procédé dans le cas du séchage à l'air libre.

En effet, comme il a été dit dans la partie précédente traitant des cinétiques de séchage, si le produit est mis directement au soleil donc à une température beaucoup plus élevée qu'en salle alors qu'il a encore une forte teneur en eau, les réactions de brunissement pourraient être favorisées car l'eau facilite le contact entre les éléments biochimiques impliqués dans ces réactions. Si ces réactions favorisées par une forte température et une teneur en eau élevée sont à éviter, il est compréhensible de vouloir atteindre une humidité moindre à faible température en salle en début de séchage mais cela comporte le risque de favoriser le développement de microorganismes dont le développement est optimum dans ces conditions de teneur en eau et de température, d'autant plus que cette phase est longue. Les solutions permettant d'éviter ce développement de microorganismes ou ces réactions de brunissement pourraient donc améliorer le procédé et donc la qualité du produit. Il faudra alors soit garder une faible température en début de séchage et incorporer des agents conservateurs antimicrobiens, soit admettre une température plus forte toute en utilisant des agents conservateurs qui inhibent les réactions de brunissement (en dénaturant les éléments biochimique à l'origine de ces réactions ou en les isolant).

2.5. Quelques recommandations visant à améliorer la pratique de la transformation des produits alimentaires

2.5.1. Au niveau de l'unité de transformation

- Aménager des locaux propres et spacieux, loin des zones de stockage d'eaux usées ou de déchets et des zones où il y a stagnation d'eaux.

- Organiser l'espace de telle sorte que les différents postes de travail soient bien séparés et qu'il n'y ait pas de contamination par la circulation des hommes et des produits
- Prévoir des vestiaires, des blouses, des masques, des gants et des bonnets pour le personnel, tout comme des sanitaires et des lavabos pour un lavage régulier des mains avec de l'eau de javel.
- Surveiller l'état de santé du personnel et procéder périodiquement à des visites médicales. Tout agent malade doit se soigner et rester chez lui.
- Eviter certaines pratiques à risque durant le travail : se moucher, parler, se toucher les cheveux, manger surtout pendant des opérations sensibles comme le roulage.
- Procéder à des contrôles réguliers des produits : teneur en eau, microbiologie, etc.
- Choisir un emballage garantissant une bonne conservation des produits
- Bien étiqueter le produit

2.5.2. Au niveau de l'ensemble des acteurs

Pour garantir une bonne gestion de la qualité dans les unités de transformation, il est important de comprendre que les responsabilités sont partagées et chaque maillon de la chaîne devrait jouer le rôle qui est le sien :

- L'Etat doit édicter la réglementation et les règles.
- Les producteurs, les transformateurs et les distributeurs doivent respecter ces normes et réglementations.
- Le rôle des laboratoires est de contrôler objectivement et régulièrement les produits par rapport aux normes et à la réglementation afin d'assurer la sécurité et la satisfaction des consommateurs

Les recommandations suivantes pourraient améliorer le secteur

a) A l'attention des gouvernants

- Vulgarisation des techniques et des normes
- Protection des produits conformes aux normes de qualité
- Audit hygiénique des entreprises
- Campagnes de sensibilisation à la qualité de l'ensemble des acteurs du secteur de la transformation des produits alimentaires
- Sensibilisation sur l'étiquetage pour une meilleure identification des produits

b) A l'attention des producteurs et transformateurs

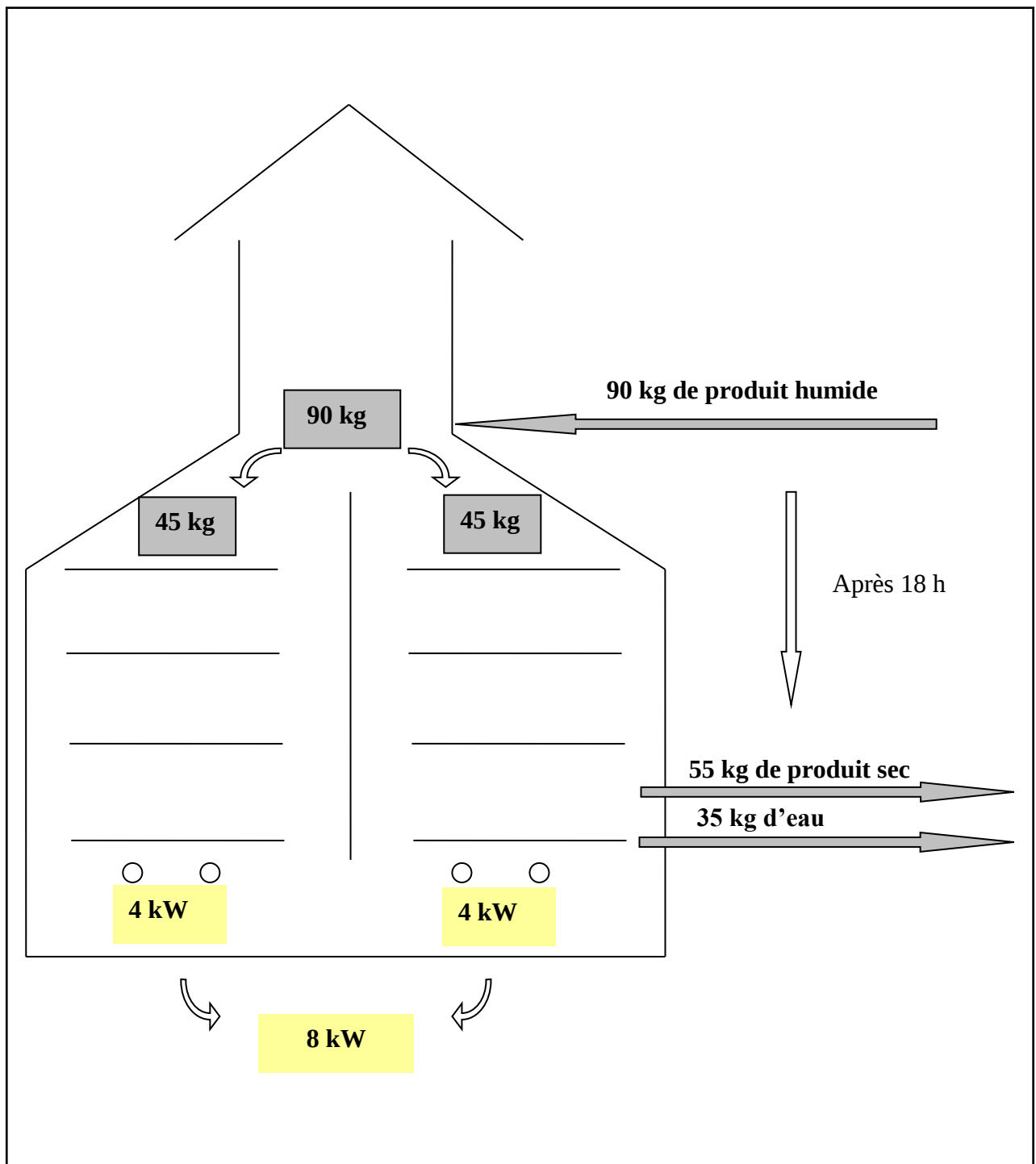
- Approvisionnement en matières premières de qualité

- Choix des fournisseurs sur la base de cahiers de charges
 - Formation sur la qualité
 - Promouvoir l'esprit qualité
- c) A l'attention des consommateurs
- Renforcement des capacités organisationnelles des associations pour la défense des consommateurs
 - Création d'associations de défense des droits des consommateurs
- d) A l'attention des laboratoires
- Appui aux concertations entre l'Etat, les producteurs, les transformateurs et les partenaires au développement pour alléger les coûts des analyses
 - Réalisation et livraison des résultats des analyses aux entreprises dans les meilleurs délais
 - Appui aux transformateurs dans le choix et l'acquisition d'emballages appropriés

2.6. Typologie des entreprises de transformation des produits roulés

Les entreprises de produits roulés utilisent encore très peu les séchoirs Atesta. Elles fonctionnent plutôt dans un cadre familial en utilisant au mieux, pour la plupart, des séchoirs coquillage. Elles ont très peu de maîtrise sur leurs productions de façon générale et fonctionnent au gré des clients. Par manque de débouchés bien identifiés, les besoins actuels de production sont satisfaits par un séchoir Atesta, au plus par deux ce qui correspond à des besoins de puissances de 8 à 16 kWth.

La figure ci-dessous présente la situation de séchage de produits roulés sur un Atesta

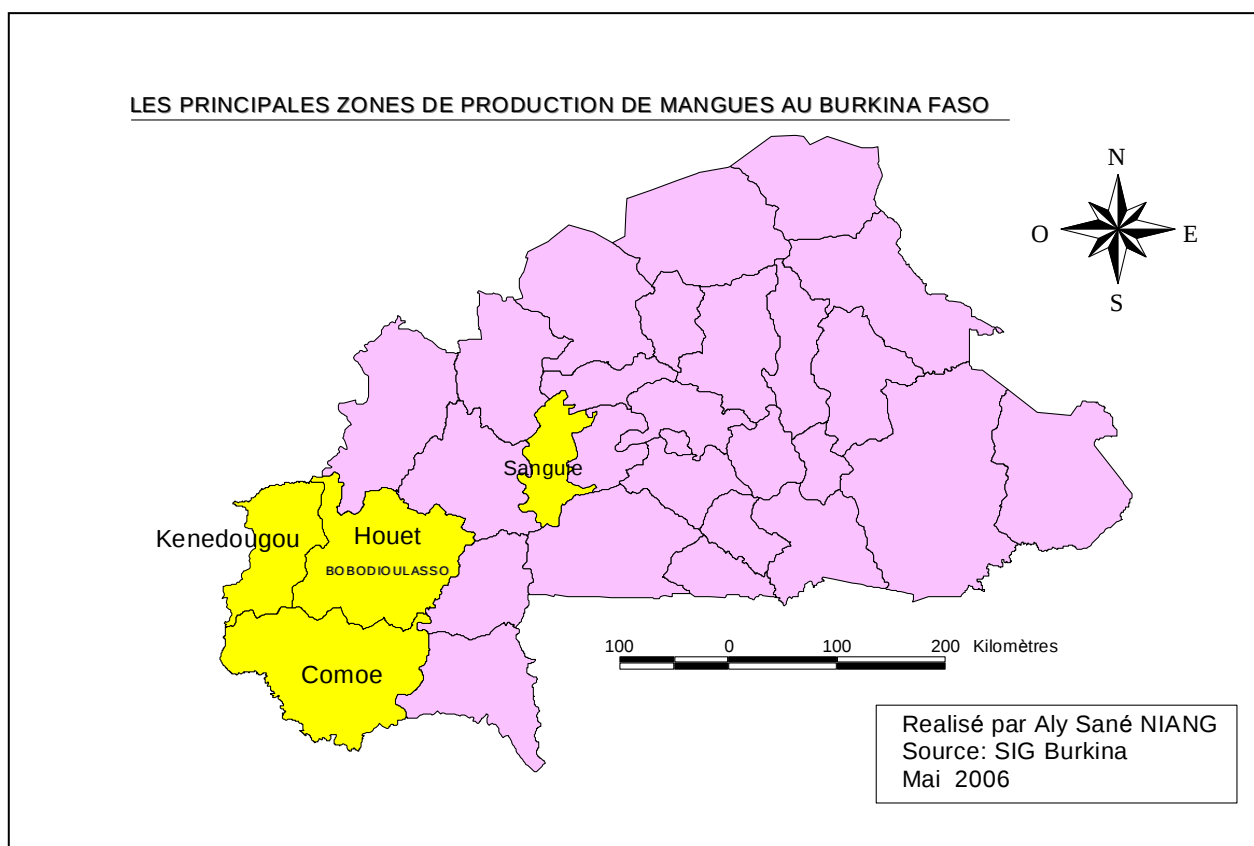
Figure 2.18 : Synthèse du séchage des produits roulés sur un Atesta

3. Troisième partie : Les mangues séchées

Le Burkina Faso produit d'importantes quantités de mangues mais sa production est saisonnière (de mars à septembre). Les zones de production sont principalement le centre ouest (voir figure 3.1)

Le séchage de la mangue au Burkina Faso connaît un essor certain depuis quelques années. C'est une activité qui réalise aujourd'hui près de 2,5 milliards de recettes d'exportation. Elle s'est développée surtout à cause des pertes importantes notées pendant les périodes de production et cela par manque d'équipements de conservation ou de transformation. Les produits du séchage de la mangue sont essentiellement destinés à l'exportation.

Figure 3.1 : Principales zones de production de la mangue



Les éléments de ce chapitre sont en grande partie extraits du cours d'Agroalimentaire dispensé par M. Michel Rivier aux Ingénieurs en fin de formation au GEE en janvier 2006 et du rapport final d'étude bibliographique de Cirad-amis DOC n° 36/04 de septembre 2004.

3. 1. Généralités sur la mangue

La mangue est un fruit tropical sous forme d'une drupe, variable en forme et en dimension, plus ou moins aplatie latéralement ; elle est de poids très différents suivant les variétés (100

à 200g). Elle est dissymétrique ; l'apex se termine en général par un bec (De Larhoussilhe, 1980) ;

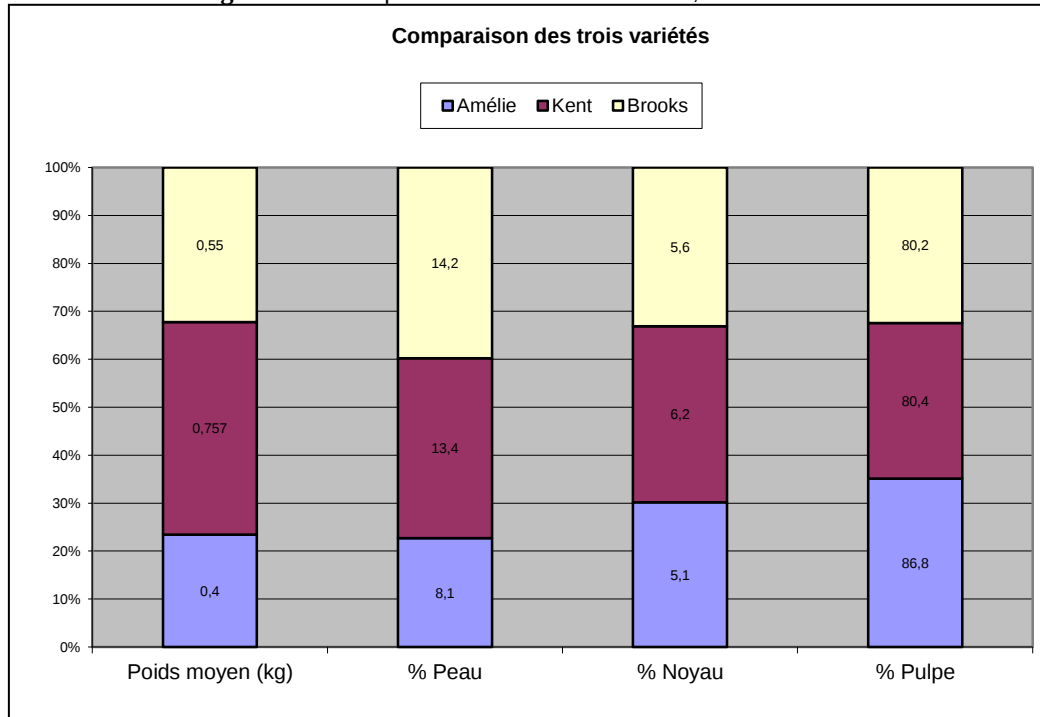
Elle comprend trois parties principales : la peau (exocarpe), la pulpe (mésocarpe) et le noyau (endocarpe). Sa couleur est soit jaune orangé soit demeure verte selon les variétés. La pulpe est la partie comestible du fruit. Le noyau sur lequel s'insèrent les fibres comporte une cavité dans laquelle se loge l'amande.

