

UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mention : Physique et Applications

Mémoire de MASTER

Spécialité : Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique

Option : Énergie Solaire et Bioénergie

Sujet :

**DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE D'OPTIMISATION
ENERGETIQUE APPLIQUEE A UNE LIGNE DE TRANSFORMATION
DE LA PULPE DE MANGUE**

Présenté et soutenu publiquement par

Tidiane DIAO

Le 18 /04/ 2023 devant le jury composé de :

Jury	Nom et prénom(s)	Grade	Etablissement
Président	NDIAYE Lat Grand	Professeur Titulaire CAMES	UASZ/UFRST
Rapporteur	SY Mouhamadou	Assistant CAMES	UASZ/UFRST
Examineur	THIAME Moustapha	Maître de conférences CAMES	UASZ/UFRST
Encadrant	THIAO Serigne	Maître-Assistant CAMES	UASZ/UFRST

REMERCIEMENTS

Je remercie le bon Dieu de m'avoir donné la santé, le courage, la volonté et la patience de mener à terme mes études.

Je tiens tout d'abord, à remercier vivement mon maître de stage, Monsieur Benoit MAZY. Merci pour ses conseils expérimentés, ses qualités humaines et sa disponibilité. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie vivement Dr Serigne THIAO, enseignant-chercheur au département de physique de l'université Assane Seck de Ziguinchor, qui m'a encadré et m'a guidé durant ce travail. Je le remercie pour ses multiples conseils, sa disponibilité et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse toute ma gratitude. Ses compétences ainsi que ses expériences dans le domaine m'ont été d'une grande utilité.

Je tiens à adresser mes plus sincères reconnaissances aux membres du jury qui ont accepté de consacrer un temps qui leur est précieux pour juger mon travail à savoir :

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

Professeur THIAME Moustapha, maître de conférences CAMES à l'Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) à qui je manifeste toute ma reconnaissance pour avoir accepté d'examiner mon document.

Dr SY Mouhamadou, assistant CAMES à l'Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) à qui je traduis toute ma gratitude pour avoir accepté d'être rapporteur de ce manuscrit.

Mes pensées vont également à l'endroit de mes camarades de la première promotion du MIER, à mes frères et amis.

J'aimerais aussi adresser mes remerciements à tous mes professeurs de l'UASZ pour les connaissances que j'ai reçues d'eux.

En fin, je voudrais remercier tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes très chers parents pour leurs sacrifices, mais aussi l'attention particulière qu'ils ont toujours prêtée à notre modeste personne.

À mes tuteurs frères et sœurs qui ont contribué de près ou de loin à ma réussite.

À tous mes enseignants du primaire jusqu'à l'université qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

À mes amis et camarades de promotion pour les années passées ensemble dans les meilleurs comme dans les pires moments.

A l'ensemble de mes tuteurs de la 6^e jusqu'à l'université. Soyez assuré de notre profonde gratitude.

Et à tous ceux que ma plume a oubliés.

Résumé

Cette étude repose sur les approches à suivre pour optimiser les consommations énergétiques des lignes de transformation des produits agroalimentaires. La première phase de ce travail est consacrée à l'étude bibliographique. La deuxième phase de ce travail repose principalement sur la méthodologie développée pour l'optimisation des consommations énergétiques des lignes de transformation des produits agroalimentaires. Dans cette partie, il a été question de rappeler la notion de ligne de transformation et vecteurs énergétiques afin de se focaliser sur les approches permettant aux investisseurs et entrepreneurs actifs dans le domaine de la transformation des produits agroalimentaire de maîtriser leur consommation énergétique. La dernière partie de ce travail consiste à appliquer la méthodologie présentée dans la deuxième partie pour faire le choix des équipements d'une ligne de transformation de la pulpe de mangue.

Mots clés : Optimisation, ligne de transformation, vecteurs, consommations énergétiques, pulpe de mangue.

ABSTRACT

His study is based on the approaches to be followed to optimize the energy consumption of food processing lines. The first phase of this work is devoted to a bibliographical study, in this part, notions of such as the current context of energy use, methods for using energy efficiently by these processes have been addressed. The second phase of this work is mainly based on the methodology developed for the optimization of the energy consumption of food processing lines. In this part, it was a question of recalling the notion of transformation line and energy vectors in order to focus on the approaches allowing investors and entrepreneurs active in the field of the transformation of agri-food products to control their energy consumption. The last part of this work consists to apply this methodology to make the choice of equipment for a mango pulp processing line.

Keywords: Optimization, processing line, vectors, energy consumption, mango pulp.

Nomenclature

E_{elect} : la consommation électrique (kWh)

$C_{élect}$: coût électrique en (FCFA)

E_{comp} : Energie consommée par le compresseur en (kWh)

$C_{électcomp}$: le coût électrique du compresseur en (FCFA)

$E_{aircomp}$: La consommation en air comprimé du poste en (L)

$B_{aircomp}$: besoin en air comprimé du poste ou la cadence du poste en air comprimé (L /h)

$C_{aircomp}$: le coût en air comprimé en (FCFA)

P_c : *Production du compresseur* en litre (L)

E_{ch} : l'énergie consommée par la chaudière (kWh)

$C_{électch}$: le coût énergétique de la chaudière en FCFA

E_{vap} : la consommation en vapeur d'un poste en (kJ)

B_{vap} : le besoin en vapeur d'un poste ou la cadence en (kg)

C_{vapch} : le coût en vapeur du poste en (FCFA)

P_{ch} : Production de la chaudière en (kg)

P_n : puissance nominale (kW)

C_p : Coût du poste en (FCFA)

C_T : Coût total du poste en (FCFA)

P : la production en tonne/jour

c_i : la cadence de la machine en t /h ;

N_i : nombre de machines.

t : temps de fonctionnement en (h)

p_{kWh} : prix unitaire du kilowattheure en (FCFA)

P_s : consommation spécifique en (kW)

Liste des abréviations

AIE : Agence Internationale de l’Energie
S.A : Société Anonyme
SENELEC : Société Nationale d’Electricité du Sénégal
IPP : Independant Power Producer
MW :
ADEME : Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie
EMR : Énergie Minimale Requise
CO2 : Dioxyde de Carbone
PIB : Produit Intérieur Brut
BMN : Bureau de Mise à Niveau
PMNE : Programme de Mise à Niveau des Entreprises
SEME : Système de Management de l’Efficacité Energétique
PME : Petite et Moyenne Entreprise
M : Machine
W : Watt
kW : kilowatts
Wh : Wattheures
kWh : kilowattheures
ISO : Organisation Internationale de normalisation

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	2
INTRODUCTION.....	3
I.1 CONTEXTE ENERGETIQUE.....	3
I.1.1 CONTEXTE ENERGETIQUE MONDIAL	3
I.1.2 SITUATION ENERGETIQUE ACTUELLE DU SENEGAL	4
I.2 GENERALITE SUR L'OPTIMISATION ENERGETIQUE.....	5
I.2.1 DEFINITION	5
I.2.2 APPROCHES SYSTEMATIQUES D'OPTIMISATION ENERGETIQUE	5
I.2.3. EFFICACITE ENERGETIQUE	6
I.3 OPTIMISATION ENERGETIQUE DANS LES UNITES DE TRANSFORMATIONS DE FRUITS ET LEGUMES.....	8
I.3.1 ANALYSE ENERGETIQUE DU SECTEUR DE TRANSFORMATION DE FRUITS ET LEGUMES	8
I.4 LES DIFFERENTES SOLUTIONS D'OPTIMISATION ENERGETIQUES DANS L'INDUSTRIE.....	9
I.4.1 EQUIPE DE GESTION DE L'ENERGIE	9
I.4.2 SURVEILLER LA CONSOMMATION D'ENERGIE	9
I.4.3 OPTIMISER LES COMPRESSEURS D'AIR	10
I.4.4 LES ENERGIES RENOUVELABLES	10
CONCLUSION.....	10
CHAPITRE II : LIGNES DE TRANSFORMATION ET METHODOLOGIE	11
INTRODUCTION.....	12
II.1 QU'EST-CE QU'UNE LIGNE OU CHAINE DE TRANSFORMATION.....	12
II.2) GENERALITES SUR LES NOTIONS DE BASE DE LIGNES DE TRANSFORMATION.....	13
II.2.1) CAPACITE DE TRANSFORMATION	13
II.2.2) PUISSANCE ET ENERGIE	13
II.2.3) CADENCE D'UNE MACHINE	14
II.3 RAPPEL SUR LES VECTEURS ENERGETIQUES.....	14
2.2.1 L'ELECTRICITE	14
2.2.2 LA VAPEUR	14
2.2.3 L'AIR COMPRIME	15
2.3 COÛT DE PRODUCTION.....	15
2.3.1 COÛT DE L'ELECTRICITE	15
2.3.2 COÛT DE L'AIR COMPRIME	15
2.3.2 COÛT DE LA VAPEUR	17
2.3.4. COÛT ENERGETIQUE DE LA LIGNE DE TRANSFORMATION.....	18
2.5. METHODOLOGIE.....	19
2.5.1. RAPPEL SUR LES OBJECTIFS DE LA METHODOLOGIE	19

CONCLUSION.....	22
CHAPITRE III : APPLICATION DE LA METHODOLOGIE A UNE LIGNE DE	23
TRANSFORMATION DE LA PULPE DE MANGUE	23
INTRODUCTION.....	24
3.1. LES DIFFERENTES ETAPES D'UNE LIGNE DE TRANSFORMATION DE JUS DE MANGUE.....	24
3.1.1. TRIEUSE DE FRUITS.....	24
3.1.2. MACHINE A LAYER LES FRUITS.....	25
3.1.3. DEPULPEUSE DE MANGUE.....	25
3.1.4. DEGAZEUR SOUS VIDE.....	26
3.1.5. HOMOGENEIGATEUR DE JUS.....	26
3.1.6. STERISATEUR DE JUS.....	27
3.1.7. PASTEURISATEUR DE JUS.....	27
3.2. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE POUR LE CHOIX DES EQUIPEMENTS D'UNE LIGNE DE TRANSFORMATION DE LA PULPE DE MANGUE.....	28
3.2.1. CHOIX DE LA TRIEUSE.....	28
3.2.2. CHOIX D'EQUIPEMENT POUR LAYER LES MANGUES.....	30
3.2.3. CHOIX DES EQUIPEMENTS : DEGAZEUR SOUS VIDE.....	32
CONCLUSION.....	33
CONCLUSION GENERALE.....	34
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	35

LISTE DES FIGUR

Figure I 1 : Evolution de la consommation d'énergie primaire total finale mondiale (en millions de tonnes équivalent pétrole) par source[1].....	3
Figure I 2 : Power supply mix[3].....	4
Figure I 3 : Impact de l'efficacité énergétique sur les projections d'émissions de CO2[6].....	7
Y	
Figure II 1 : Ligne de transformation à n machines[13].....	12
Figure II 2 : Ligne de transformation[13].....	12
Figure III 1 : Trieuse de mangue[15].....	24
Figure III 2 : Machine à laver[15].....	25
Figure III 3 : Dépulpeuse de mangue[15].....	25
Figure III 4 : Dégazeur sous vide[16].....	26
Figure III 5 : Homogénéisateur de jus[17].....	27
Figure III 6 : Stérilisateur de jus de mangue[15].....	27
Figure III 7 : Pasteurisateur de jus de mangue.....	28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II 1 : Caractéristiques des équipements.....	19
Tableau II 2: Consommation et coût des vecteurs énergétiques de chaque poste.....	20
Tableau II 3: Nombre de tonnes par jour.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau II 4 : prix unitaire des vecteurs énergétiques.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau II 5 : caractéristique du compresseur.....	21
Tableau II 7 : Caractéristique de la chaudière.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau II 9 : Heures de fonctionnement de la ligne.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau II 10 : Récapitulatif des coût minimaux des différents postes.....	21
Y	
Tableau III 1 : Caractéristiques de différentes trieuses.....	28
Tableau III 4 : Caractéristiques de différentes machines à laver les mangues.....	30
Tableau III 5 : Consommations et coût énergétiques total de chaque machine à laver les mangues..	31
Tableau III 6 : caractéristiques de différent équipement de dégazeur sous vide.....	32

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, l'énergie est au centre de toutes les préoccupations. Que ce soit d'un point de vue politique, économique ou écologique, une prise de conscience collective s'est opérée. L'avancée technologique sans interruption a mis en évidence les dangers encourus par la planète et ses habitants. Plusieurs traces sont déjà visibles, avec la disparition d'espèces animales et végétales, ou la fonte des glaciers. La course au progrès nécessite beaucoup d'énergie, de même que la démocratisation des nouvelles technologies. Les besoins évoluent en même temps que la technologie. Ce qui fait que dans le contexte mondial actuel, le défi de l'efficacité énergétique devient majeur. En effet, il est constaté que les entreprises utilisant l'énergie de manière inefficace peuvent être responsables des émissions de gaz à effet de serre même si elles contribuent de façon importante à la croissance économique, ainsi il serait important d'optimiser leur consommation énergétique. Le présent mémoire a pour objectif de proposer une méthodologie d'optimisation énergétique qui permettra à des investisseurs et entrepreneurs actifs dans le domaine de la transformation des produits agroalimentaire, de faire un bon choix de leurs équipements. Une ligne de transformation de la pulpe de mangue est un exemple d'application de cette méthodologie qui a été décrite de façon générale dans cette étude, de même que ses vecteurs énergétiques.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

Ce chapitre est en quelque sorte un aperçu du contexte actuel de la politique énergétique, cela à travers les définitions des différents concepts ayant en rapport avec la situation énergétique mondiale, en particulier le Sénégal. Il s'agira entre autres de voir les tendances actuelles de l'utilisation de l'énergie en lien avec le développement durable afin d'adopter des méthodes d'optimisation de la consommation énergétique dans les entreprises.

I.1 CONTEXTE ENERGETIQUE

I.1.1 CONTEXTE ENERGETIQUE MONDIAL

L'observation des consommations énergétiques mondiales depuis un siècle met en évidence le rôle fondamental de l'énergie primaire dans le développement de nos civilisations industrielles. Si on regarde la consommation énergétique primaire mondiale depuis 1971, on remarque qu'elle n'a cessé de croître de manière quasiment exponentielle (Figure I 1).

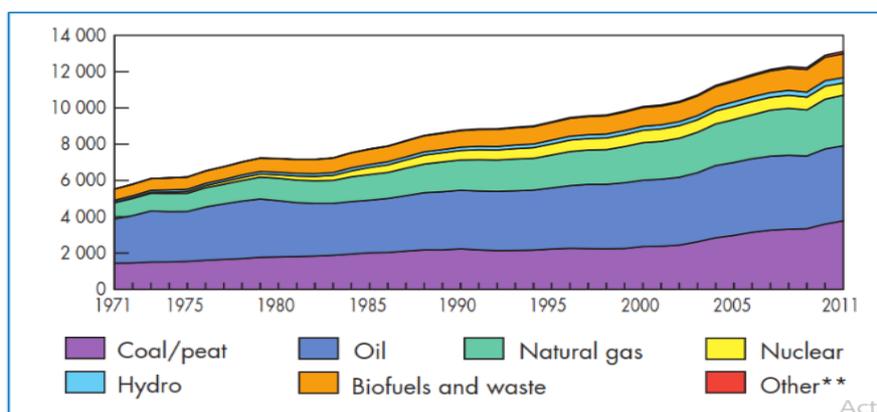


Figure I 1 : Evolution de la consommation d'énergie primaire totale finale mondiale (en millions de tonnes équivalentes en pétrole) par source [1]

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), la consommation mondiale d'énergie va augmenter de 50 %, pour accompagner la croissance démographique et économique. Le taux de consommation diffère d'un pays à un autre, il est déterminé par les conditions climatiques, le taux de croissance économique et le développement technologique [1].

Le contexte énergétique mondial, ainsi que les différents traités mondiaux et européens concernant l'évolution du climat poussent l'homme à revoir sa copie vis-à-vis de la gestion énergétique. De plus, les ressources énergétiques utilisées pour le développement de l'espèce humaine s'épuisent. Associés à la pollution générée et à la flambée des prix des hydrocarbures, ces différents handicaps poussent l'être humain à optimiser sa consommation énergétique.

I.1.2 SITUATION ENERGETIQUE ACTUELLE DU SENEGAL

Au Sénégal, l'autosuffisance énergétique est une des préoccupations majeures des décideurs de ce pays. Deux formes d'énergies sont utilisées au Sénégal pour satisfaire un besoin croissant en énergie. Il s'agit des énergies non renouvelables composées de combustibles fossiles et les énergies renouvelables [2].