Au Burkina Faso existent plusieurs variétés de mangues mais seules trois sont d'utilisation courante pour l'activité de séchage ; il s'agit de l'Amélie, la Kent et la Brooks.

- **L'Amélie** appelée aussi Governor représente près de 50 % des superficies cultivées. Le fruit, de taille moyenne, est arrondi avec une peau verte orangée. Le poids moyen de cette variété est de 400 à 900g. Sa chair est d'une couleur orange foncée, souple et sans fibre. Elle est de très bonne gustative et elle est utilisée en début de campagne de séchage car étant la variété la plus précoce. Les premières récoltes ont lieu à partir de la seconde quinzaine du mois d'avril. Elle est légèrement acide à maturité et son mûrissement a l'avantage d'être facilement maîtrisable.
- **La Kent** est un gros fruit ovoïde sans bec, à l'épiderme épais et de bonne résistance, à fond jaune verdâtre, coloré de rouge foncé cramoisi et à noyau moyen. La peau se détache aisément de la chair qui est jaune intense à jaune orangé, fondante, juteuse et sans fibre. Le poids moyen du fruit est de 700 à 800 g. Cette variété a été introduite récemment au Burkina et sa disponibilité est limitée dans le temps.
- **La Brooks** est communément appelée "mangue retard", elle pèse de 300 à 800g ; cette variété est la plus tardive ; sa production s'allonge du mois de juin au mois de septembre. Elle présente plusieurs espèces identifiables par la couleur de la peau et de la chair. Elle demeure une des plus disparates en terme d'acidité. Le mûrissement naturel est très long après la cueillette (5 à 8 jours).

La variété Lippens, d'introduction récente, commence à être utilisée. Elle est juteuse avec toutefois un caractère légèrement fibreux. Caractérisé par son goût sucré, Il existe au sein de cette variété plusieurs espèces dont la particularité se situe au niveau de la couleur de la chair et du poids moyen du fruit.

La figure 3.2 donne les proportions relatives des différents constituants de la mangue pour les variétés que sont l'Amélie, le Brooks et le Kent. Le rendement matière de l'Amélie est plus intéressant avec près de 87 % de pulpe.

Figure 3.2 : Comparaison des variétés Amélie, Kent et Brooks

Source : Soumah, 1988

3. 2. les principales étapes dans la fabrication des mangues séchées et les précautions importantes à prendre

La fabrication de la mangue séchée se fait en trois grandes phases :

- La phase de prétraitement de la mangue
- La phase de séchage
- La phase de conditionnement de la mangue séchée

3.2.1. La phase de prétraitement

Elle concerne l'ensemble des opérations depuis le choix de la matière première jusqu'à la mise sur claies pour le séchage. Ces opérations préliminaires sont aussi importantes les unes des autres car elles sont déterminantes dans la qualité finale du produit. Elles concernent essentiellement la variété, le degré de maturité, le mode de cueillette et le système de transport. Il importe donc de prendre, entre autres, les précautions suivantes :

- Pour obtenir et préserver la qualité de la matière
 - Ne pas cueillir un fruit ni trop vert ni arrivé à maturité car la mangue est un fruit climactérique qui continue à mûrir après la récolte. La cueillir 14 semaines après la floraison est une bonne estimation. Elle reste acide si elle est trop verte à la cueillette

mais elle se dégrade aussi vite si elle est trop mure. Le pédoncule du fruit doit être bien enfoncé et le fruit ferme au toucher.

- La récolte doit se faire avec beaucoup de précautions pour éviter des blessures à la mangue : il faut utiliser des récipients de récolte pas trop gros et aérés en évitant autant que possible la récolte par secouage des arbres ou le ramassage des fruits au sol.
- Le transport est aussi une phase sensible dans le processus de transformation. Il faut transporter sans écraser ni blesser la mangue. L'utilisation de caquettes ou cageots est préconisée et à défaut, on peut utiliser de la paille ou de la sciure de bois pour amortir les chocs. Le transport en vrac, bien que favorisant l'acheminement de grandes quantités, est à déconseiller.
- Le stockage doit se faire dans un lieu frais et aéré ; en effet, la mangue respire après la récolte et produit donc de la chaleur et de l'eau tout en utilisant l'oxygène du milieu. La chaleur et l'humidité dégagées favorisent le développement de microorganismes et l'ambiance risque d'évoluer vers des conditions anaérobies pouvant dégrader le fruit (risque de fermentation alcoolique). Les mangues doivent être disposées par lots provenant d'un même site à un même stade de mûrissement. Les mangues mûres ou en début de pourrissement doivent être séparées systématiquement des autres. Il faut aussi éviter de laver les mangues avant l'entreposage, un nettoyage suffit.
- Le déstockage s'effectuera en veillant à l'homogénéité des lots. Il faut les classer en fonction de leur calibre et leur degré de mûrissement. Les mangues trop mûres ou pourries doivent être écartées.
- Pour préparer la mangue au séchage
 - Laver les mangues si possible dans un bassin ou dans un bac muni de panier afin d'éliminer les impuretés et autres déchets restés à la surface. Il est souhaitable de réaliser cette opération en trois étapes :
 - Premier lavage à l'eau simple pour enlever la saleté organique
 - Rinçage dans de l'eau javellisée pour inactiver les microorganismes
 - Rinçage à l'eau potable pour enlever le reste de l'eau de javel.
 - L'épluchage se fait souvent manuellement au moyen d'un couteau mais il est préférable d'utiliser un épluche-légumes. Un traitement à la chaleur humide ou sèche peut faciliter l'enlèvement de la peau.
 - Le parage, qui permet d'éliminer les parties endommagées ou insuffisamment mûres, se fait à la main à l'aide de couteaux bien affûtés en acier inoxydable sur des tables de parage.

- La découpe est déterminante pour la qualité finale. Elle se fait à l'aide de couteaux en acier inoxydable, de plaques à lames multiples ou de mandolines. Ces derniers permettent d'obtenir des tranches d'épaisseurs homogènes, mais il est aussi important d'avoir une épaisseur régulière sur une même tranche. L'épaisseur des tranches et la surface d'échange entre l'air et le produit jouent sur la durée de séchage.
- La mise en claie est l'étape précédant le séchage. Il faut veiller à ne pas contaminer le produit par l'opérateur ou par des saletés au contact des claies. L'utilisation de moustiquaire réduit les risques de souillure. Néanmoins, il faut inspecter les claies avant le chargement et les nettoyer au moins une fois par semaine avec une éponge et de l'eau javellisée puis séchées à l'air. Les filets sur lesquels sont disposées les tranches doivent être lavés et séchés entre les différentes utilisations. Pour cela, il faut disposer de deux jeux de filets. Il faut charger les claies au maximum tout en évitant que les morceaux se chevauchent. En pratique, pour une épaisseur de tranche de 8 mm, il est conseillé une charge de 6 kg de mangue par m² de claies soit 5 kg pour les claies de séchoir Atesta d'une surface de 0,84 m² (dimensions de 0,7 m x 1,2 m).

➤ Les traitements possibles avant le séchage

Toujours dans le souci d'améliorer la qualité du produit, les traitements suivants sont quelques fois appliqués :

✓ Le blanchiment

C'est un traitement thermique ayant pour effet d'inactiver les enzymes contenus dans les aliments, susceptibles de provoquer des modifications indésirables dans le produit comme le brunissement. En plus, il a été constaté que les morceaux blanchis sont séchés plus rapidement que les non blanchis. Mais il a l'inconvénient de provoquer la rupture cellulaire qui rend le produit fini difficile à manipuler après traitement.

✓ Le sulfatage humide ou sec

Il a pour but de préserver la couleur naturelle en inhibant le brunissement, la flaveur en favorisant la rétention des composés aromatiques et d'empêcher les pertes nutritionnelles. Mais il a l'inconvénient d'entraîner une perte de sucre, d'acides ou de vitamine C selon les variétés. Et lorsqu'il est excessif, on observe un mauvais goût du produit. Les procédés utilisés sont le sulfitage par fumigation d'oxyde de soufre, la combustion directe du soufre sur un petit réchaud ou l'immersion dans une solution sulfurique, suivie d'essorage et d'égouttage.

✓ L'ajout de sucre

L'addition de sucre augmente le taux d'extrait sec soluble de la pulpe de mangue, en diminuant la quantité d'eau disponible dans le produit et permet d'atteindre plus rapidement l'humidité de conservation du produit (Satyaprakash Rao, Susanta Roy, 1980). L'addition de sucre aide aussi dans l'amélioration de la couleur et la texture du produit, mais la vitesse de séchage est moins rapide quand du sucre est ajouté (Sagar, Khurdiya, 1996)

✓ L'apport d'acide

En acidifiant par l'acide citrique, le brunissement est ralenti ; mais il faut que ce soit modérément pour ne pas dégrader la vitamine C et le fructose, certes sources de brunissement mais substances nutritionnelles importantes. On peut aussi utiliser le jus de lime.

✓ L'apport de gélifiant

L'addition de la pectine pour améliorer la texture de mangue séchée est recommandée ; cependant, au-delà d'une certaine quantité de pectine ajoutée, le parfum du produit final est altéré, en masquant le parfum d'origine (Satyaprakash Rao, Susanta Roy, 1980). L'addition de 0.5 à 0.75 % de pectine est révélée optimum (Obam, 1985).

3.2.2. La phase de séchage

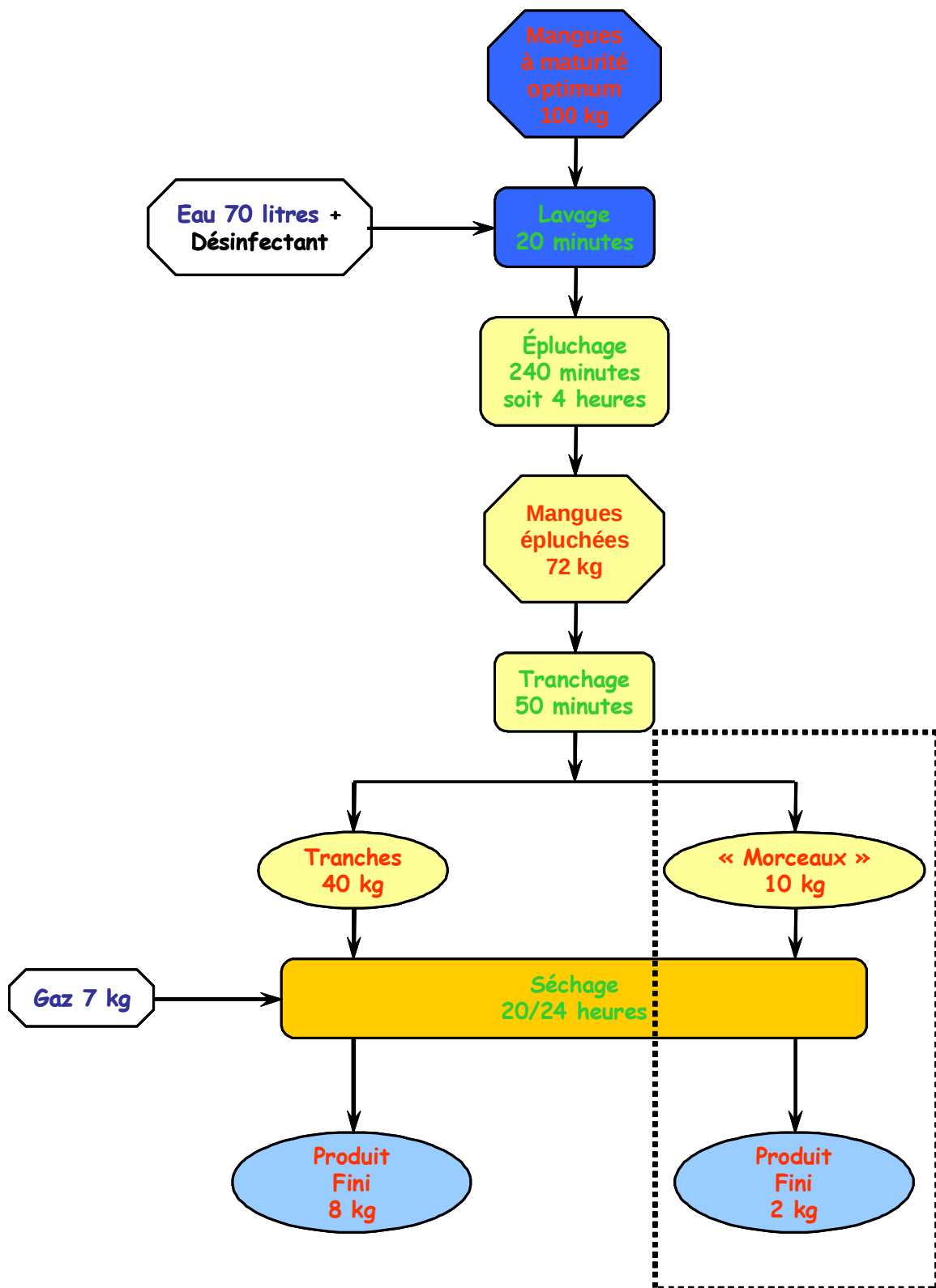
La maîtrise de cette phase est indispensable pour la qualité finale du produit. Durant cette phase, les produits sur les claies sont mis en contact de l'air chauffé par la combustion du gaz butane dans le cas du séchoir Atesta. L'opérateur doit souvent intervenir pour surveiller le processus notamment pour procéder aux permutations des claies afin d'obtenir un produit de qualité homogène.

3.2.3. Le diagramme de transformation (voir annexe 4)

Le diagramme de transformation de la mangue fraîche en mangue séchée donne toutes les opérations qui sont exécutées en entreprise.

3.2.4. Le bilan matière de la transformation de la mangue

Le processus de transformation de la mangue s'accompagne d'une évolution de la masse de la matière première comme indiqué dans le diagramme de la figure 3.3.

Figure 3.3 : Evolution de la masse de la mangue durant le processus de transformation

Source : Cours de technologie alimentaire, GEE, Michel RIVIER, février 2006

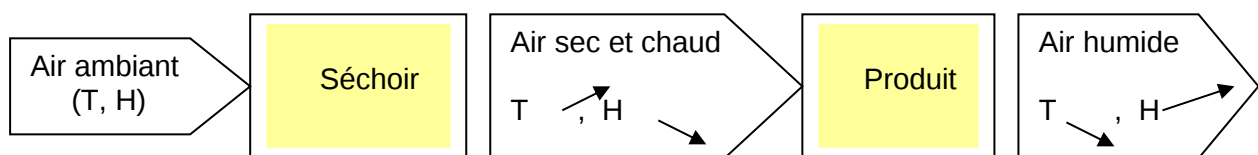
3.3. Le séchage de la mangue

Le séchage est apparu donc comme un moyen efficace de lutter contre le caractère saisonnier de la mangue mais il a d'autres avantages comme la diminution du volume et de la masse du produit facilitant du coup son transport tout en réduisant son encombrement ; il donne aussi un aspect et une fonctionnalité particulière au produit.