- Production électrique :
- La capacité de production installée en 2015 était de 843 MW, dont 489 MW en centrales thermiques gérées par la SENELEC à majorité étatique (cf. figure I.2).
- Grâce aux IPP (Independent Power Producer), la capacité installée du pays a atteint 1000 MW en 2016 et 1100 MW en 2017. Le graphique ci-dessous montre les projections fermes de capacité par source primaire.

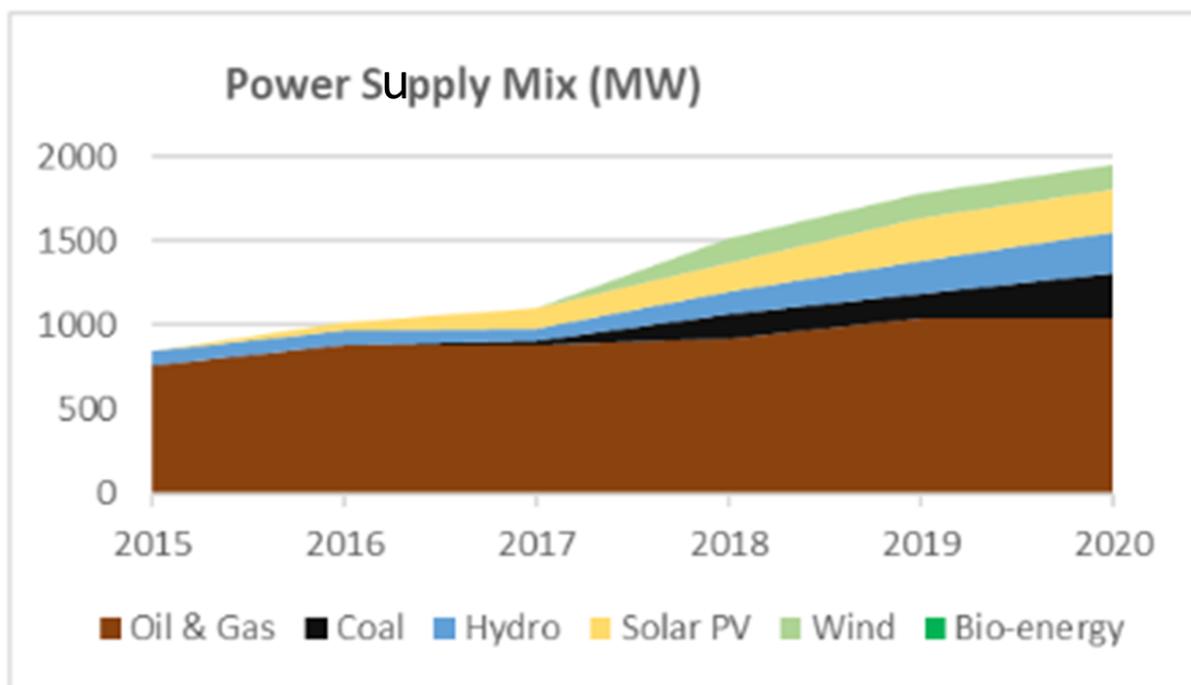


Figure I 2 : Mix énergétique [3]

➤ La consommation :

La consommation finale d'énergie conventionnelle (produits pétroliers, charbon minéral et électricité) représente plus de 65 % de la consommation finale totale. Les produits pétroliers constituent la plus grande part des consommations d'énergie conventionnelle (81 %) contre 12 % pour l'électricité. Les consommations des clients domestiques ainsi que celles des professionnels et industriels ont progressé à peu près dans les mêmes proportions. En 2016, les utilisations professionnelles représentaient 54% de la consommation, tandis que les éclairages domestique et public représentaient 44% et 2% respectivement [3].

I.2 GENERALITE SUR L'OPTIMISATION ENERGETIQUE

I.2.1 DEFINITION

L'optimisation énergétique peut être définie comme un concept visant à utiliser (ou ne pas utiliser) l'énergie dans un environnement bâti, dans le but de maximiser les avantages pour l'entreprise et pour l'environnement [4]. Les industries consomment beaucoup d'énergie, mais souvent de manière inefficace, et elles sont l'une des principales responsables des émissions de gaz carbonique. Il n'y a aucun conflit inhérent entre l'efficacité énergétique et la

croissance économique d'une entreprise. Une installation industrielle en bonne santé doit être gérée de façon générale, plus durable et, donc plus concurrentielle. De plus, l'optimisation énergétique dans l'industriel se traduit souvent par une plus grande fiabilité et rentabilité [4].

I.2.2 APPROCHES SYSTEMATIQUES D'OPTIMISATION ENERGETIQUE

Une étude menée par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) rapporte que le secteur industriel peut économiser environ 20% d'énergie d'ici 2030 en respectant les recommandations suivantes :

- Premièrement, réaliser un examen approfondi du système énergétique. En d'autres termes, faire un inventaire de tous les flux d'énergie (qu'il s'agisse de flux chauds ou froids) nécessaires pour le bon fonctionnement des équipements et processus.
- Deuxièmement, analyser tous les flux thermiques tels que le débit, la température, la capacité thermique ou encore la pression des installations afin de déterminer les besoins réels de la consommation en énergie du site industriel.
- La troisième étape consiste à utiliser la méthode dite de pincement. Ce concept a été développé en 1979 par Bodo Linnhof, professeur à l'Université de Manchester (Angleterre). Son but est d'examiner les interactions entre tous les flux pour déterminer le domaine où se trouve l'énergie maximale récupérable. De ce fait, on peut donc localiser la zone où il faudra mettre en œuvre les solutions de récupération de chaleur ou d'optimisation énergétique.
- D'une manière générale, l'analyse systémique tente donc d'identifier le potentiel d'économie d'énergie maximal exploitable au sein du site industriel et de déterminer les technologies pouvant être mises en place pour atteindre l'objectif visé. D'une manière générale, cette étape nécessite la définition de l'Énergie Minimale Requise (EMR) et du potentiel de récupération de chaleur. Ainsi, vous pourrez avoir des installations et procédés qui fonctionnent mieux, qui consomment moins et qui exploitent au mieux l'énergie consommable [5].

I.2.3. EFFICACITE ENERGETIQUE

- DEFINITION

Définir l'efficacité énergétique n'est pas un exercice simple. Dans une perspective politique, la maîtrise de l'énergie peut être définie comme une approche qui vise, à travers des mesures techniques (diversification des ressources énergétiques, promotion des meilleures technologies disponibles), organisationnelles (stratégies de maîtrise de la demande et des systèmes d'information énergétique) et comportementales (information et sensibilisation), à réduire les factures énergétiques des usagers, et par extension des pays. Du point de vue opérationnel, la maîtrise de l'énergie est l'ensemble des actions synergiques qui, mises en commun, permettent de réduire la consommation d'énergie et/ou la facture énergétique d'une organisation (sociale ou économique). Elle peut être vue, par la réduction des consommations et la baisse de la demande qu'elle induit, comme une forme de production d'énergie virtuelle [6].

L'efficacité énergétique consiste à satisfaire un besoin donné avec la plus faible quantité d'énergie qui soit. Dans l'entreprise, elle concerne globalement toutes les utilités : l'électricité, l'eau, la vapeur, l'air comprimé, le froid, les combustibles.

Elle génère des gains substantiels en terme :

- ✓ d'économie d'énergie avec un effet positif sur la maîtrise de la consommation énergétique et la réduction du CO₂ rejeté dans l'atmosphère (Protocole de Kyoto) ;
- ✓ de rentabilité financière susceptible d'assurer un retour sur investissement satisfaisant [7].

En résumé, la maîtrise de l'énergie s'appuie ainsi sur des actions dites actives qui visent à optimiser les consommations par des dispositifs de régulation ou d'optimisation, et des actions dites passives portant sur l'amélioration de la performance intrinsèque des équipements et des matériaux.

La figure (I.3) ci-après confirme, à travers l'impact sur les émissions de CO₂ projetées en l'an 2050, l'importance de l'efficacité énergétique dans le paysage énergétique du futur. Cette tendance est principalement tirée par les pays occidentaux et, de plus en plus, les pays émergents. Il convient de noter que l'Afrique, et en l'occurrence le Sénégal, suit cette orientation ; de nombreuses initiatives ont été entreprises au Sénégal avec plus ou moins de succès.

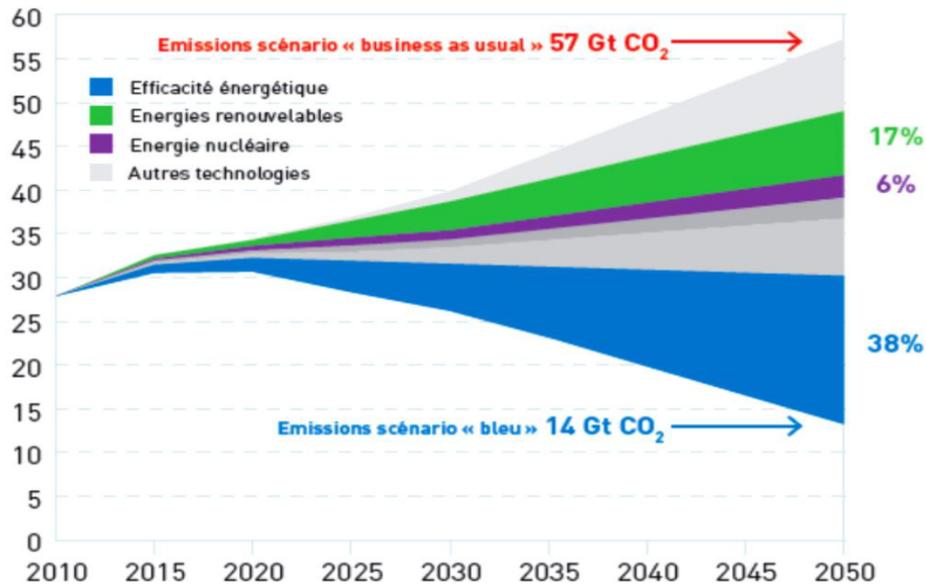


Figure I 3 : Impact de l'efficacité énergétique sur les projections d'émissions de CO₂ [6]

La notion d'efficacité énergétique désigne à la fois le résultat (un bâtiment consommant le moins d'énergie possible pour son propre fonctionnement et celui de ses occupants) et les moyens mis en œuvre pour l'atteindre (un ensemble d'actions pour économiser le plus d'énergie possible). Viser une certaine efficacité énergétique, c'est réduire la consommation en énergie de tout un système en conservant le même service final. Pour une entreprise, cela consiste à ne pas abaisser son niveau de production, ou encore le confort de ses collaborateurs. L'efficacité énergétique revient à consommer mieux plus qu'à consommer moins [8].

L'efficacité énergétique c'est le rapport entre l'énergie directement utilisée (dite énergie utile) et l'énergie consommée (en général supérieure du fait des pertes). L'efficacité énergétique se définit comme une consommation en énergie moindre pour le même service rendu. De ces définitions se dégage un point commun, l'efficacité énergétique vise à réduire le rapport entre l'énergie utile et la consommation énergétique [1].

- La politique de l'efficacité énergétique du Sénégal
La promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel au Sénégal s'effectue par le biais du Bureau de Mise à Niveau (BMN), dont l'instrument principal est le Programme de Mise à Niveau des Entreprises (PMNE) qui vise à renforcer la compétitivité du secteur privé et à promouvoir une nouvelle culture entrepreneuriale. Il intègre dans ses missions la thématique « Environnement et Efficacité Energétique

». Le BMN accompagne les entreprises du secteur privé pour les amener à adopter des technologies propres et énergétiquement efficaces [3]. En pratique, il s'agit d'un appui ciblé aux entreprises pour les inciter à investir dans la maîtrise de l'énergie et dans une meilleure prise en compte des effets néfastes de leurs activités sur le milieu naturel. Les principales missions confiées au BMN en matière de promotion de l'efficacité énergétique auprès des entreprises sont les suivantes :

- les diagnostics énergétiques ;
- les études techniques approfondies ;
- la formation sur les techniques d'économie d'énergie ;
- les acquisitions d'équipements et de procédés plus économes en énergie ;
- le changement vers les sources d'énergie plus économes ;
- le Système de Management de l'Efficacité Energétique (SEME) [3].

I.3 OPTIMISATION ENERGETIQUE DANS LES UNITES DE TRANSFORMATIONS DE FRUITS ET LEGUMES

I.3.1 ANALYSE ENERGETIQUE DU SECTEUR DE TRANSFORMATION DE FRUITS ET LEGUMES

I.3.1.1 LA CONSOMMATION ELECTRIQUE

En moyenne, la consommation d'énergie est principalement de l'électricité (utilisée par les procédés de refroidissement et de réfrigération, et l'énergie thermique requise pour l'hygiénisation des fruits et légumes est considérable.

Dans les usines de transformation de fruits et légumes frais, les installations sont généralement basées sur les procédés de refroidissement / congélation, de sorte qu'une grande partie de la consommation d'énergie est électrique [9].

I.3.1.2. LA CONSOMMATION THERMIQUE

Dans les usines de transformation de fruits et légumes, la consommation thermique n'est pas très représentative. Une campagne de mesures menée par Coopératives Agroalimentaires montre la répartition de la consommation d'énergie dans certaines PME auditées en 2010 : la consommation thermique n'était que de 14 %, tandis que la consommation électrique était de 86 %. Cette faible consommation thermique est due au chauffage de l'eau de nettoyage, au chariot élévateur pour le transport interne des fruits et légumes, aux brûleurs utilisés pour le séchage des produits frais, etc. Lorsque les 2e et 3e gammes sont prises en compte, la consommation thermique augmente considérablement pour répondre à la demande importante en énergie des procédés de pasteurisation et de congélation [9].

I.3.1.3. LA CONSOMMATION EN AIR COMPRIME

I.4 LES DIFFERENTES SOLUTIONS D'OPTIMISATION ENERGETIQUES DANS L'INDUSTRIE

I.4.1 EQUIPE DE GESTION DE L'ENERGIE

L'une des principales raisons pour lesquelles les initiatives en termes d'économie d'énergie et d'efficacité énergétique échouent est que les industriels ne savent pas clairement qui confier cette tâche. Il est important de constituer une équipe dédiée à la gestion de l'énergie. Vous pouvez par exemple recruter un représentant de chaque service ou faire appel aux services qui ont déjà engagé des initiatives pour maintenir les coûts énergétiques à un niveau bas. Ensemble, ils trouveront des solutions efficaces pour surveiller la consommation énergétique dans l'ensemble de l'entreprise, mettre en œuvre des moyens pour réduire les pertes et optimiser l'utilisation de l'énergie disponible [12].

I.4.2 SURVEILLER LA CONSOMMATION D'ENERGIE

Il est évident que lorsque les équipements industriels sont allumés, les consommations d'énergie augmentent. Mais là encore, il existe une solution pour optimiser la consommation énergétique. Au lieu d'allumer simultanément les machines en début de journée, il faut penser à faire cela par étapes. De ce fait, elles ne consommeront que l'énergie dont elles ont réellement besoin. Il convient donc de collecter et d'analyser les données en temps réel afin d'identifier les éventuelles pertes d'énergie et d'ajuster leurs temps de fonctionnement pour réaliser des économies de coûts globaux [5].

I.4.3 OPTIMISER LES COMPRESSEURS D'AIR

Investir dans un système d'air comprimé performant peut vous permettre d'économiser de l'argent sur le long terme. Un système fiable est essentiel pour votre entreprise, à condition que le système vérifie fréquemment la présence de fuites et d'autres problèmes techniques [5]. La production d'air comprimé est l'un des postes les plus coûteux pour une entreprise en termes de consommation énergétique. Dans les bâtiments qui nécessitent de l'air comprimé, près de 10% de l'énergie est dédiée à ce poste.

Cependant, en prenant quelques mesures simples, il est possible de contrôler la consommation d'énergie d'un compresseur d'air et réaliser des économies non négligeables pour votre entreprise. Une façon de le faire est d'analyser le fonctionnement de l'équipement et de

réduire les fuites. Il est dans ce cas essentiel d'adopter une approche systémique lors de l'exploitation et de l'entretien des équipements, de les doter de commandes qui permettent d'optimiser leurs performances.

Par ailleurs, il est recommandé de mettre en œuvre une politique de gestion de l'air comprimé afin d'éliminer les utilisations inutiles, ou bien d'utiliser des compresseurs plus petits qui fonctionnent pendant les périodes d'inoccupation des bâtiments industriels [12].