Il consiste à enlever de l'eau du produit pour entraîner l'abaissement de l'activité de l'eau. Ainsi l'eau devient moins disponible pour les microorganismes qui ne peuvent proliférer et on observe aussi un ralentissement important des réactions chimiques et enzymatiques défavorables à la conservation du produit. L'activité de l'eau est définie comme l'humidité relative d'un air à l'équilibre thermique et hydrique avec le produit. C'est une mesure relative par rapport à un état de référence qui est celui de l'eau pure pour laquelle l'activité de l'eau est égale à 1. Pour un produit, si son activité de l'eau est proche de 1, cela signifie que son eau s'évapore comme l'eau pure au contact de l'air ; cette eau est dite « libre ». Celle qui contribue à la liaison des constituants chimiques du produit est dite « eau liée » et elle est ainsi difficilement mobilisable. Pour le cas de la mangue fraîche, plus de la moitié de son eau est libre. Lors de son séchage en vue de sa conservation, il faut alors évacuer son eau libre et la teneur en eau de bonne conservation est de 12/13 %, ce qui correspond à une activité de l'eau d'environ 0,6.

Le transfert de la chaleur au produit se fait par l'intermédiaire de l'air, qui chauffé voit sa capacité évaporatoire augmenter par une diminution de son humidité relative comme le montre la figure 3.4.

Figure 3.4 : Evolution de l'air de séchage



Le séchage doit donc se faire en deux étapes bien distinctes :

- L'évacuation de l'eau libre qui peut se faire à haute température (80° C)
- L'évacuation de l'eau liée qui doit se faire à plus faible température (40° C) pour éviter le brunissement de la mangue.

Cette phase demande donc un bon savoir faire de la part des opérateurs qui doivent maîtriser ces différentes étapes afin d'intervenir au bon moment pour modifier les paramètres du séchage.

3. 4. Qualité de la mangue séchée

La qualité est une préoccupation permanente des transformateurs car c'est un produit destiné majoritairement à l'exportation ; or les exigences aux frontières du Nord sont de plus en plus contraignantes. Le produit doit répondre à un cahier de charge très sélectif élaboré par les importateurs du Nord.

3.4.1. Qualité recherchée pour le produit fini

La mangue séchée doit avoir les caractéristiques suivantes pour être considérées de bonne qualité :

- Etre microbiologiquement peu chargée : la chair de mangue est théoriquement stérile à l'intérieur. C'est lors de la découpe et de la manipulation des morceaux de mangue que des contaminations ont lieu à la surface. Les températures atteintes au cours du séchage ne permettent pas de détruire efficacement les microorganismes. Il faut donc veiller à l'hygiène lors de la découpe et à la propreté des équipements (couteaux, tables, moustiquaires) car la charge microbiologique en dépend.
- Stabilité microbiologique : activité de l'eau homogène et suffisamment basse (inférieure à 0,6) pour les différentes tranches. Faire en sorte que les tranches les moins sèches soient stables.
- Couleur : orange à jaune
Elle est visible à travers le sachet. Elle constitue un facteur important lors du choix d'achat. Eviter que les mangues brunissent.
- La texture : Comme pour tous les produits alimentaires, elle dépend de la composition biochimique du produit (notamment de la teneur en fibre)) et des conditions opératoires de séchage (durée, élévation de température). Elle peut durcir en cas de mauvaise conduite de l'opération de séchage et conférer ainsi une mauvaise qualité marchande du produit.
- Taille des tranches :
 - Longueur : 6 à 8 cm
 - Largeur : 3 à 5 cm
 - Epaisseur : 2 à 4 mm
- Avoir le goût de la mangue : le séchage doit, autant que possible, garder intact le goût caractéristique de la mangue fraîche.
- Avoir un aspect uniforme : c'est un critère de qualité important. L'uniformité d'aspect entre les morceaux (forme et couleur) dans les sachets transparents est souvent même plus recherchée que la forme ou la couleur elle-même.

➤ Conditionnement

- Emballage sous vide
- Emballage imperméable à l'oxygène, à la vapeur d'eau et opaque à la lumière (en propylène)
- Emballage attrayant par l'information qu'il comporte et son aspect

Il faut veiller à stocker la produit fini dans des conditions adéquates (température inférieure à 25° C) le temps de son séjour dans l'unité de transformation.

3.4.2. Impact du séchage sur la qualité de la mangue

Le séchage a pour effet de modifier certaines des qualités initiales de la mangue comme la texture, l'arôme, la couleur, la valeur nutritive, etc.

a) Pertes d'arôme

La mangue contient de nombreux composés aromatiques plus ou moins volatils (thermosensibles) qui peuvent s'échapper avec l'air de séchage. Mais on peut limiter ces pertes en améliorant les conditions de séchage.

b) Modifications physiques, structurales et texturales

Lorsqu'un produit est soumis à la déshydratation, il se contracte, en rapport avec la sortie progressive d'eau hors des cellules. Cette contraction est surtout notable lorsque la déshydratation est lente et se produit malgré la résistance des éléments structuraux des tissus. En effet, si le séchage est lent, le transfert interne de matière du centre vers la surface se fait sous la forme de l'eau liquide. Des substances solubles dans l'eau sont entraînées à la surface du produit et se concentrent pour donner un produit collant. Plusieurs mécanismes peuvent intervenir dans le degré de contraction résultant d'un affaissement de structure, par exemple la variation de la tension superficielle, des charges électriques ou encore un effet plastifiant du solvant (Binbenet, Duquenoy, Trystram, 2002).

Au contraire, si la déshydratation est rapide, il se forme immédiatement une couche sèche et rigide à la surface de l'aliment, qui fixe le volume final du produit. La déshydratation ultérieure des portions profondes s'accompagne de déchirures et de vides internes. On obtient alors des produits qui ont conservé leur forme initiale et qui du fait de leur structure poreuse, se réhydratent vite et bien. Dans le cas de ma mangue, cet effet d'une déshydratation se traduit par une texture plus molle appréciée à la mastication. Ces produits sont cependant plus sensibles aux détériorations oxydatives et plus chers à emballer (Binbenet, 1995).

Il est important de sécher suffisamment pour bien conserver le produit mais il faut sécher juste ce qu'il faut pour ne pas avoir un produit sec car la texture est liée à la teneur en eau du produit.

c) Modifications biochimiques

Les modifications biochimiques indésirables sont pour l'essentiel dues au brunissement enzymatique et au brunissement non enzymatique. Ces réactions déjà définies influent sur la couleur du produit fini.

3. 5. Types de séchoirs utilisés

Il existe plusieurs types de séchoirs pour la mangue mais le plus utilisé au Burkina Faso est le séchoir Atesta. On rencontre aussi, mais plus rarement, le séchoir à gaz type cartier.

Les séchoirs semi industriel à déshumidification et semi-continu type ITDG ne sont pas encore diffusés au Burkina Faso.

3. 6. Besoins énergétiques

Des études réalisées par des chercheurs du CIRAD et du GEE (Rivier et Al, 2004) sur le séchoir Atesta au sein d'une unité de séchage sise à Ouagadougou en juin, juillet et août 2004 dans le cadre d'un projet d'appui à la structuration de la filière mangues séchées au Burkina Faso ont permis d'avoir les résultats suivants :

➤ Conditions de séchage

Température extérieure moyenne : 27° C

Humidité relative extérieure moyenne : 67 %

Tableau 1-1 : Données expérimentales

<i>Masse mangues entières (kg)</i>	<i>Pulpe de mangue fraîche (kg)</i>	<i>Teneur en eau initiale (%)*</i>	<i>Humidité finale de l'air de séchage (%)</i>
102	53,78	83	15,5

**Donnée bibliographique*

Tableau 1-2 : Résultats expérimentaux des essais sur la mangue

<i>Masse de gaz consommé (kg)</i>	<i>Durée de séchage (h)</i>	<i>Masse de produit après séchage (kg)</i>	<i>Consommation spécifique de gaz (kg/kg de produit sec)</i>	<i>Consommation horaire de gaz (kg/h)</i>
10,7	18	10,9	0,98*	0,6

<i>Masse d'eau extraite (kg)</i>	<i>Chaleur latente d'évaporation de l'eau (kJ/kg)</i>	<i>Masse de gaz butane brûlé (kg)</i>	<i>Pouvoir calorifique inférieur du gaz (kJ/kg)</i>	<i>Rendement énergétique du séchage (%)</i>
42,88	2 250	10,7	45 600	20

La quantité de gaz brûlé correspond à une consommation d'énergie de 487 920 kJ soit 135,5 kWh.

* Correspond à une consommation spécifique de 12,4 kWh/kg de produit sec

3. 7. Coûts énergétiques

Le tableau 3 .3 présente le coût de l'énergie par unité de masse de mangue séchée.

Tableau 1-3 : Coût d'énergie par kilogramme de matière sèche

<i>Prix du kg de gaz butane (F CFA)</i>	<i>Masse de gaz utilisé (kg)</i>	<i>Masse de mangues séchées (kg)</i>	<i>Coût d'énergie (F CFA/kg de matière sèche)</i>
262	10,7	10,9	257

3. 8. Typologie des entreprises

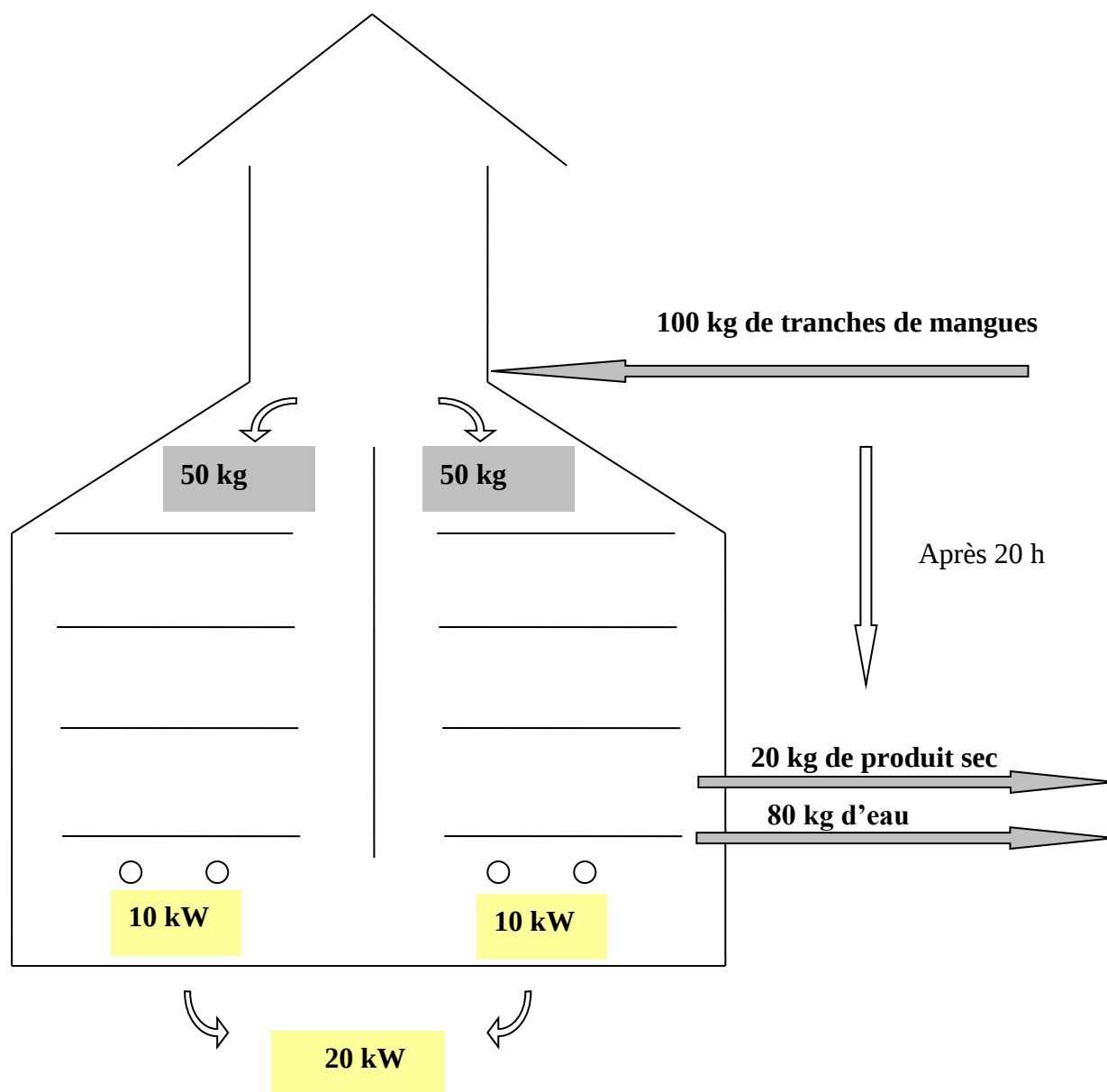
Les unités de transformation de mangues séchées se développent de plus en plus mais pour l'essentiel, elles sont regroupées au sein d'associations de commercialisation dont les principales sont : le Cercle Des Sécheurs (CDS), le Groupement Professionnel des Sécheurs (GPS) et le GIE NAFFA. Le tableau 3.4 ci-dessous donne pour chaque association le nombre et le type de séchoirs de ses différentes unités.

Tableau 1-4 : Types et nombre de séchoirs dans les différentes unités

	Unités	Types de séchoirs	Nombre de séchoirs
CDS	Unité A	Atesta	4
	Unité B	Atesta	6
	Unité C	Atesta	8
	Unité D	Cartier	1
	Unité E	Atesta	4
	Unité F	Atesta	6
GPS	Unité A	Atesta	4
	Unité B	Atesta	6
	Unité C	Atesta	5
	Unité D	Atesta	5
GIE NAFFA	Unité A	Atesta	7
	Unité B	Atesta	3

On remarque que le nombre de séchoirs varie de 3 à 8 selon les unités. Pour le séchage des mangues, les puissances maximales sollicitées (puissances de dimensionnement) sont environ de 10 kWth par cellule soit 20 kWth par séchoir. Avec ces valeurs, les différentes unités de séchage exigent des puissances comprises entre 60 et 160 kWth.

La figure 3.5 synthétise les résultats du séchage des mangues sur un séchoir Atesta

Figure 1.5 : Synthèse du séchage des mangues sur Atesta

4.

**Quatrième partie : Innovations dans
le domaine du séchage**

4.1. Utilisation de sources d'énergie alternatives

4.1.1. Les énergies renouvelables

Dans le contexte énergétique actuel jumelé à la problématique des gaz à effet de serre, il est impératif non seulement d'optimiser la consommation d'énergie, mais également de trouver des sources énergétiques de remplacement économiques et respectueuses de l'environnement. La valorisation énergétique des biomasses d'origine agricole et le développement d'autres sources d'énergie renouvelable en région rurale offrent certains avantages pour le secteur agricole et pour la société en général.