I.4.4 LES ENERGIES RENOUVELABLES

En ce qui concerne les énergies renouvelables, les possibilités sont remarquables pour réduire les consommations et optimiser l'efficacité énergétique de votre entreprise industrielle. Si possible, il serait bien d'exploiter la force du vent pour faire fonctionner les générateurs. Sinon, il faut combiner ces solutions avec la géothermie qui utilise la chaleur terrestre pour produire de la chaleur, la biomasse, ou encore profiter de la force motrice de l'eau pour faire fonctionner vos équipements et faire baisser leur consommation électrique [5].

Comme on peut le constater, le fait d'installer des solutions plus économes en énergie, telles qu'un compresseur d'air, un système photovoltaïque, etc., est essentiel. Mais pour être proactif, on devra aussi miser sur la surveillance du fonctionnement et des dépenses énergétiques des équipements et procédés.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, il a été question de rappeler le contexte énergétique mondial, mais aussi les différentes solutions d'optimisation énergétique dans l'industrie. Ainsi le chapitre suivant sera consacré à la méthodologie d'optimisation énergétique des lignes de transformation des produits agroalimentaires.

CHAPITRE II : LIGNES DE TRANSFORMATION ET METHODOLOGIE

INTRODUCTION

Une ligne de transformation représente une série de postes de travail organisée ayant pour fonction finale de produire un bien ou un service. Ce chapitre est consacré à l'explication et à la méthodologie développée pour le choix des équipements des lignes de transformations des produits agroalimentaires.

II.1 QU'EST-CE QU'UNE LIGNE OU CHAÎNE DE TRANSFORMATION

➤ DEFINITION ET EXPLICATION

On désigne par le terme « ligne de transformation » un ensemble de machines (ou processus) reliées entre elles et travaillant ensemble pour l'accomplissement d'une tâche, à savoir la transformation d'un produit donné. La figure II.1 montre une ligne de transformation à n machines.

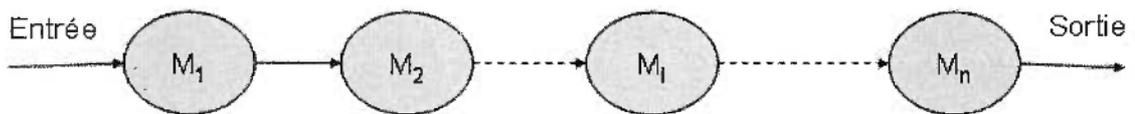


Figure II 1 : Ligne de transformation à n machines [13]

Les lignes de transformation constituent un système de transformation avec une structure spéciale. Dans ce cas, elles peuvent être définies comme un réseau linéaire de stations de travail ou de machines (M_1, M_2, \dots, M_k) séparées par des stocks tampons (B_1, B_2, \dots, B_{k-1}). Les produits circulent dans le système à partir de M_1 , ensuite B_1, M_2 et ainsi de suite jusqu'à atteindre M_k qu'ils vont quitter par la suite. La figure qui suit montre bien le système : les carrés représentent les machines et les cercles représentent les stocks tampons.



Figure II 2 : Ligne de transformation avec stocks [13]

II.2) GENERALITES SUR LES NOTIONS DE BASE DE LIGNES DE TRANSFORMATION

II.2.1) CAPACITE DE TRANSFORMATION

La capacité de production est la capacité d'une unité productive à produire son niveau maximum de biens ou de services avec une série de ressources disponibles [14].

➤ DIFFERENCE ENTRE CAPACITE DE PRODUCTION ET VOLUME DE PRODUCTION

Ces deux notions ne doivent pas être confondues. Quand on parle de capacité de production, on parle de la quantité maximale de biens et services qu'une unité de production peut produire, dans des conditions normales de fonctionnement, ainsi que d'une utilisation optimale des ressources. D'autre part, le volume de production mesure la quantité de biens et services qu'une unité productive a pu produire avec les ressources disponibles et pas toujours dans des conditions normales de fonctionnement [14]. En d'autres termes, le volume de production n'est pas nécessairement égal à la capacité de production, puisque l'unité de production peut fonctionner en dessous de son niveau de performance maximum, obtenant un volume de production inférieur, contrairement à sa capacité de production.

II.2.2) PUISSANCE ET ENERGIE

➤ LA PUISSANCE NOMINALE

La puissance nominale est la puissance absorbée par un appareil quand il fonctionne dans des conditions normales. Elle s'exprime en Watt (W) ou kilowatts (kW). Dans l'absolu, il faut que la puissance électrique absorbée par un appareil électrique corresponde à sa puissance nominale. Si elle est supérieure à sa puissance nominale, l'appareil risque d'être détérioré plus vite, si elle est inférieure, l'appareil aura un rendement en deçà de ses capacités optimales. Pour bien choisir son matériel, la puissance nominale sera donc le critère essentiel.

➤ L'ENERGIE CONSOMMEE

Une entreprise qui veut augmenter son efficacité énergétique doit être consciente de tous les postes qui consomment de l'énergie. Pour cela, elle doit, bien évidemment, connaître la consommation des machines quand elles tournent. Mais en même temps, elle doit tenir compte de l'énergie que ces machines utilisent quand elles sont à l'arrêt. Il faut, donc, faire la distinction entre « consommation en fonctionnement » et « consommation cachée ».

✓ CONSOMMATION EN FONCTIONNEMENT

Lorsqu'une machine ou un appareil fonctionne, il consomme du courant électrique. Pour connaître l'énergie consommée par cet appareil, il faut connaître sa puissance nominale. Cette consommation électrique est déterminée en multipliant la puissance nominale par la durée pendant laquelle il fonctionne. Elle se mesure en Wattheures (Wh) ou en kilowattheures (kWh).

II.2.3) CADENCE D'UNE MACHINE

La cadence nominale c'est le nombre de fois par minute ou par heure qu'une tâche peut être exécutée. Elle permet de déterminer le temps de fonctionnement de l'équipement.

II.3 RAPPEL SUR LES VECTEURS ENERGETIQUES

Un vecteur énergétique (ou vecteur d'énergie) est un véhicule ou une méthode permettant de transporter de l'énergie d'un endroit à un autre pour être transformée sous forme de chaleur ou de travail mécanique, ou être utilisé dans des processus physiques ou chimiques.

Au niveau des lignes de transformation, pour faire passer la matière première ou le produit de M1 à M2, le produit subit une transformation et ressort modifié. Pour effectuer cette transformation, le poste effectue un travail qui nécessite de l'énergie.

2.2.1 L'ELECTRICITE

En moyenne la consommation d'énergie est principalement l'électrique utilisée presque par tous les procédés de l'usine. Ce qui fait que la grande partie de la consommation de l'unité de transformation est électrique.

2.2.2 LA VAPEUR

La vapeur a longtemps été un vecteur énergétique privilégié pour les procédures industrielles et les installations. Elle est un vecteur énergétique très utilisée dans les unités de transformation. Elle intervient dans le processus de stérilisation de cuisson, de pasteurisation et le séchage.

Elle est produite le plus souvent dans les grandes unités de transformations par une chaudière à vapeur. La chaudière à vapeur ou générateur de vapeur est un appareil d'échange thermique qui est destiné à produire de la vapeur d'eau. L'énergie utilisée pour la transformation de l'eau en vapeur peut être de l'électricité ou des combustibles fossiles. Cette vapeur d'eau est ensuite utilisée par des échangeurs de chaleur, pour la stérilisation, la pasteurisation et le séchage, etc.

2.2.3 L'AIR COMPRIME

L'air comprimé représente le 4^e fluide le plus utilisé dans les industries de transformation juste après l'eau, le gaz et l'électricité. On parle d'air comprimé dans le cas d'un processus qui consiste à prélever de l'air pour le porter à une pression supérieure à celle de notre atmosphère grâce à un compresseur. L'air comprimé actionne et commande tous types de matériels, y compris des équipements de transformation primaire, des convoyeurs mécaniques, des équipements d'emballage, et d'étiquetage, et des outils pneumatiques manuels.

2.3 COÛT DE PRODUCTION

Partout dans le monde, le contexte relatif à l'énergie est très variable. De plus, le coût de l'énergie sera différent selon la politique énergétique nationale et prenant compte des combustibles fossiles qui peuvent être utilisés pour la production de l'énergie. Pour l'industriel, la politique énergétique n'a que peu d'importance. Pour lui, c'est le coût réel et actuel de l'énergie qui va impacter ses profits.