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre.

Trois facteurs militent en faveur des énergies renouvelables : la sauvegarde de l'environnement, l'épuisement inévitable des ressources limitées de la planète et les considérations économiques.

- **L'énergie éolienne**

Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice. Lorsque le vent est suffisamment fort (15 km/h minimum), les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité. C'est le même principe que celui de notre bonne dynamo de vélo.

Cependant, du fait des vitesses du vent très faibles au Burkina Faso, cette énergie est très peu explorée.

- **L'énergie hydraulique**

Son principe ressemble à celui de l'éolienne. Simplement, ce n'est plus le vent mais l'énergie mécanique de l'eau qui entraîne la roue d'une turbine qui à son tour entraîne un alternateur. Ce dernier transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La puissance disponible dépend de deux facteurs : la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau.

- **L'énergie solaire**

Il existe deux types d'énergie solaire : le solaire photovoltaïque et le solaire thermique.

- ✓ **Le solaire photovoltaïque qui produit de l'électricité**

Les panneaux solaires se composent de photopiles constituées de silicium, un matériau semi-conducteur qui abrite des électrons. Excités par les rayons du soleil, les électrons entrent en mouvement et produisent de l'électricité.

- ✓ **Le solaire thermique qui produit de la chaleur**

C'est le rayonnement solaire qui est captée pour produire de la chaleur. On utilise souvent un corps noir pour absorber le maximum d'énergie.

- La biomasse

Ce terme générique désigne, en fait, toute matière d'origine organique. Dès lors, les utilisations énergétiques de la biomasse recouvrent un grand nombre de techniques.

- La géothermie

Dans certaines roches et à certaines profondeurs circule de l'énergie, sous forme de vapeur et d'eaux chaudes. Ces eaux puisées à leur source ou récupérées lorsqu'elles surgissent des geysers, sont collectées puis distribuées pour alimenter des réseaux de chauffage urbains. Cette technique n'est pas encore explorée au Burkina Faso.

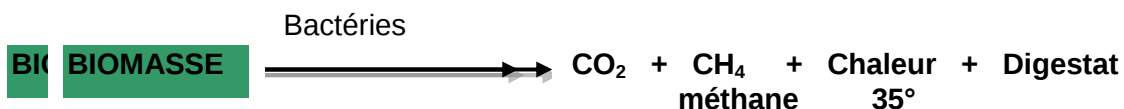
Ces énergies de l'avenir ne couvrent encore que 20% de la consommation mondiale d'électricité avec l'hydroélectricité qui représente 92,5% de l'électricité issue des ER (biomasse 5,5%, géothermie 1,5%, éolien 0,5% et le solaire 0,05 %). (www.notre-planete.info, avril 2005)

4.1.2. La biomasse

a) Utilisations

Globalement, on peut utiliser la biomasse de trois façons différentes : en la brûlant, en la faisant pourrir ou en la transformant chimiquement.

1. La brûler, c'est s'en servir comme d'un combustible de chaudière. On utilise aussi bien des déchets de bois, de récoltes que certains déchets, comme les ordures ménagères, les déchets industriels banals ou certains résidus agricoles.
2. En se décomposant, sous l'effet des bactéries, certains déchets putrescibles (comme certaines boues de stations d'épuration des eaux usées ou la fraction organique des déchets ménagers, les épluchures de mangue par exemple) produisent du biogaz. Ce mélange de gaz est en majorité composé de méthane, utilisable, une fois épuré, pour alimenter, lui aussi, des chaudières. Ci-dessous la réaction de méthanisation.



Le biogaz obtenu est un mélange de méthane et de dioxyde de carbone dans les proportions respectives de 65% et 35% qui est un excellent combustible.

Le digestat peut servir comme amendement organique (compost)

3. Enfin, certaines cultures, comme le colza, les betteraves ou certaines céréales, telles que le blé ou le sorgho, peuvent être transformés en biocarburant. L'huile de colza est un excellent substitut au gazole. Alors que la transformation chimique des

céréales ou de la betterave peut fournir de l'ETBE⁷, un additif qui, ajouté à l'essence, permet de réduire certaines émissions polluantes de nos voitures.

b) Avantages de la biomasse

L'utilisation de la biomasse comporte beaucoup d'avantages surtout pour les pays non producteurs de pétrole comme le Burkina Faso. C'est d'abord une source d'énergie « neutre » du point de vue du CO₂, dans la mesure où le CO₂ libéré lors de la combustion a déjà été prélevé dans l'atmosphère pendant la croissance des plantes. De plus, le chauffage à la biomasse ne contribue pas de façon importante aux pluies acides, car la plupart des biocombustibles ont une teneur en soufre négligeable. On exploite beaucoup de sous-produits qui ont souvent étaient rejetés or les sous-produits cellulosiques, lorsqu'ils sont disponibles sur le site, renferment une énergie calorifique importante et apte à réchauffer les grandes masses d'air nécessaires par exemple au séchage.

⁸L'énergie calorifique des sous-produits est souvent sous-estimée, alors qu'elle est considérable. A titre d'exemple,

- une plantation de cocotiers à 150 arbres par hectare et 67 noix par arbre et par an, fournit en noix et palmes l'équivalent calorifique de 5450 kg de fuel;

- l'usinage d'une tonne de riz produit 200 kg de balle (équivalent à 60 kg de fuel). Dans un séchoir ayant un rendement évaporatoire de 2 000 mth/kilo d'eau évaporée, ce qui est moins que moyen, ces 200 kg de balle permettent d'évaporer 330 kg d'eau, soit de sécher une tonne de paddy de 35 % à 14 %. L'humidité initiale est souvent bien inférieure, et la balle est généralement suffisante pour produire l'électricité nécessaire à l'usinage.

De nombreux autres exemples peuvent être cités. En première approximation le pouvoir calorifique des sous-produits cellulosiques est estimé à 3,300 th/kg que l'on exprime également par:

«3 kg de sous-produit = 1 kg de fuel»

c) Potentialités du Burkina Faso

Le potentiel du Burkina Faso en biomasse est non négligeable et pourrait améliorer, s'il est bien exploité, la rentabilité des entreprises de la filière mangues séchées. Cette rentabilité pourrait être durement compromise par la fin de la subvention sur le gaz.

Plusieurs sources de biomasse-énergie sont identifiées et pourraient constituer une alternative à l'utilisation du gaz butane dans les unités de séchage. On peut citer :

⁷ Ethyl-tertio-butyl-éther : c'est un biocarburant produit par la fermentation de plantes riches en sucres comme la betterave ou la canne à sucre ou en amidon comme la pomme de terre et les céréales. Il réduit les émissions de gaz à effet de serre en augmentant l'indice d'octane de l'essence, ce qui entraîne une amélioration du rendement des moteurs donc une baisse de la production de polluants.

⁸ Source : www.fao.org

- Les coques de karité

Avec un potentiel de production de karité estimé à 70 000 tonnes dont 32 000 seulement sont exploitées, le Burkina Faso est troisième producteur africain derrière le Nigeria et le Mali.

C'est une source d'énergie à travers les coques des noix et les boues de barattage qui sont issues de l'extraction du beurre de karité.

Les coques des noix et les boues de barattage avec un PCI de 18 700 à 22 150 kJ/kg

A titre indicatif : le PCI du bois dur est de 18 000 kJ/kg

- Graines de coton

Les graines de coton constituent un potentiel important au Burkina Faso car ce pays est devenu aujourd'hui le premier producteur de coton graine en Afrique avec une production annuelle estimée à 700 000 tonnes.

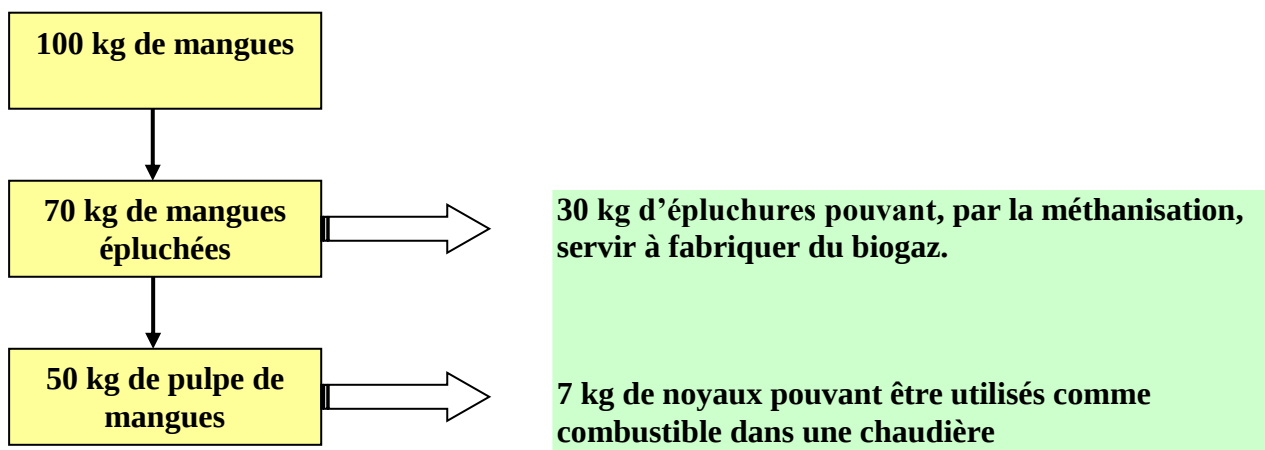
Le coton graine est constitué en moyenne de 55 % de graines, 40 % de fibres et 5 % de déchets. La graine est constituée de l'amande et de la coque. L'amande pressée donne une excellente huile végétale pouvant être utilisée comme biocarburant et la coque, qui fait environ 19 % du coton graine, est un bon combustible avec un PCI de 16 000 à 17 000 kJ/kg (guide biomasse-énergie, 1994)

- Coques d'arachide

L'arachide fait partie des principales cultures de rente au Burkina. Il est cultivé sur plus de 200 000 ha. C'est dire toute l'importance de cette ressource. Avec un PCI de la coque compris entre 16 700 et 18 800 kJ/kg, c'est une importante ressource énergétique à valoriser.

- Noyaux de mangue

Les noyaux de mangue ne sont pas souvent exploités, tout comme les épluchures, dans les unités agroalimentaires du Burkina Faso or c'est une source d'énergie qui pourrait être très intéressante comme le montre le diagramme ci-dessous :



Source : Formation à la sensibilisation à biomasse-énergie, 28 novembre/ 9 décembre 2005, Michel Rivier, Cirad

- Balles de riz

Les balles de riz représentent près de 20 % du poids du riz paddy et la production annuelle prévisionnelle pour la campagne 2005/2006 est de 108 450 tonnes d'après les estimations du CILSS, ce qui donne un potentiel annuel de 21 690 tonnes de balles de riz qui ont un PCI entre 11 700 et 14 600 kJ/kg.

Avec une tonne de paddy usiné, on obtient 200 kg de « balles de riz » issues du décortilage, qui ont un contenu énergétique équivalent à 60 litres de fioul (www.cirad.fr/fr/web_savoir/curieux/brochures/riz)

Mais il faut tout de même signaler que la faiblesse de la masse volumique de la balle de riz et sa haute teneur en matière minérale (surtout la silice) avec 20 à 25 %, constituent des handicaps pour sa valorisation énergétique.

- Bois

⁹Les potentialités du Burkina Faso en bois sont estimées à 191 902 452 m³ soit 153 521 960 tonnes, compte non tenu des forêts classées, des zones inaccessibles et des champs

Le bois sec avec un PCI d'environ 16 700 kJ/kg, représente un énorme potentiel mais son utilisation doit être contrôlée pour éviter la déforestation et s'inscrire dans les objectifs du millénaire concernant la protection de l'environnement.

- Rafles de maïs

Le maïs occupe une part très importante dans la production céréalière du Burkina. Sa production annuelle passe de 481 479 tonnes pour la campagne 2004/2005 à 799 052 tonnes pour celle de 2005/2006 (Source : Direction des Statistiques Agricoles/DGPSA/MAHRH)

Les rafles sont constituées à 85 % de cellulose et de lignine et ont un PCI d'environ 16 300 kJ/kg.

Trois kilos de rafles séchées dégagent autant d'énergie qu'un litre de fuel. Dans certains organismes de collecte, elles sont directement utilisées comme source d'énergie pour le séchage (www.fao.org).

- Bagasse sèche

La Bagasse est un résidu du procédé de traitement de la canne à sucre ; c'est la fibre de canne après extraction du sucre. Le traitement d'une tonne de canne produit en moyenne 320 Kg de bagasse qu'elle pourrait commercialiser « à bon prix ». Le PCI de la bagasse est entre 18 800 et 20 000 kJ/kg, ce qui constitue une importante source d'énergie déjà exploitée en partie par la SN SOSUCO. Avec une production attendue de 283 000 tonnes

⁹ Formulation de la stratégie énergie domestique au Burkina Faso, Diagnostic du sous-secteur Energie Domestique du Burkina Faso. (Bureau d'Etudes GGT-Consult, avril 2004) pour le compte du Ministère des Mines, des Carrières et de l'Energie

pour la campagne 2006 pour la SN SOSUCO¹⁰, on peut s'attendre à des quantités importantes de bagasse.

Pour la combustion de la biomasse, il faut nécessairement prévoir un échangeur de chaleur pour éviter de mettre directement la fumée issue de la combustion au contact du produit à sécher et cela pour des raisons de qualité.



Photo 4-1 : Bagasse destinée à la combustion

Source : www.bois-rouge.fr

4.1.3. L'énergie solaire

L'énergie solaire a l'avantage d'être gratuite, bien que irrégulière et peu concentrée.

Mais au Burkina Faso, l'énergie reçue au sol est en moyenne de 6 kWh/m²/jour, ce qui correspond au pouvoir calorifique de $(6 \times 860)/4000 = 1,3$ kg de bois sec, ce qui est un important potentiel quand on sait qu'on compte sur 3000 à 3500 heures d'ensoleillement par an.

C'est une énergie dont le coût se limite principalement à l'investissement d'installation. Il est présent même dans les zones supposées les plus défavorables (zones rurales).

4.1.4. Couplage solaire/biomasse

Dans le cas du séchage des produits agroalimentaires, on distingue deux phases bien distinctes dans le processus :

- Une première phase caractérisée par des besoins de puissance relativement importants : c'est l'étape d'évacuation de l'eau libre du produit à sécher. On pourrait dans cette étape du séchage utiliser la biomasse (figure 4.1).

¹⁰ Source : www.sidwaya.bf/sitesidwaya/sidwaya_quotidiens/sid2005_13_11/dans-régions.htm

- Une deuxième phase au cours de laquelle la puissance requise baisse sensiblement ; on pourrait alors utiliser le solaire pour relayer la biomasse afin de diminuer les coûts de production (figure 4.2).

L'énergie solaire pourrait aussi servir au préchauffage de l'air destiné au chauffage des produits ou de l'eau utilisable pour l'option « chauffage de l'air par de l'eau chaude à travers un échangeur de chaleur », ce qui permettrait de réduire la puissance à installer pour la solution « biomasse ».