2.3.1 COÛT DE L'ELECTRICITE

Pour connaître la consommation électrique d'un poste au niveau des lignes de transformation, il faut multiplier la puissance du poste par la durée pendant laquelle il fonctionne. Elle se mesure en Wattheures (Wh) ou en kilowattheures (kWh). Elle est donnée par la formule suivante :

$$E_{elect} = N \times P_n \times t \quad (2.1)$$

E_{elect} : la consommation électrique journalière du poste en (kWh) ;

P_n : puissance nominale électrique du poste en (kW) ;

t : temps de fonctionnement du poste en (h) ;

N : le nombre de machines

Puisque le prix unitaire du kilowattheure est imposé par le fournisseur d'énergie, le coût énergétique du poste est donné par la formule suivante :

$$coût_{elect} = E_{elect} \times P_{kWh} \quad (2.2)$$

Avec :

$coût_{elect}$: le coût électrique du poste en FCFA ;

P_{kWh} : prix unitaire du kilowattheure en FCFA /kWh

2.3.2 COÛT DE L'AIR COMPRIME

- La consommation du compresseur

Pour calculer la consommation du compresseur, le mieux est de prendre la fiche technique détaillée, et d'y prendre la valeur de la consommation spécifique, généralement donnée en kW en évitant de prendre la valeur nominale ; étant donné qu'un compresseur ne compresse pas de l'air comprimé sans interruption. Il s'active et se coupe au fur et à mesure de la consommation sur le réseau. La puissance d'un compresseur est donnée par le produit du débit et de la pression. Généralement la pression industrielle est de 8bar.

Le débit est calculé par la somme des débits nécessaires au fonctionnement des divers actionneurs.

La consommation du compresseur est donnée par la formule suivante :

$$E_{comp} = P_c \times t \quad (2.3)$$

E_{comp} : Energie consommée par le compresseur en (kWh) ;

P_c : puissance du compresseur en (kW) ;

t : le temps de fonctionnement du compresseur (h).

Le coût électrique de la consommation du compresseur dépend du prix unitaire de l'électricité. Il est donné par la formule suivante :

$$C_{électcomp} = E_{comp} \times P_{kWh} \quad (2.4)$$

Avec :

$C_{électcomp}$: le coût électrique du compresseur en (FCFA).

La consommation en air comprimé d'un poste est donnée par la formule suivante :

$$E_{aircomp} = B_{aircomp} \times t \quad (2.5)$$

Avec :

$E_{aircomp}$: La consommation en air comprimé du poste en (l) ;

$B_{aircomp}$: besoin en air comprimé du poste ou la cadence du poste en air comprimé ;

t : le temps de fonctionnement du poste en (h) ;

Le coût en air comprimé du poste est donné par la formule suivante :

$$C_{aircomp} = \frac{E_{aircomp} \times C_{électcomp}}{P_c} \quad (2.6)$$

Avec :

$C_{aircomp}$: Coût en air comprimé du poste en (FCFA) ;

P_c : Production du compresseur en litre (L) ;

$C_{électcomp}$: coût électrique du compresseur en (FCFA).

2.3.2 COÛT DE LA VAPEUR

Dans les unités de transformation, la vapeur peut être produite à partir d'une chaudière électrique, à biomasse ou à fioul. Dans le cas d'une chaudière électrique, la consommation est donnée par la formule suivante.

$$E_{ch} = P_n \times t \quad (2.7)$$

Avec :

E_{ch} : l'énergie consommée par la chaudière (kWh) ;

P_n : la puissance nominale de la chaudière (kW) ;

t : le temps de fonctionnement de la chaudière (h).

Le coût énergétique de la chaudière est donné par la formule suivante :

$$C_{électch} = E_{ch} \times 1,6 P_{kWh} \quad (2.8)$$

Avec :

1,6 provient du fait que 1kWh correspond à 1,6kg de vapeur ;

$C_{électch}$: le coût énergétique de la chaudière en FCFA ;

P_{kWh} : le prix unitaire du kilowattheure en FCFA /kWh.

La consommation en vapeur d'un poste est donnée par la formule suivante :

$$E_{vap} = B_{vap} \times t \quad (2.9)$$

Avec :

E_{vap} : la consommation en vapeur d'un poste en (kg) ;

B_{vap} : le besoin en vapeur d'un poste ou la cadence en (kg/h) ;

t : le temps de fonction du poste en (h) ;

Le coût en vapeur est donné par la formule suivante :

$$C_{vapch} = \frac{E_{vap} \times C_{electch}}{P_{ch}} \quad (2.8)$$

C_{vapch} : Le coût en vapeur en (FCFA)

P_{ch} : Production de la chaudière en (kg)

2.3.4. COÛT ENERGETIQUE DE LA LIGNE DE TRANSFORMATION

➤ Coût énergétique d'un poste

La consommation énergétique d'un poste est la somme des consommations des différents vecteurs énergétiques utilisés par le poste. Elle est donnée par la relation suivante :

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_i \quad (2.8)$$

Avec :

E_p : la consommation du poste ;

E_i : consommation de vecteurs énergétiques ;

n : nombres de vecteurs énergétiques.

L'énergie consommée par la ligne de transformation correspond à la somme des consommations au niveau de chaque poste. Cette consommation est donnée par la formule suivante :

$$E_t = \sum_{p=1}^m E_p \quad (2.9)$$

Avec :

E_t : consommation totale de la ligne ;

m : le nombre de postes de la ligne de transformation.

Le coût énergétique de la ligne de transformation est la somme des coûts au niveau de chaque poste. Le coût énergétique de la ligne de transformation est donné par la formule suivante :

$$C_T = \sum_{p=1}^m C_p \quad (2.10)$$

Avec :

C_p : Coût du poste en (FCFA)

C_T : Coût total de la ligne de transformation en (FCFA)

2.5. METHODOLOGIE

2.5.1. RAPPEL SUR LES OBJECTIFS DE LA METHODOLOGIE

Cette méthodologie constitue aujourd'hui un guide qui consiste à accompagner les investisseurs et les entrepreneurs actifs dans le domaine de la transformation des fruits et légumes afin qu'ils comprennent les points essentiels à prendre en compte dans le choix de leurs équipements.

2.5.2 LES ETAPES DE LA METHODOLOGIE

Le guide se présente sous la forme d'un fichier Excel qui comporte différentes feuilles. Chaque poste de la ligne de production est représenté par une feuille avec ces différentes caractéristiques et en fin une feuille pour le tableau de bord.

2.5.2.1 LES EQUIPEMENTS

Pour chaque étape du processus, on pourra introduire des équipements avec leurs spécifications techniques et énergétiques. Chaque poste est caractérisé par une puissance nominale, sa cadence, le nombre de machines pour assurer ce travail qui dépend de la cadence nominale de la machine et en fin de la consommation énergétique pour chaque vecteur et du coût total du poste. Ces différentes caractéristiques sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II 1 : Présentation du tableau des caractéristiques des équipements

Désignation	Nombres machines	Temps fonctionnement pour une machine(h)	Temps de fonctionnement du poste(h)	Puissance (kW)	Cadence (t/h)	B_{va} (Kg/h)	$B_{aircomp}$ (L/h)
Machine1	N_1	t_{m1}	t_{p1}	P_{n1}	C_1	B_{va1}	$B_{aircomp1}$
Machine2	N_2	t_{m2}	t_{p2}	P_{n2}	C_2	B_{va2}	$B_{aircomp2}$

Machine3	N_3	t_{m3}	t_{p3}	P_{n3}	C_3	B_{va3}	$B_{aircomp3}$
Machine4	N_4	t_{m4}	t_{p4}	P_{n4}	C_4	B_{va4}	$B_{aircomp4}$
Machine5	N_5	t_{m5}	t_{p5}	P_{n5}	C_5	B_{va5}	$B_{aircomp5}$
Machine6	N_6	t_{m6}	t_{p6}	P_{n6}	C_6	B_{va6}	$B_{aircomp6}$
Machine7	N_7	t_{m7}	t_{p7}	P_{n7}	C_7	B_{va7}	$B_{aircomp7}$
Machine8	N_8	t_{m8}	t_{p8}	P_{n8}	C_8	B_{va8}	$B_{aircomp8}$

Les besoins en vecteurs énergétiques sont des paramètres définis par la fiche technique de la machine. B_{vapeur} est le besoin en vapeur et $B_{aircomp}$ est le besoin en air comprimé.