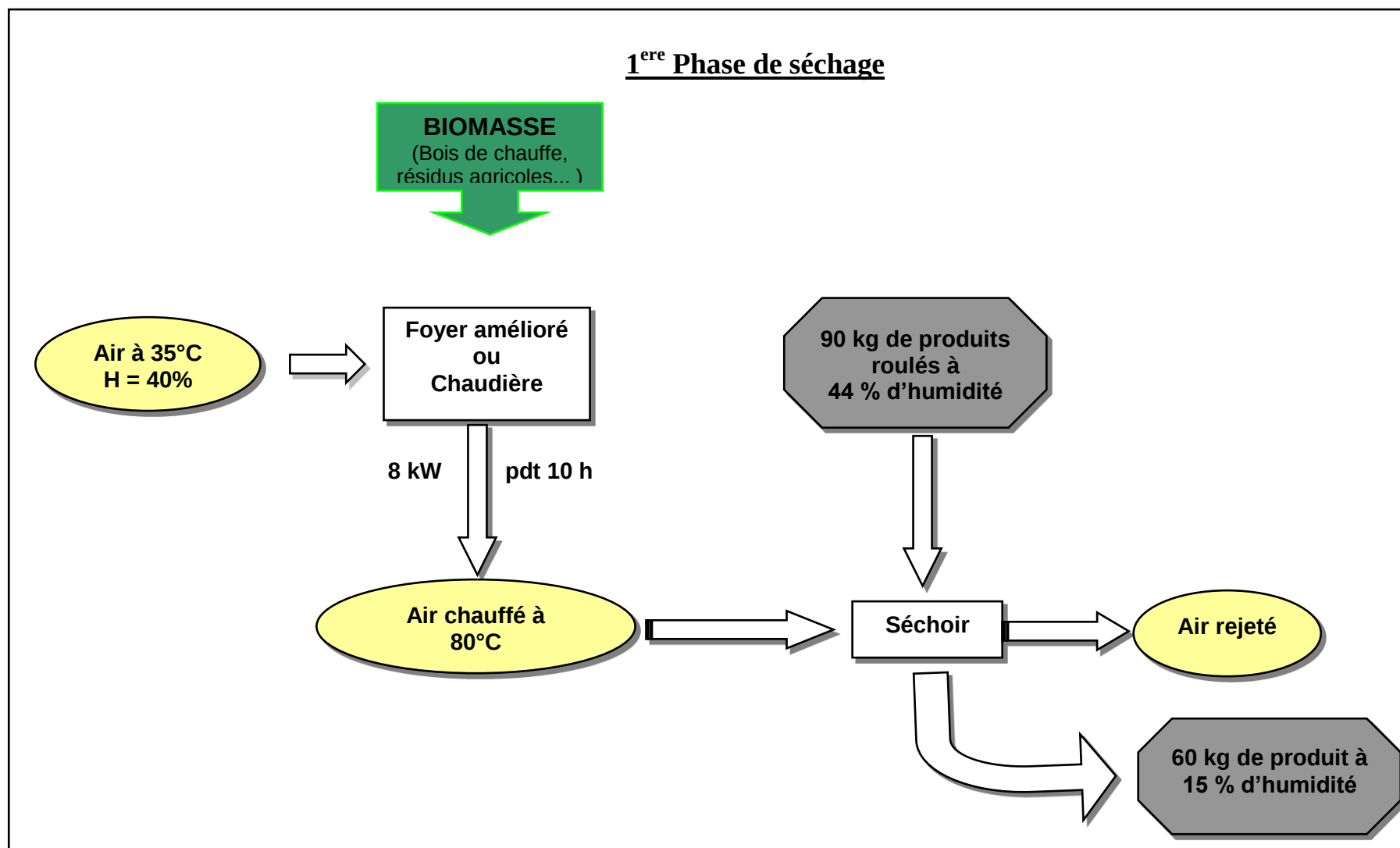
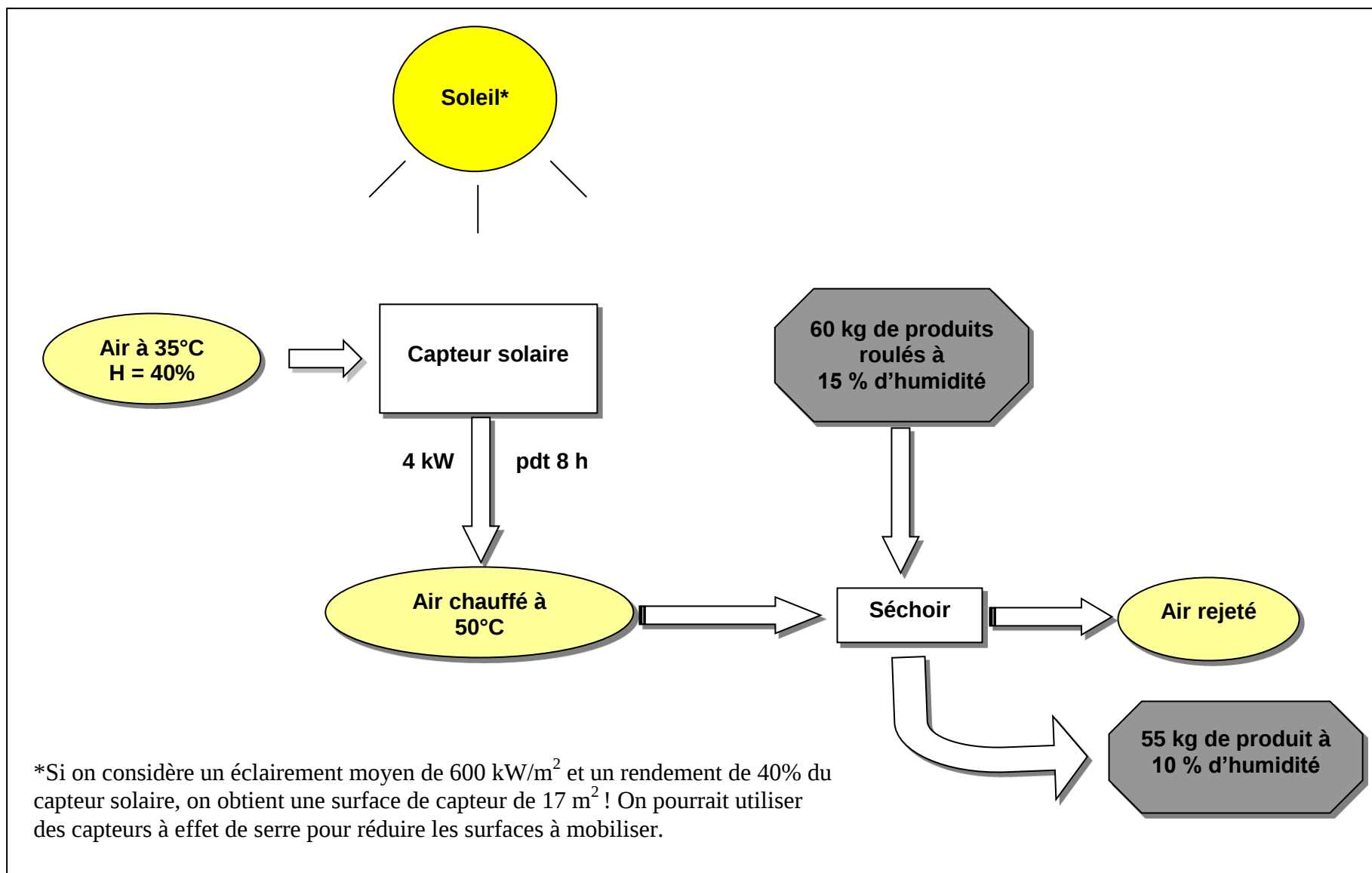
Figure 4.1 : Utilisation de la biomasse dans la première phase de séchage

Figure 4.2 : Utilisation du solaire dans la deuxième phase de séchage

4.2. Perspectives de développement d'unités de séchage

4.2.1. Développement des séchoirs

La première partie du document passe en revue l'ensemble des séchoirs utilisés pour le séchage des mangues et des produits roulés. Le tableau 4.1 ci-dessous reprend, pour les plus utilisés, les caractéristiques de chacun de ces équipements.

Tableau 4-1 : Caractéristiques des séchoirs les plus utilisés au Burkina Faso

Equipements	Principe	Rendement	Paramètres de qualité les plus affectés
Séchage sur natte ou sur table à l'air libre	Combinaison rayonnement solaire direct et entraînement de l'eau à la surface du produit par l'air chauffé par le rayonnement solaire direct (convection naturelle) - faibles températures et donc durée de séchage plus longue. Le produit ayant une teneur en eau élevée pendant des heures peut développer des microorganismes pathogènes et des réactions d'altération. Longue exposition du produit étalé souvent sans protection à l'air ambiant non filtré vecteur de corps étrangers	Variable (dépend des conditions climatiques) mais relativement faible	Qualité sanitaire : développement de microorganismes pathogènes ou produisant des toxines, teneurs en corps étrangers (poussières, ou sables, excréments, insectes, etc.) Goût de fermentés ou de corps étrangers Couleurs brunes
Séchoir Coquillage	Combinaison rayonnement solaire indirect et entraînement de l'eau à la surface du produit par l'air chauffé par le rayonnement solaire indirect (convection naturelle)	Dépend des conditions climatiques mais relativement faible	Qualité sanitaire : possible fermentation des produits car phénomènes de condensation sur la coupole supérieure entraînant des chutes de gouttelettes d'eau Couleur, goût et texture : Risques d'altération si l'élévation de la température de séchage n'est pas maîtrisée (par ouverture du séchoir) et donc ne sont pas optimales compte tenu des caractéristiques du produit à sécher (ex : taille des morceaux, teneur en sucres...)
Séchoir ATESTA	Entraînement de l'air à la surface du produit par l'air chauffé par la combustion de gaz (convection naturelle) : temps de séchage réduit du fait des caractéristiques de l'air (chauffé par le gaz ou par rayonnement solaire indirect, sec).	De l'ordre de 30 %	Couleur, goût et texture : Risques d'altération si l'élévation de la température de séchage ou la vitesse de circulation et d'évacuation de l'air ne sont pas optimales compte tenu des caractéristiques du produit à sécher (ex : taille des morceaux, teneur en sucres...)

Tous ces séchoirs se caractérisent par des rendements énergétiques très faibles. Leur principale contrainte est liée à la convection naturelle. En effet, l'installation d'un ventilateur permettra d'améliorer la qualité du séchage. Des projets se sont déjà penchés sur la question et il est avéré que l'intégration de la convection forcée dans les séchoirs aura les effets favorables suivants :

- ✓ Accélération du séchage lorsqu'il y a de l'eau libre à la surface du produit.

Dans le cas du séchage des mangues dans les séchoirs Atesta, on peut constater que le transfert entre l'air et le produit est le phénomène qui limite la vitesse de séchage du début du séchage et jusqu'au moment où le produit a perdu environ la moitié de son eau.

Cette phase est connue et décrite comme la phase de « séchage à vitesse constante ». Le produit est suffisamment riche en eau et le séchage en surface est suffisamment lent pour que la surface du produit reste bien humide. Durant cette phase, les transferts suivent les lois décrites ci-dessous.

- La température du produit est égale à la température d'air humide (T_h).
- Le flux de chaleur entre l'air et le produit s'écrit

$$Q = h S (T_s - T_h)$$

Avec

S : Surface du produit

T_s : Température sèche de l'air

T_h : Température humide de l'air

h : Coefficient d'échange de chaleur air / produit

Selon la littérature, pour de l'air circulant parallèlement à une surface plate,

$$h = K v^{0.8}$$

avec

K : constante

v : vitesse de l'air

Ainsi, une multiplication de la vitesse de l'air par un facteur 2 conduit à un échange de chaleur entre l'air et le produit 1.7 fois plus important.

- L'eau évaporée est directement proportionnelle à la chaleur que reçoit le produit, ou encore, toute la chaleur reçue par le produit se traduit par une évaporation d'eau.

✓ Amélioration de l'homogénéité de séchage

Un ventilateur brasse l'air et permet un équilibrage dynamique des flux d'air. L'air qui est au contact des produits est alors presque le même dans tout le séchoir et sa répartition est meilleure.

✓ Augmentation du rendement thermique

Les valeurs de rendement thermique des séchoirs Atesta sont connues à 30 à 35% alors que, sur des séchoirs à recirculation d'air, on arrive à 60 à 70%.

Cependant, l'augmentation du rendement thermique se fait grâce à la recirculation de tout ou partie de l'air. La saturation en eau de l'air qui sort du séchoir est plus importante mais sa température humide aussi. Le séchage peut alors être plus lent et la température du produit plus élevée. Cela peut conduire à des réactions de colorations plus rapides.

Enfin le fait de ne pas avoir de contraintes majeures quant à la position de la source d'énergie dans le circuit constitue aussi un avantage.

Au bilan, l'installation d'un ventilateur de convection forcée peut permettre un séchage plus rapide limitant le brunissement des mangues, une amélioration de l'homogénéité et une augmentation du rendement thermique.

Pour finaliser la mise au point de séchoirs à convection forcée avec possibilité d'utiliser comme source d'énergie la biomasse, un cahier des charges fonctionnel est proposé pour chacun des produits que sont la mangue séchée et les produits roulés.

4.2.2. Cahier des charges fonctionnel pour les équipements de produits roulés

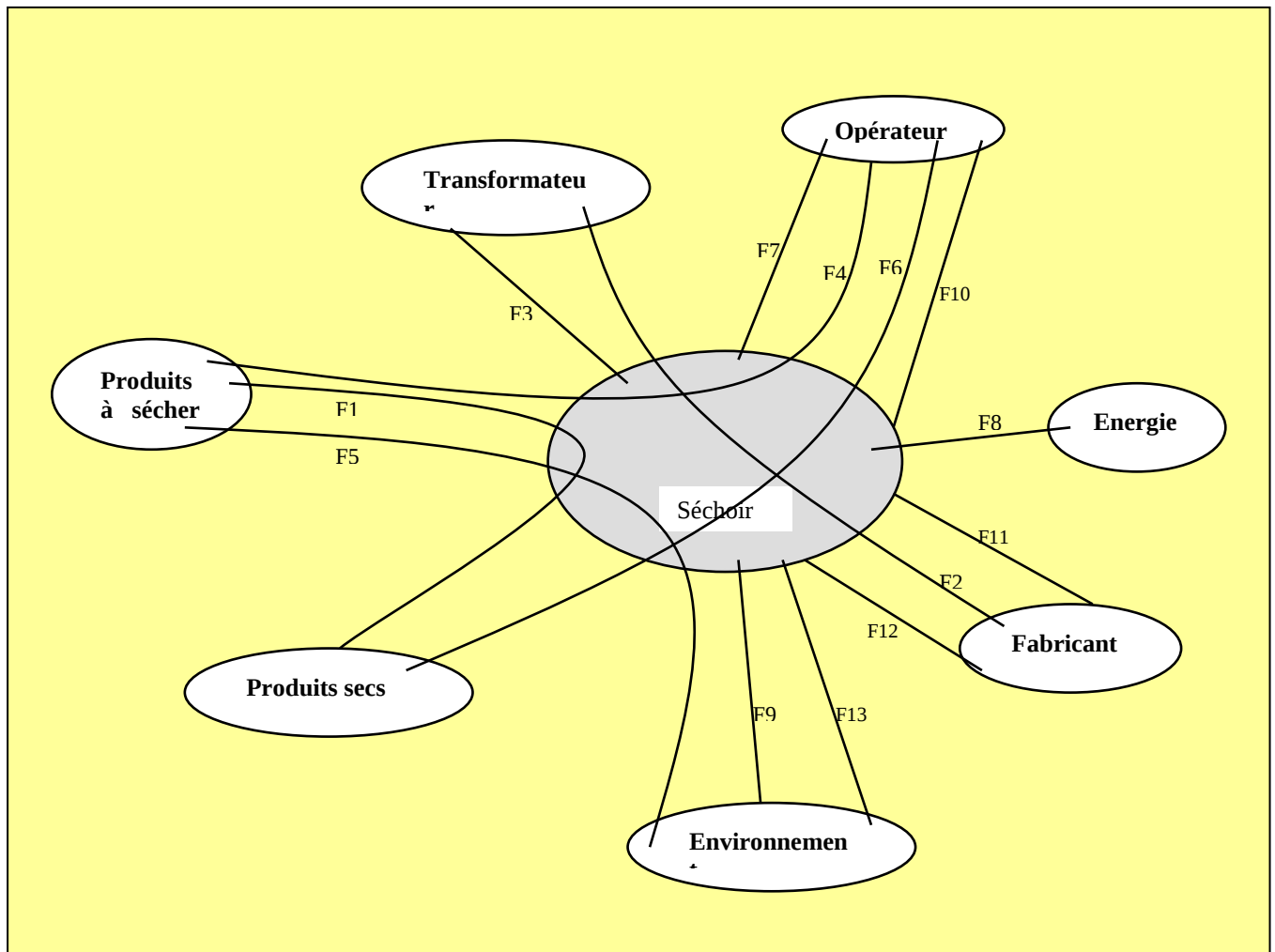
➤ Objectif :

Mettre à la disposition des transformateurs et des équipementiers un modèle de séchoir efficace et bon marché pouvant utiliser la biomasse disponible au Burkina Faso comme source d'énergie pour le séchage des produits roulés.