Tableau II 2: Présentation du tableau des consommations et coûts des vecteurs énergétiques de chaque poste

$E_{élect}$ (kWh)	$E_{aircomp}$ (l)	E_{vap} (kg)	$C_{élect}$ (FCFA)	$C_{aircomp}$ (FCFA)	C_{vap} (FCFA)	C_T (FCFA)
$E_{élect1}$	$E_{aircomp1}$	E_{vap1}	$C_{élect1}$	$C_{aircomp1}$	C_{vap1}	C_{T1}
$E_{élect2}$	$E_{aircomp2}$	E_{vap2}	$C_{élect2}$	$C_{aircomp2}$	C_{vap2}	C_{T2}
$E_{élect3}$	$E_{aircomp3}$	E_{vap3}	$C_{élect3}$	$C_{aircomp3}$	C_{vap3}	C_{T3}
$E_{élect4}$	$E_{aircomp4}$	E_{vap4}	$C_{élect4}$	$C_{aircomp4}$	C_{vap4}	C_{T4}
$E_{élect5}$	$E_{aircomp5}$	E_{vap5}	$C_{élect5}$	$C_{aircomp5}$	C_{vap5}	C_{T5}
$E_{élect6}$	$E_{aircomp6}$	E_{vap6}	$C_{élect6}$	$C_{aircomp6}$	C_{vap6}	C_{T6}
$E_{élect7}$	$E_{aircomp7}$	E_{vap7}	$C_{élect7}$	$C_{aircomp7}$	C_{vap7}	C_{T7}
$E_{élect8}$	$E_{aircomp8}$	E_{vap8}	$C_{élect8}$	$C_{aircomp8}$	C_{vap8}	C_{T8}

Le coût de ces vecteurs énergétiques pour chaque poste est donné par la formule suivante :

- Pour l'air comprimé

$$C_{aircomp} = \frac{E_{aircomp} \times C_{électch}}{P_c}$$

- Pour la vapeur

$$C_{vapch} = \frac{E_{vap} \times C_{électch}}{P_{ch}}$$

2.5.2.3 TABLEAU DE BORD

Cette partie de la méthodologie est avant tout un instrument d'aide à la prise de la décision facilitant le pilotage proactif des consommations énergétiques des lignes de transformation des produits alimentaires. Elle présente les outils de performances afin de mieux évaluer la consommation énergétique des différents postes pour procéder à son optimisation.

Doit-on ou pas maintenir cette combinaison ? Faut-il jouer sur l'heure de fonctionnement ? Faut-il mettre des équipements spécifiques pour la production de la vapeur et de l'air comprimé ? Faut-il infléchir les options ?

Donner des éléments de réponse à ces questions cruciales c'est le rôle de cette partie de la méthodologie. Pour cela qu'elle est structurée, organisée, personnalisée et spécifique. Elle est parfaitement adaptée :

- ✓ Au besoin du ou des décideurs ;

Cette partie de la méthodologie répond au besoin du décideur à savoir la production (P) qui renseigne sur le nombre de tonnes que l'investisseur veut travailler dans la journée.

- ✓ Aux coûts des vecteurs énergétiques

Cette partie de la méthodologie est consacrée au prix unitaire des vecteurs énergétiques (Électrique, Vapeur et Air comprimé) utiliser par la ligne de transformation et l'évaluation des coûts énergétiques de cette ligne de transformation.

- ✓ Caractéristiques des équipements de production des vecteurs énergétiques

Tableau II 3 : Caractéristique du compresseur et de la chaudière

Caractéristiques du compresseur					
Désignation	Cadence (l/h)	Puissance (kW)	Consommation électrique du compresseur(kWh)	Coût (FCFA)	Production du compresseur
Compresseur	C	P	E	Coût	P_c
Désignation	Cadence (kg vapeur/h)	Consommation (l)	Coût (FCFA)	Production de la chaudière (kg)	
Chaudière	C	E	Coût	P_{ch}	

Cette partie de la méthodologie est consacrée à la mise en place des équipements pour la production des vecteurs énergétiques utiliser par cette ligne de transformation.

Le dimensionnement de la ligne permet de connaître directement le besoin en air comprimé et en vapeur à partir des postes utilisant ces vecteurs énergétiques.

- ✓ Heure de fonctionnement de la ligne

Cette partie est réservée à la prise de décision pour les heures de fonctionnement notées T et exprimée en heure (h) de la ligne de transformation.

- ✓ Tableau récapitulatif des coûts minimaux de la ligne de production

Tableau II 4: Récapitulatif des coûts minimaux des différents postes

Désignation	Récapitulatif des coûts minimaux
A	coût minimal de A
B	coût minimal de B
C	coût minimal de C
D	coût minimal de D
E	coût minimal de E
F	coût minimal de F
G	coût minimal de G
H	coût minimal de H
I	coût minimal de I
J	coût minimal de J
K	coût minimal de K
L	coût minimal de L
M	coût minimal de M
N	coût minimal de N
Coût total de la ligne	Somme des coûts

Cette partie permet à l'investisseur à chaque fois qu'il y est de simulation de recevoir le coût minimal au niveau de chaque poste de cette ligne de transformation.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, la structure des lignes de transformation a été abordée ainsi que les vecteurs énergétiques et leurs coûts. En résumé une méthodologie permettant de faire le choix des équipements pour réduire les consommations énergétiques au niveau de chaque poste a été décrite. Le chapitre qui suit est consacré à l'application de cette méthodologie à une ligne de transformation de la pulpe de mangue.

**CHAPITRE III : APPLICATION DE LA METHODOLOGIE A UNE LIGNE DE
TRANSFORMATION DE LA PULPE DE MANGUE**

INTRODUCTION

Cette partie du travail est dédiée à l'application de la méthodologie développée sur une ligne de transformation de la pulpe de mangue. Il s'agit entre autres de rappeler les différentes étapes de cette ligne et de faire un choix judicieux des équipements poste par poste.

3.1.LES DIFFERENTES ETAPES D'UNE LIGNE DE TRANSFORMATION DE JUS DE MANGUE

Une ligne de transformation de jus de mangue comprend les équipements suivants :

- Trieuse de fruits ;
- Machine à laver les fruits ;
- Pulpeuse de mangue ;
- Dégazeur sous vide ;
- Homogénéisateur de jus ;
- Stérilisateur de jus ;
- Pasteurisateur de jus.

3.1.1. TRIEUSE DE FRUITS

Dans la chaîne de production de pulpe de mangue, le tri des mangues est un maillon très nécessaire. Les mangues sont triées en fonction de leur taille, de leur forme, de leur poids ou de leur couleur. La trieuse de fruit est une machine qui utilise comme vecteur énergétique l'électricité. La Figure III 1 ci-dessous nous montre une trieuse de mangue.



Figure III 1 : Trieuse de mangue [15]

3.1.2. MACHINE A LAVER LES FRUITS

La machine à laver les fruits utilise l'électricité et l'air comprimé pour fonctionner.

Le vecteur énergétique électricité permet de démarrer la bande de transport avec le moteur afin que cette bande fonctionne correctement dans la bonne direction. Le vecteur énergétique air comprimé est injecté dans le réservoir pour faire rouler l'eau. La **Figure III 2** ci-dessous nous montre une machine à laver de fruits.



Figure III 3 : Machine à laver [15]

3.1.3 DEPULPEUSE DE MANGUE

La machine à jus de pulpe de mangue électrique peut rapidement éliminer les noyaux de mangue et les peaux de mangue. Cette dépulpeuse utilise de l'électricité comme vecteur énergétique pour son fonctionnement. La **Figure III 4** ci-dessous nous montre une dépulpeuse de mangue.



Figure III 5 : Dépulpeuse de mangue [15]

3.1.4 DEGAZEUR SOUS VIDE

Le dégazeur sous vide de jus de mangue est une machine qui utilise comme vecteur énergétique l'électricité, l'air comprimé et la vapeur pour assurer son fonctionnement. Il peut éliminer l'oxygène et les traces d'oxygène contenus dans le jus de fruits/boisson[16].

La **Figure III 6** ci-dessous nous montre un dégazeur sous vide



Figure III 7 : Dégazeur sous vide [16]

3.1.5 HOMOGENEIGATEUR DE JUS

L'homogénéisateur de jus utilise comme vecteur énergétique l'électricité et l'air comprimé. Il est composé d'une pompe à haute pression et une tête d'homogénéisation. La pompe consiste à pressuriser le produit. La **Figure III 8** ci-dessous, nous montre un homogénéisateur de jus de mangue.