4.2.2.1. Analyse fonctionnelle

a. Définition de l'environnement du produit et des fonctions entre les éléments du système

La figure ci-dessous montre les relations entre le séchoir et les éléments de son environnement.

Figure 4.3 : Relations entre le séchoir de produits roulés et les éléments de son environnement

b. Caractérisation des fonctions

Les différentes fonctions sont caractérisées dans le tableau suivant :

Tableau 4-2 : Caractérisation des fonctions pour le cas des équipements de produits roulés

Fonction	Critère	Niveau	
F1 : transformer les produits à sécher en produits secs	Capacité de séchage pour des produits de type dégué	100 kg de produits secs 8 h	
	Taux d'humidité du produit sec	12/13 %	
	Durée de séchage	18 h maxi	
	Qualité du produit sec	Pas d'ajouts d'impuretés	
	Température maxi du produit alimentaire en séchage	80°C en phase 1	
		40°C en phase 2	
F2 : être acheté par le transformateur ou le fabricant	Prix d'achat	1 000 000 F CFA	
	Délai de livraison	2 mois	
F3 : être rentable pour le transformateur	Coût d'utilisation (amortissement et fonctionnement)	A définir	
F4 : permettre aux opérateurs de disposer les produits à sécher	Main d'œuvre nécessaire	1 opérateur pour les opérations de chargement, permutation et décalage	
F5 : évacuer dans l'environnement l'eau des produits à sécher.	Absences de nuisances	OUI	
F6 : permettre aux opérateurs de reprendre le produit sec	Main d'œuvre nécessaire	1 opérateur pour les opérations de chargement, permutation et décalage	
F7 : permettre aux opérateurs de contrôler le séchage	Possibilité de prélèvement du produit	2 fois au cours du séchage	
F8 : utiliser les énergies disponibles	Electricité	220 V	7 kW
	Gaz	Bouteille de 12 ou 6 kg	
	Biomasse	Selon la disponibilité (noyaux de mangues, tiges de coton, etc.)	
F9 : s'insérer dans l'environnement	Surface au sol	3 m x 2 m maxi	
	Evacuation de l'air humide en partie supérieure		
F10 : permettre aux opérateurs d'assurer le nettoyage du séchoir	Durée de nettoyage	¼ heure à une femme	
F11 : être fabricable localement par le fabricant	Maîtrise par le fabricant de la réalisation et du montage du séchoir	Bonne	
	Délai d'approvisionnement	2 mois	
	Tous les composants doivent être disponibles localement	Sauf mesure température et sécurité	
F12 : être réparable par le fabricant	Disponibilité du fabricant pour intervention	2 jours maxi	
F13 : Résister à l'environnement et à l'usage	Durée de vie du séchoir	6 ans	
	Pollution par l'air (poussière) et les animaux	Pas d'intégration de poussières, accès animaux impossible	

4.2.3. Cahier des charges fonctionnel pour les équipements de mangues séchées

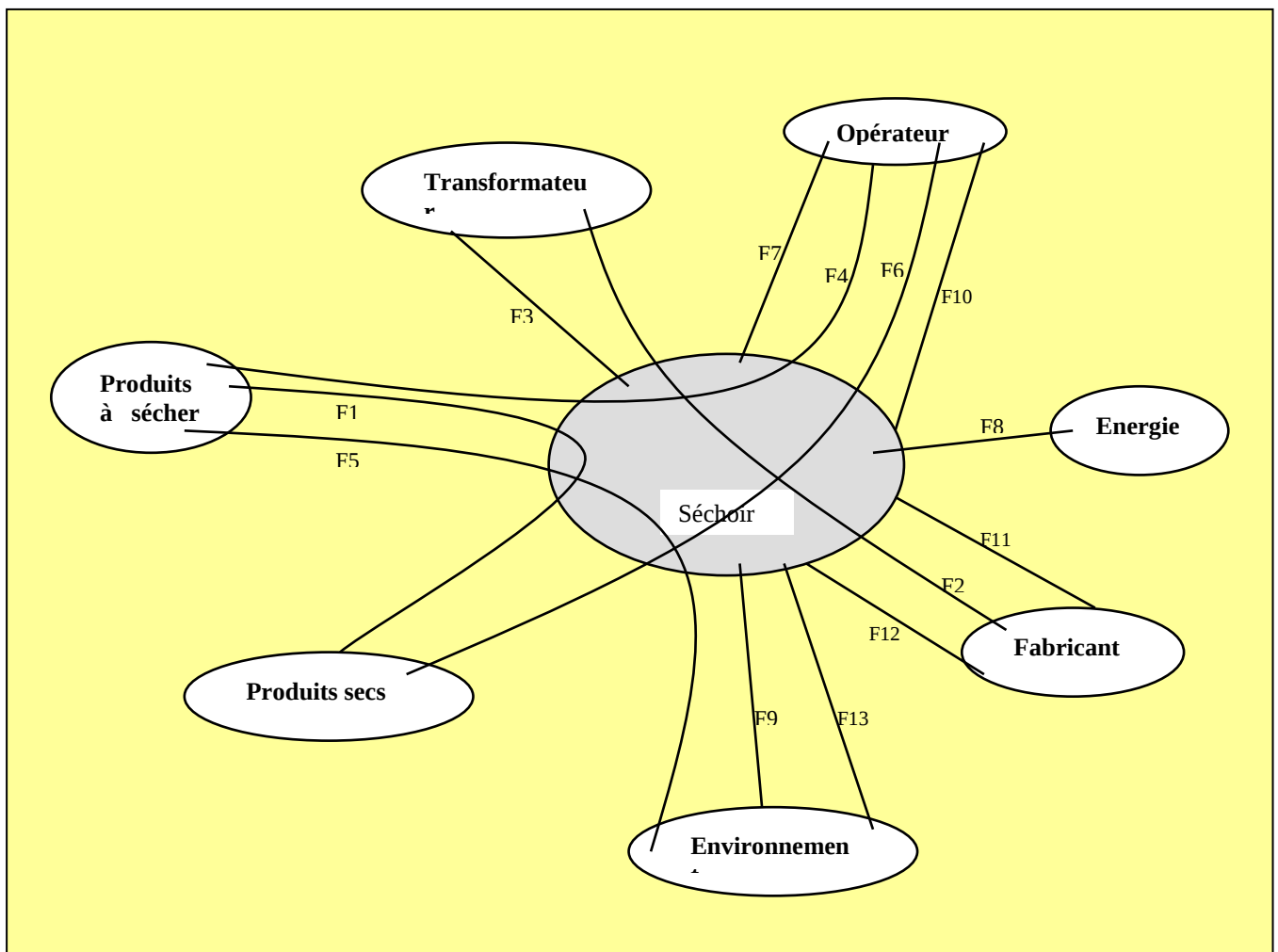
➤ Objectif :

Mettre à la disposition des transformateurs et des équipementiers un modèle de séchoir efficace et bon marché pouvant utiliser la biomasse disponible au Burkina Faso comme source d'énergie pour le séchage des mangues.

4.2.3.1. Analyse fonctionnelle

- a. Définition de l'environnement du produit et des fonctions entre les éléments du système

Figure 4.4 : Relations entre le séchoir de mangues et les éléments de son environnement



- b. Caractérisation des fonctions

Les différentes fonctions sont caractérisées dans le tableau suivant :

Tableau 4-3 : Caractérisation des fonctions pour le cas des équipements de mangues séchées

Fonction	Critère	Niveau	
F1 : transformer les produits à sécher en produits secs	Capacité de séchage pour les mangues	20 kg de produits secs	
		20 h	
	Taux d'humidité du produit sec	12/13 %	
	Durée de séchage	12 h maxi	
	Qualité du produit sec	Pas d'ajouts d'impuretés	
	Température maxi du produit alimentaire en séchage	80°C en phase 1	
		40°C en phase 2	
F2 : être acheté par le transformateur ou le fabricant	Prix d'achat	1 500 000 F CFA	
	Délai de livraison	2 mois	
F3 : être rentable pour le transformateur	Coût d'utilisation (amortissement et fonctionnement)	A définir	
F4 : permettre aux opérateurs de disposer les produits à sécher	Main d'œuvre nécessaire	1 opérateur pour les opérations de chargement, permutation et déclayage	
F5 : évacuer dans l'environnement l'eau des produits à sécher.	Absences de nuisances	OUI	
F6 : permettre aux opérateurs de reprendre le produit sec	Main d'œuvre nécessaire	1 opérateur pour les opérations de chargement, permutation et déclayage	
F7 : permettre aux opérateurs de contrôler le séchage	Possibilité de prélèvement du produit	2 fois au cours du séchage	
F8 : utiliser les énergies disponibles	Electricité	220 V	20kW
	Gaz	Bouteilles de 12 ou 6 kg	
	Biomasse	Selon la disponibilité (noyaux de mangues, tiges de coton, etc.)	
F9 : s'insérer dans l'environnement	Surface au sol	3 m x 2 m maxi	
	Evacuation de l'air humide en partie supérieure		
F10 : permettre aux opérateurs d'assurer le nettoyage du séchoir	Durée de nettoyage	¼ heure à une femme	
F11 : être fabricable localement par le fabricant	Maîtrise par le fabricant de la réalisation et du montage du séchoir	Bonne	
	Délai d'approvisionnement	2 mois	
	Tous les composants doivent être disponibles localement	Sauf mesure température et sécurité	
F12 : être réparable par le fabricant	Disponibilité du fabricant pour intervention	2 jours maxi	
F13 : Résister à l'environnement et à l'usage	Durée de vie du séchoir	6 ans	
	Pollution par l'air (poussière) et les animaux	Pas d'intégration de poussières, accès animaux impossible	

Conclusion générale

Au terme de cette étude, il ressort qu'il existe beaucoup de types d'équipements utilisés pour le séchage des produits alimentaires. Au Burkina Faso, on utilise surtout le séchage à l'air libre, au coquillage ou à l'Atesta. Bien que toutes les analyses prévues permettant de mieux évaluer la qualité des produits avant et après les différentes techniques de séchage (ex : les analyses de texture, et analyses des mangues) n'aient pas pu être réalisées pour des raisons techniques, en terme général, la qualité microbiologique des produits obtenus est meilleure avec le séchoir Atesta comme en attestent les analyses faits au laboratoire. C'est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles c'est pratiquement le seul séchoir actuellement utilisé pour le séchage des mangues au Burkina Faso. Les autres techniques citées plus haut restent trop dépendantes des conditions climatiques et exposent plus le produit aux contaminations par l'air (insectes, poussières, grains de sables et autres corps étrangers et germes) ; or la qualité exigée, que ce soit pour les produits roulés que pour la mangue séchée, devient de plus en plus contraignante et les acheteurs apprécient la fourniture d'un produit de qualité microbiologique et organoleptique constante, ce qui est plus difficile à obtenir avec les autres techniques de séchage. Une réserve quant à la contamination possible du produit par des résidus provenant du gaz butane doit être émise car cette possibilité n'a pas pu être vérifiée ; l'analyse de la contamination du produit par de tels résidus provenant du gaz nécessitant une technique sophistiquée et coûteuse. Cette contamination doit être évaluée si des normes l'exigent. Ce qui n'est pas encore le cas actuellement.

Cependant, du fait d'un rendement énergétique du séchoir Atesta relativement faible (de 20 à 30 %), l'intégration de la convection forcée permettra, non seulement d'améliorer le rendement, mais aussi de donner une meilleure qualité de produit. Le temps de séchage sera ainsi réduit, de même que la consommation d'énergie.

Mais, ce saut technologique n'aura pas, à terme, les résultats escomptés si le gaz, fortement subventionné par l'Etat, subit une hausse significative, scénario fort probable avec la situation actuelle des hydrocarbures dans le monde.

L'intégration de la biomasse, comme solution alternative à ces énergies fossiles, est possible et même souhaitée, avec les niveaux de puissance requis pour le séchage

mais aussi par le fait que le Burkina Faso dispose de ressources importantes en biomasse insuffisamment explorées.

Son couplage avec le solaire, abordé dans le cadre de cette étude, gagnera à être développé, afin de tirer le maximum de profits de ces énergies renouvelables qui, tout en contribuant à réduire le coût des facteurs de production des unités de séchage, permettront de mieux lutter contre les émissions de gaz à effet de serre.

Bibliographie

- 1) **Chambre de Commerce, d'Industrie et d'Artisanat du Burkina Faso**
Guide de l'entreprise de séchage de mangue au Burkina Faso,
- 2) **M. RIVIER / CIRAD, C.M. RIVIER / IRD, M. BARBIER, GEE/CIRAD (2006)**
Polycopiés de l'EIER, Cours de technologie alimentaire, I3, GEE
- 3) **H. REGGAD / ENSIA SIARC, M. RIVIER / Cirad- Amis, J.M. MEOT / Cirad- Amis, Y. COULIBALY, Groupe EIER-ETSHER (septembre 2004)**
Rapport final d'étude bibliographique, Cirad-amis DOC n° 36/04 : 48 p
- 4) **C. G. ESLAVA (février-juin 2005).** « Séchage de produits alimentaires dans les pays en développement : Validation de principes de séchoir ». Rapport de stage, Montpellier : 40 p
- 5) **Y. COULIBALY, M. RIVIER, H. NAMATA, J.M.MEOT (2004).** « Amélioration des outils et techniques de production de la mangue séchée au Burkina Faso ». Sud Sciences et Technologies, N° 13, décembre 2004 : p13-21
- 6) **Mlle A. CHAZAL (octobre 2003).** « Les produits roulés dans l'alimentation à Ouagadougou ». Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées (DESS), Nutrition et Alimentation pour les pays en développement, Montpellier.

SITES INTERNET

- ▶ www.fao.org
- ▶ www.gret.org

5. Cinquième partie : ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Fiche d'enquête à l'intention des entreprises de transformation visitées

Annexe 2 : Résultats des analyses microbiologiques sur les produits roulés

Annexe 3 : Fiche technique sur l'activité de l'eau

Annexe 4 : Diagramme de transformation de la mangue

Annexe 5 : Photos au sein des unités de transformation de produits roulés

Annexe 1 : Fiche d'enquête à l'intention des entreprises de transformation visitées**Questionnaire à l'intention des transformateurs****1. Identification de l'entreprise et de l'enquêté.**

Unité :

Nom :

Prénom

Sexe :

Date :

2. Produits transformés

Quels produits transformez-vous ?

- ☐ Bouillie
- ☐ Dégué
- ☐ Autres

3. Equipements de séchage

Avec quels équipements séchez-vous vos produits ?

- ☐ Atesta
- ☐ Coquillage
- ☐ Séchage solaire sur natte ou sur table
- ☐ Autres

Combien de séchoirs possédez-vous ?

- ☐ Atesta
- ☐ Coquillage
- ☐ Autres

4. Production

Quelles sont vos périodes de production ?

- ☐ Toute l'année
- ☐ En saison sèche
- ☐ Autres

Quelles quantités produisez-vous ?

Produits	Quantité journalière (kg)	Quantité mensuelle (kg)	Quantité annuelle (kg)
Dégué			
Bouillie			

Pourquoi vous n'augmentez pas votre production ?

- ☐ Manque d'équipements
- ☐ Manque de clients
- ☐ Autres

5. Perspectives

Souhaitez vous augmenter votre capacité de production ?

Etes vous disposé(e) à investir sur un équipement de séchage plus performant pour produire davantage ?

Pensez pouvoir écouler sans difficultés un surplus de production ?

Si oui, jusqu'à quelle proportion ?

6. Qualité

Quels sont les critères de qualité des produits roulés

-Dégué

- ☐ Couleur
- ☐ Forme
- ☐ Texture
- ☐ Goût
- ☐ Propreté visuelle
- ☐ Autres

-Bouillie

- ☐ Couleur
- ☐ Forme
- ☐ Texture
- ☐ Goût
- ☐ Propreté visuelle
- ☐ Autres

Comment les appréciez-vous ?

Quels sont les facteurs déterminants de qualité des produits roulés ?

- ☐ Propreté de la matière première
- ☐ Nettoyage/épierrage
- ☐ Roulage
- ☐ Dosage eau/farine avant le malaxage
- ☐ Précuisson
- ☐ Séchage
- ☐ Autres

Quels sont les indicateurs de qualité pour les consommateurs ?

- ☐ Présentation du produit
- ☐ Origine du produit
- ☐ Autres

Observations de l'enquêteur :

Annexe 2 : Résultats des analyses microbiologiques sur les produits roulés

MINISTRE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE,
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

INSTITUT DE RECHERCHE EN SCIENCES
APPLIQUEES ET TECHNOLOGIES

Tél : (226) 50 35 60 31 ; Fax : (226) 50 35 70 29

E-mail : dirtsat@fasonet.bf

Département Technologie Alimentaire

Tél. / Fax : (226) 50 36 37 90 - E-mail : dta@fasonet.bf

BURKINA FASO
Unité – Progrès – Justice



Ouagadougou, le 09 JUN 2006

Le Chef de Département
Technologie Alimentaire

A

EIER

Tél : 76 52 71 15

OUAGADOUGOU

N°2006...../MESSRS/CNRST/IRSAT/DTA

RAPPORT D'ANALYSES

Nature du / des produit(s) : Dégû

Nombre d'échantillons reçus : 1

Observation sur le produit et son emballage : Sachet plastique transparent

Références du demandeur : Dégû avant séchage succulence

Identification du laboratoire : Néant

Echantillonnage fait par le demandeur

Echantillon reçu le : 26/05/2006

Référence réception : 166/2006/CQ

Début des analyses le : 30/05/2006

Type d'analyses demandées : Microbiologiques

Méthodes d'analyses utilisées : - Normes ISO 4833/1991 pour la Flore totale
- Normes ISO 4832/1991 pour les Coliformes
- Normes ISO 7954/1988 pour les Levures / Moisissures
- Normes ISO 6888-1/1999 pour les Staphylocoques à coagulase positive

Résultats des analyses

Echantillon	Flore Totale	Coliformes totaux	Levures et moisissures	Staphylocoques
Dégû	$4,3.10^3$ CFU/g	Moins de 150 CFU/g	$4,0.10^3$ CFU/g	Moins de 10 CFU/g

NB : - Ces résultats ne portent que sur l'échantillon apporté au Laboratoire.
- la reproduction partielle de ce rapport d'analyse est strictement interdite.


Le Chef de
Département
Technologie Alimentaire
Léguet GANOU
Chargé de l'intérim
IRSAT

Suite Annexe 2

MINISTRE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE,
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

INSTITUT DE RECHERCHE EN SCIENCES
APPLIQUEES ET TECHNOLOGIES

Tél : (226) 50 35 60 31 ; Fax : (226) 50 35 70 29

E-mail : dirtsat@fasonet.bf

Département Technologie Alimentaire
Tél. / Fax : (226) 50 36 37 90 - E-mail : dta@fasonet.bf

BURKINA FASO
Unité – Progrès – Justice



Ouagadougou, le 09 JUN 2006

Le Chef de Département
Technologie Alimentaire

A

EIER

Tél : 76 52 71 15

OUAGADOUGOU

N°2006...../MESSRS/CNRST/IRSAT/DTA

RAPPORT D'ANALYSES

Nature du / des produit(s) : Dégué

Nombre d'échantillons reçus : 1

Observation sur le produit et son emballage : Sachet plastique transparent

Références du demandeur : Dégué séché succulence

Identification du laboratoire : Néant

Echantillonnage fait par le demandeur

Echantillon reçu le : 26/05/2006

Référence réception : 171/2006/CQ

Début des analyses le : 30/05/2006

Type d'analyses demandées : Microbiologiques

Méthodes d'analyses utilisées : - Normes ISO 4833/1991 pour la Flore totale
- Normes ISO 4832/1991 pour les Coliformes
- Normes ISO 7954/1988 pour les Levures / Moisissures
- Normes ISO 6888-1/1999 pour les Staphylocoques à coagulase positive

Résultats des analyses

Echantillon	Flore Totale	Coliformes totaux	Levures et moisissures	Staphylocoques*
Dégué	5,1.10 ⁵ CFU/g	6,7.10 ³ CFU/g	Moins de 10 CFU/g	Moins de 10 CFU/g

* Aucune colonie dénombrée à la dilution 10⁻¹ (suspension mère)

NB : - Ces résultats ne portent que sur l'échantillon apporté au Laboratoire.

- la reproduction partielle de ce rapport d'analyse est strictement interdite.

Léguet GANOU
Chargé de l'intérim



Suite Annexe 2

MINISTRE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE,
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

INSTITUT DE RECHERCHE EN SCIENCES
APPLIQUEES ET TECHNOLOGIES

Tél : (226) 50 35 60 31 ; Fax : (226) 50 35 70 29

E-mail : dirtsat@fasonet.bf

Département Technologie Alimentaire

Tél. / Fax : (226) 50 36 37 90 - E-mail : dtat@fasonet.bf

BURKINA FASO
Unité – Progrès – Justice



Ouagadougou, le ...0.9...JUN...2006

Le Chef de Département
Technologie Alimentaire

A

EIER

Tél : 76 52 71 15

OUAGADOUGOU

N°2006...../MESSRS/CNRST/IRSAT/DTA

RAPPORT D'ANALYSES

Nature du / des produit(s) : Mil

Nombre d'échantillons reçus : 1

Observation sur le produit et son emballage : Sachet plastique transparent

Références du demandeur : Mil succulence

Identification du laboratoire : Néant

Echantillonnage fait par le demandeur

Echantillon reçu le : 26/05/2006

Référence réception : 169/2006/CQ

Début des analyses le : 30/05/2006

Type d'analyses demandées : Microbiologiques

Méthodes d'analyses utilisées : - Normes ISO 4833/1991 pour la Flore totale

- Normes ISO 4832/1991 pour les Coliformes

- Normes ISO 7954/1988 pour les Levures / Moisissures

- Normes ISO 6888-1/1999 pour les Staphylocoques à coagulase positive

Résultats des analyses

Echantillon	Flore Totale	Coliformes totaux	Levures et moisissures	Staphylocoques
Mil	1,4.10 ⁵ CFU/g	5,9.10 ⁴ CFU/g	Moins de 10 CFU/g	Moins de 10 CFU/g

NB : - Ces résultats ne portent que sur l'échantillon apporté au Laboratoire.
- la reproduction partielle de ce rapport d'analyse est strictement interdite.

Léguet GANOU
Chargé de l'intérim



Suite annexe 2

MINISTRE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE,
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BURKINA FASO
Unité – Progrès – Justice

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE



INSTITUT DE RECHERCHE EN SCIENCES
APPLIQUEES ET TECHNOLOGIES

Tél : (226) 50 35 60 31 ; Fax : (226) 50 35 70 29

E-mail : dirtsat@fasonet.bf

Ouagadougou, le 09 JUN 2006

Département Technologie Alimentaire
Tél. / Fax : (226) 50 36 37 90 - E-mail : dta@fasonet.bf

Le Chef de Département
Technologie Alimentaire

N°2006...../MESSRS/CNRST/IRSAT/DTA

A

EIER

Tél : 76 52 71 15

OUAGADOUGOU

RAPPORT D'ANALYSES

Nature du / des produit(s) : Mil

Nombre d'échantillons reçus : 1

Observation sur le produit et son emballage : Sachet plastique transparent

Références du demandeur : Tout super

Identification du laboratoire : Néant

Echantillonnage fait par le demandeur

Echantillon reçu le : 26/05/2006

Référence réception : 170/2006/CQ

Début des analyses le : 30/05/2006

Type d'analyses demandées : Microbiologiques

Méthodes d'analyses utilisées : - Normes ISO 4833/1991 pour la Flore totale
- Normes ISO 4832/1991 pour les Coliformes
- Normes ISO 7954/1988 pour les Levures / Moisissures
- Normes ISO 6888-1/1999 pour les Staphylocoques à coagulase positive

Résultats des analyses

Echantillon	Flore Totale	Coliformes totaux	Levures et moisissures	Staphylocoques
Mil	$6,3.10^5$ CFU/g	$1,2.10^5$ CFU/g	$3,9.10^3$ CFU/g	Moins de 10 CFU/g

NB : - Ces résultats ne portent que sur l'échantillon apporté au Laboratoire.

- la reproduction partielle de ce rapport d'analyse est strictement interdite.


Lèguet GANOU
Chargé de l'intérim



Suite Annexe 2

MINISTRE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE,
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

INSTITUT DE RECHERCHE EN SCIENCES
APPLIQUEES ET TECHNOLOGIES

Tél : (226) 50 35 60 31 ; Fax : (226) 50 35 70 29

E-mail : dirtsat@fasonet.bf

Département Technologie Alimentaire

Tél / Fax : (226) 50 36 37 90 - E-mail : dta@fasonet.bf

BURKINA FASO
Unité – Progrès – Justice



Ouagadougou, le 09 JUN 2006

Le Chef de Département
Technologie Alimentaire

A

EIER

Tél : 76 52 71 15

OUAGADOUGOU

N°2006...../MESSRS/CNRST/IRSAT/DTA

RAPPORT D'ANALYSES

Nature du / des produit(s) : Dégûé

Nombre d'échantillons reçus : 1

Observation sur le produit et son emballage : Sachet plastique transparent

Références du demandeur : Tout super

Identification du laboratoire : Néant

Echantillonnage fait par le demandeur

Echantillon reçu le : 26/05/2006

Référence réception : 168/2006/CQ

Début des analyses le : 30/05/2006

Type d'analyses demandées : Microbiologiques

Méthodes d'analyses utilisées : - Normes ISO 4833/1991 pour la Flore totale
- Normes ISO 4832/1991 pour les Coliformes
- Normes ISO 7954/1988 pour les Levures / Moisissures
- Normes ISO 6888-1/1999 pour les Staphylocoques

Résultats des analyses

Echantillon	Flore Totale	Coliformes totaux	Levures et moisissures	Staphylocoques
Dégûé séché	1,0.10 ⁶ CFU/g	1,1.10 ⁵ CFU/g	4,3.10 ² CFU/g	Moins de 10 CFU/g

NB : - Ces résultats ne portent que sur l'échantillon apporté au Laboratoire.
- la reproduction partielle de ce rapport d'analyse est strictement interdite.


Léguet GANOU
Chargé de l'intérim



Suite Annexe 2

MINISTRE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE,
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

INSTITUT DE RECHERCHE EN SCIENCES
APPLIQUEES ET TECHNOLOGIES

Tél : (226) 50 35 60 31 ; Fax : (226) 50 35 70 29

E-mail : dirtsat@fasonet.bf

Département Technologie Alimentaire

Tél. / Fax : (226) 50 36 37 90 - E-mail : dtat@fasonet.bf

BURKINA FASO
Unité – Progrès – Justice



Ouagadougou, le 09 JUN 2006

Le Chef de Département
Technologie Alimentaire

A

EIER

Tél : 76 52 71 15

OUAGADOUGOU

N°2006.../MESSRS/CNRST/IRSAT/DTA

RAPPORT D'ANALYSES

Nature du / des produit(s) : **Dégué Bouillie séchée**

Nombre d'échantillons reçus : 1

Observation sur le produit et son emballage : **Sachet plastique transparent**

Références du demandeur : **Tout super**

Identification du laboratoire : **Néant**

Echantillonnage fait par le demandeur

Echantillon reçu le : **26/05/2006**

Référence réception : **167/2006/CQ**

Début des analyses le : **30/05/2006**

Type d'analyses demandées : **Microbiologiques**

Méthodes d'analyses utilisées : - Normes ISO 4833/1991 pour la Flore totale
- Normes ISO 4832/1991 pour les Coliformes
- Normes ISO 7954/1988 pour les Levures / Moisissures
- Normes ISO 6888-1/1999 pour les Staphylocoques à coagulase positive

Résultats des analyses

Echantillon	Flore Totale	Coliformes totaux	Levures et moisissures	Staphylocoques
Grumeaux de farine	$1,3.10^7$ CFU/g	$1,4.10^4$ CFU/g	4.10^6 CFU/g	Moins de 10 CFU/g

NB : - Ces résultats ne portent que sur l'échantillon apporté au Laboratoire.

- la reproduction partielle de ce rapport d'analyse est strictement interdite


Le Chef de
Département
Technologie Alimentaire
Lèguet GANOU
Chargé de l'intérim

Annexe 3 : Fiche technique sur la notion d'activité de l'eau

Fiche technique

Notion de disponibilité de l'eau et d'activité d'eau dans la mangue

La mangue est un fruit riche en eau (80/85g pour 100g de mangue). Cette eau est plus au moins disponible et l'on emploie les expressions *eau libre* et *eau liée pour exprimer cela*.

▪ **L'EAU LIBRE** : C'EST UNE EAU QUI SE TROUVE DANS LA MANGUE MAIS ELLE N'EST PAS LIEE AUX COMPOSANTS DE LA MANGUE (LES SUCRES, LES PROTEINES ET LES VITAMINES). CETTE EAU SE COMPORTE COMME L'EAU PURE ET PAR CONSEQUENT ELLE S'EVAPORE FACILEMENT. LA PRESENCE DE CETTE EAU DANS LA MANGUE REND CETTE DERNIERE TRES PERISSABLE PAR CE QU'ELLE EST ACCESSIBLE AUX MICROORGANISMES ET FAVORISE LES REACTIONS BIOCHIMIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES.

▪ **L'EAU LIEE** : CONTRAIREMENT A L'EAU LIBRE, CETTE EAU EST RELATIVEMENT FIXEE AUX COMPOSANTS DE LA MANGUE, PAR ADSORPTION. ELLE EST DONC DIFFICILEMENT EVAPORABLE. ELLE EST EN REVANCHE MOINS ACCESSIBLE AUX MICRO-ORGANISMES ET AUX DEGRADATIONS BIOCHIMIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES.

La disponibilité de l'eau varie en fonction de la teneur en eau et la composition biochimique de la mangue. Elle est quantifiée par une grandeur dite *activité de l'eau, notée Aw*.

L'activité d'eau se définit par rapport à un état de référence qui est celui de l'eau pure, pour laquelle l'activité de l'eau est égale à 1. Elle correspond au rapport entre la pression de vapeur d'eau de l'aliment et la pression de vapeur de l'eau pure à la même température. La valeur de l'*Aw* varie de 0 (produit sec au point que toute l'eau est liée à l'aliment et donc sans qualité réactive) à 1 (toute l'eau est libre).

Dans les produits alimentaires très hydratés tels que la mangue, une partie très importante de l'eau est sous forme d'eau libre (en surface de produit ou dans des poches) et d'eau faiblement absorbée retenue par capillarité dans les tissus de produit.

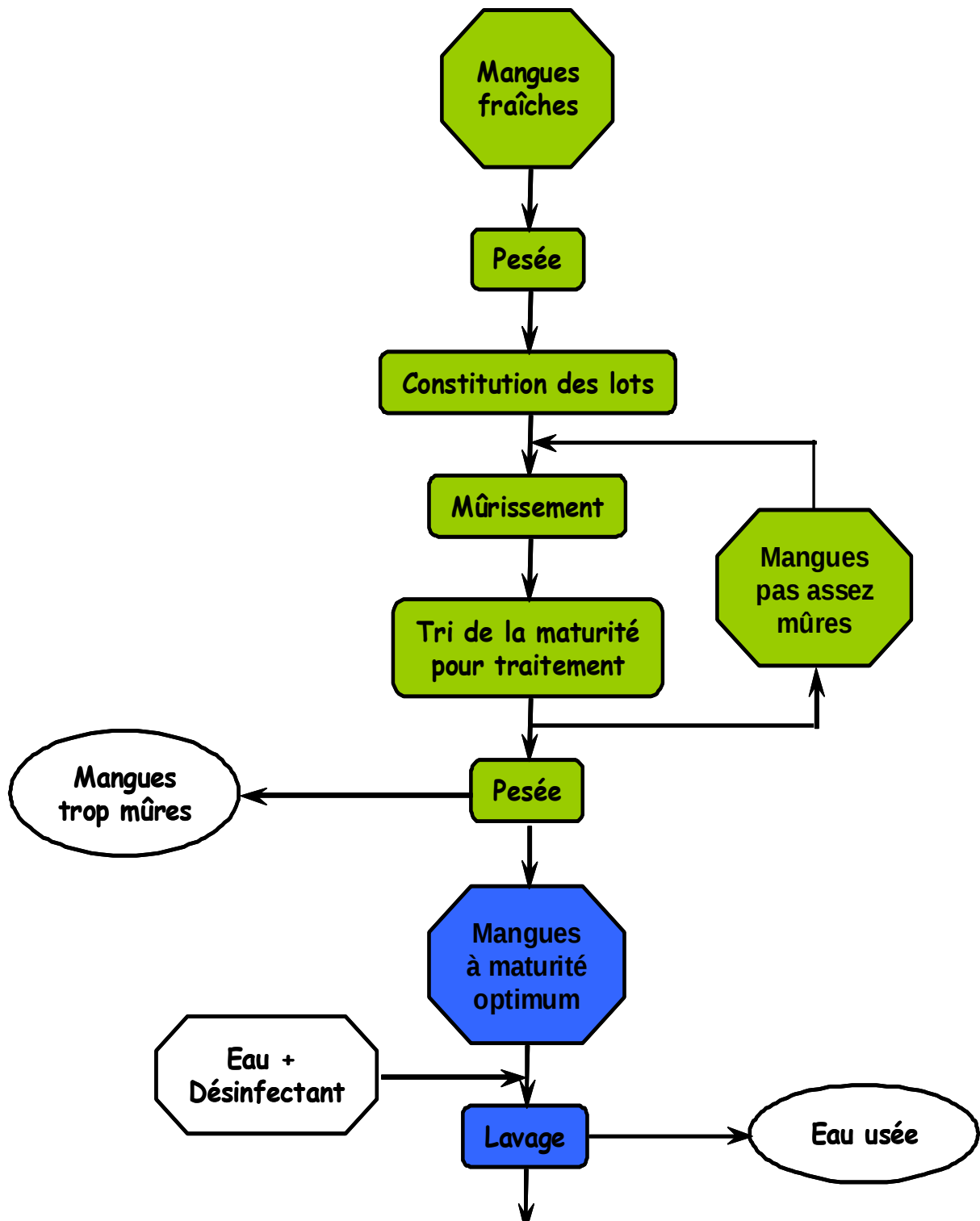
Ces différents types d'eau conditionnent le séchage des mangues en fractionnant ce dernier en *trois phases* :

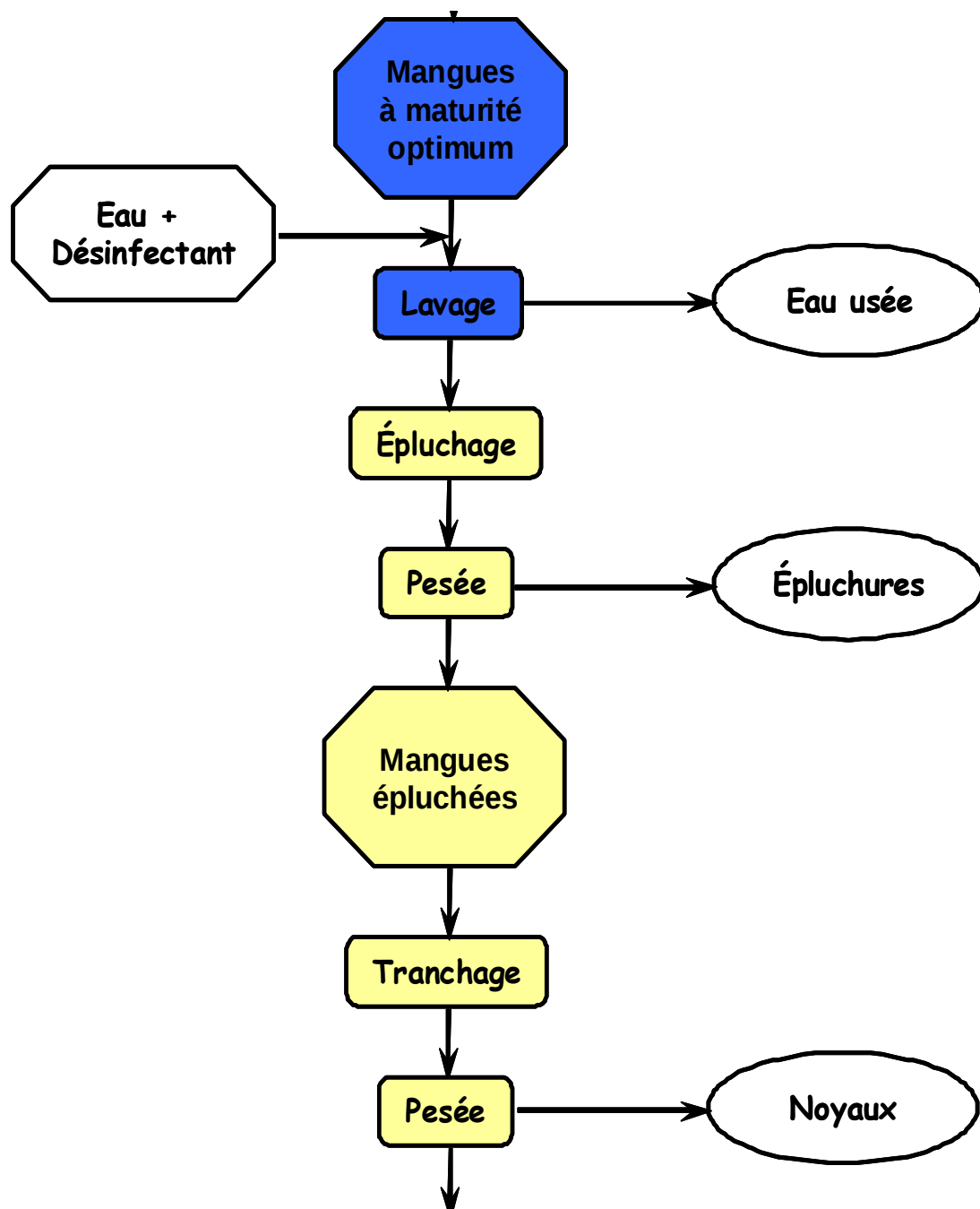
La phase (0) est courte, elle correspond à la montée en température du produit jusqu'à atteindre la température de l'équilibre.

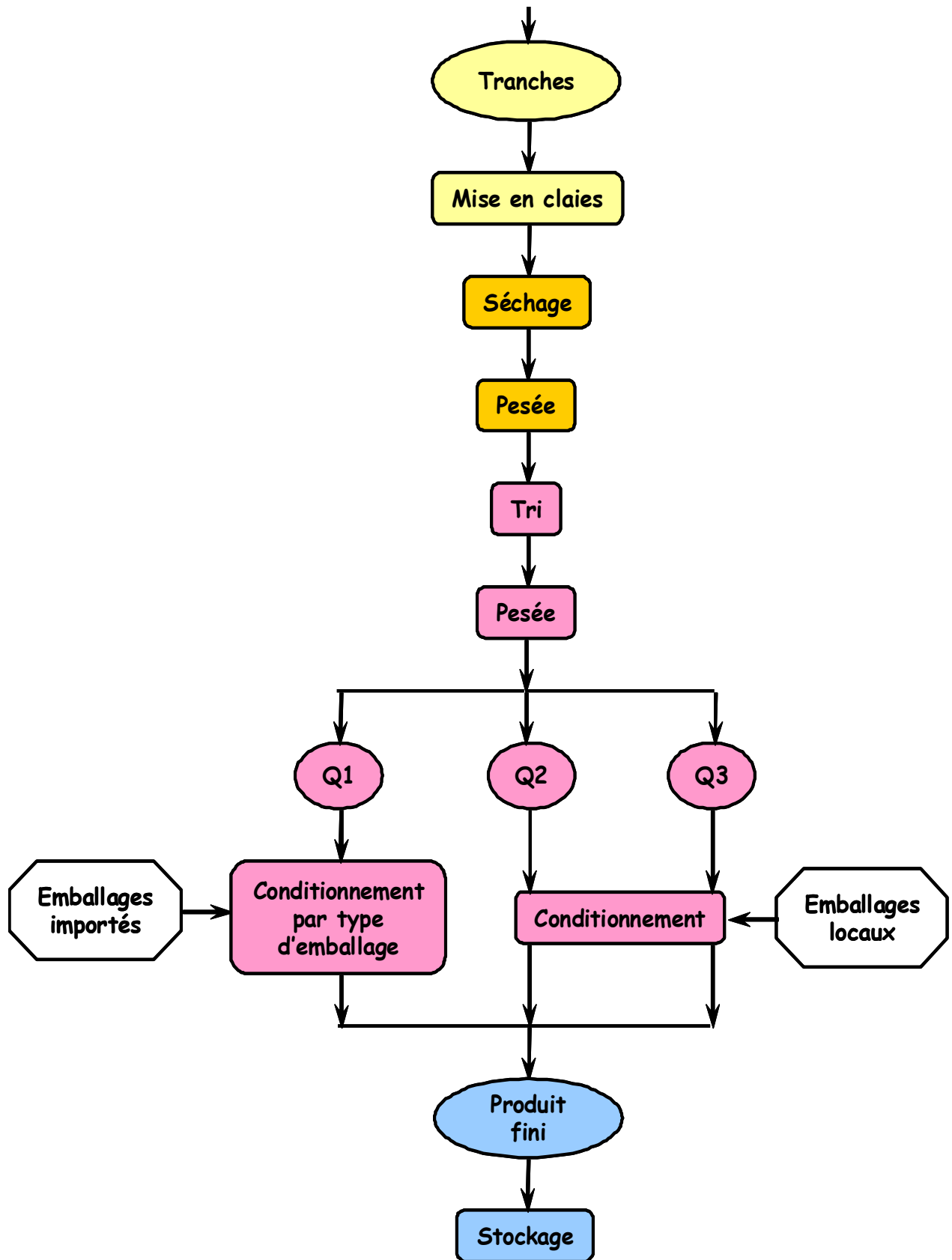
La phase (1) correspond à l'évaporation d'eau libre ($Aw = 1$) en surface de produit, sans cesse renouvelée par l'eau venant de l'intérieur du produit. La vitesse de séchage de cette période est constante. Cette vitesse peut être accélérée en augmentant la vitesse de circulation de l'air au niveau du produit.

La phase (2) correspond à l'évaporation de l'eau liée. Pendant cette période la vitesse de séchage ralentit. Plusieurs phénomènes expliquent ce ralentissement :

▪ **LE RALENTISSEMENT COMMENCE LORSQU'IL N'Y'A PLUS D'EAU LIBRE A LA SURFACE DU PRODUIT ET IL NE RESTE QUE L'EAU LIEE A EVAPORER.**

Annexe 4 : Diagramme de transformation de la mangue

Annexe 4 : suite

Annexe 4 : suite

Annexe 5 : Photos au sein des unités de transformation de produits roulés

Opération de vannage au niveau de l'unité A



Opération de lavage du mil décortiqué et vanné : Unité



Egouttage du mil lavé



Résidus après l'épierrage



Mouture des grains de mil au moulin du quartier : Unité B



Farine après mouture : Unité B



Lavage des mains avant le roulage : Unité B



Opération de roulage de la farine : Unité B



Séchage de la bouillie dans une pièce : Unité B



Opération de précuisson du dégué : Unité



Dégué précuit : Unité A



Préparation du dégué au séchage : Unité A



Dégué séché : Unité B



Dégué conditionné : Unités A et B