Figure III 9 : Homogénéisateur de jus [17]

3.1.6 STERISATEUR DE JUS

La stérilisation est une étape nécessaire pour assurer la durée de conservation du jus de mangue. Il peut éliminer les bactéries, les levures et inhiber l'activité enzymatique des jus de fruits. La **Figure III 10** ci-dessous, nous montre une machine de stérilisation de jus de mangue



Figure III 11 : Stérilisateur de jus de mangue [15]

3.1.7 PASTEURISATEUR DE JUS

La pasteurisation est un traitement thermique à des températures comprises entre 60 et 100°C ayant pour but de détruire la totalité des micro-organismes pathogènes non sporulés et de

réduire significativement la flore végétative présente dans un produit. C'est un procédé de conservation limité pour lequel le produit doit être conditionné hermétiquement (avec ou sans atmosphère modifiée ou sous vide) et réfrigéré (le produit pasteurisé peut être en effet conservé à +4°C de quelques jours à quelques semaines)[18]. La **Figure III 12** ci-dessous, nous montre un pasteurisateur de jus de mangue.



Figure III 13 : Pasteurisateur de jus de mangue [19]

3.2 APPLICATION DE LA METHODOLOGIE POUR LE CHOIX DES EQUIPEMENTS D'UNE LIGNE DE TRANSFORMATION DE LA PULPE DE MANGUE

3.2.1 CHOIX DE LA TRIEUSE

3.2.1.1 CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS DE LA TRIEUSE

Le tableau ci-dessous nous montre les caractéristiques de différentes trieuses.

Tableau III 1 : Caractéristiques de différentes trieuses

Désignation	Nombres machines	Temps fonctionnement pour une machine (h)	Temps de fonctionnement du poste (h)	Puissance (kW)	Cadence (t/h)
Machine 1	2	15	8	2	6
Machine 2	2	15	8	2,5	6
Machine 3	2	11	6	3	8
Machine 4	2	9	5	4	10
Machine 5	2	8	4	4,5	11
Machine 6	1	7	7	5	13

Machine 7	1	6	6	5,5	14
Machine 8	1	6	6	6	16

Une fois les différentes caractéristiques des équipements sont saisies, le nombre de machines est déterminé en fonction de l'heure de fonctionnement de la ligne de transformation qui est à priori défini par l'investisseur.

3.2.1.2 CALCUL DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES ET DES COÛT ENERGETIQUES TOTAUX POUR LE POSTE DE TRI

Tableau III 2 : Consommation énergétique du poste de trieuse

Besoin en air comprimé (L/h)	Besoin en vapeur (kg/h)	Eelect (kWh)	Eelect exact (kWh)	Consommation en air comprimé (L)	Consommation en vapeur (kgvap)
0	0	32,0	30,0	0	0
0	0	40,0	37,5	0	0
0	0	48,0	33,8	0	0
0	0	64,0	36,0	0	0
0	0	72,0	36,8	0	0
0	0	40,0	34,6	0	0
0	0	44,0	35,4	0	0
0	0	48,0	33,8	0	0

Au vu de ce tableau nous constatons que les besoins en air comprimé et en vapeur sont nuls cela est dû aux faits que c'est un poste qui n'utilise pas de l'air comprimé et de vapeur : c'est un poste mono énergie.

Tableau III 3 : Calcul des coûts énergétiques du poste de tri

Coût élect (FCFA)	Coût elect exact (FCFA)	Coût air comprimé (FCFA)	Coût vapeur (FCFA)	Coût total	Coût total exact (FCFA)
3200,0	3000,0	0	0	3200,0	3000,0
4000,0	3750,0	0	0	4000,0	3750,0
4800,0	3375,0	0	0	4800,0	3375,0
6400,0	3600,0	0	0	6400,0	3600,0
7200,0	3681,8	0	0	7200,0	3681,8
4000,0	3461,5	0	0	4000,0	3461,5
4400,0	3535,7	0	0	4400,0	3535,7
4800,0	3375,0	0	0	4800,0	3375,0

La consommation énergétique est déterminée en fonction de la puissance nominale, du temps de fonctionnement et le nombre de machines pour assurer la production. La consommation en vapeur et en air comprimé est nulle, car c'est un poste qui n'utilise qu'un seul vecteur

énergétique pour assurer son travail. Ce faible coût de ce poste est dû s'explique par le fait que c'est un poste qui utilise que l'électricité pour son fonctionnement.

3.2.2 CHOIX D'EQUIPEMENT POUR LAVER LES MANGUES

3.2.2.1 CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS POUR LAVER LES MANGUES

Le tableau suivant nous présente les caractéristiques de différentes machines à laver les mangues :

Tableau III 4 : Caractéristiques de différentes machines à laver les mangues

Désignation	Nombres machines	Temps fonction (h)	Temps du poste(h)	Puissance (kW)	cadence(t/h)
Machine 1	1	8	8	6	12
Machine2	2	11	6	4	8
Machine3	2	9	5	5	10
Machine4	1	6	6	8	16
Machine5	1	6	6	7,2	14
Machine6	1	8	8	5,8	12
Machine7	2	10	5	4,5	9
Machine8	2	8	4	5,5	11

Le temps de fonctionnement d'un poste est un paramètre qui dépend du temps de fonctionnement de la ligne et le nombre de machines. Il permet de déterminer la consommation énergétique pour chaque équipement.

3.2.2.2 CALCUL DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES ET LES COÛTS ENERGETIQUES TOTAUX DE CHAQUE MACHINE POUR LAVER LES MANGUES

Le tableau suivant présente les consommations énergétiques et le coût total de chaque machine.

Tableau III 5 : Consommations énergétiques du poste à laver les mangues

Besoin en air comprimé (L/h)	Besoin en vapeur (kg/h)	Eelec (kWh)	Eelec exact (kWh)	Consommation en air comprimé (L)	Consommation en vapeur (kvap)
0	0	48,0	45,0	0	0
0	0	64,0	45,0	0	0
0	0	80,0	45,0	0	0
10	0	64,0	45,0	56,25	0
9	0	57,6	46,3	57,8	0
8	0	46,4	43,5	60	0
6	0	72,0	45,0	30	0
8	0	88,0	45,0	32,7	0

Pour le choix de l'équipement de ce poste l'objectif est de faire des propositions pour lesquelles le compresseur d'air est intégré à l'intérieur et des propositions selon lesquelles il y a un compresseur d'air pour la production d'air comprimé et ensuite de faire des simulations pour voir la meilleure combinaison. Il en ressort de cette étude pour les petites lignes de transformation la mise en place en place d'un dispositif pour la production d'air comprimé n'est pas rentable il est préférable de choisir des équipements pour lesquels le compresseur d'aire est intégré à l'intérieur. Par contre pour les grandes lignes de transformation il est important de mettre en place un équipement spécifique pour la production d'air comprimé.

Tableau III 6 : Coûts énergétiques pour le choix du poste à laver les mangues

coût élec (FCFA)	coût elec exact (FCFA)	coût air comprimé (FCFA)	coût vapeur (FCFA)	Coût total (FCFA)	coût total exact (FCFA)
4800,0	4500,0	0	0	4800,0	4500,0
6400,0	4500,0	0	0	6400,0	4500,0
8000,0	4500,0	0	0	8000,0	4500,0
6400,0	4500,0	450	0	6850,0	4950,0
5760,0	4628,6	462,8	0	6222,9	5091,4
4640,0	4350,0	480	0	5120,0	4830,0
7200,0	4500,0	240	0	7440,0	4740,0
8800,0	4500,0	261,8	0	9061,8	4761,8

Le tableau III.6 montre les consommations énergétiques de chaque machine, le coût de chaque vecteur énergétique ainsi que le coût énergétique total de chaque poste. Ces valeurs élevées peuvent être expliquées par l'utilisation d'air comprimé par ce poste.

3.2.3 CHOIX DES EQUIPEMENTS : DEGAZEUR SOUS VIDE

3.2.3.1 CARACTERISTIQUES DU DEGAZEUR SOUS VIDE

Le tableau suivant présent les caractéristiques de différent équipement de dégazeur sous vide.

Tableau III 7 : Caractéristiques de différents équipements de dégazeur sous vide.

Désignation	Nombres machines	Temps pour une machine (h)	Temps du poste (h)	Puissance (kW)	Cadence (t/h)
Machine 1	1	3	3	15	30
Machine 2	1	2	2	22	40
Machine 3	1	2	2	22	41
Machine 4	1	4	4	12	23
Machine 5	1	5	5	9	18
Machine 6	1	8	8	5,5	12
Machine 7	1	7	7	6	13
Machine 8	1	6	6	7,5	15

Le temps de fonctionnement du poste est proportionnel à la puissance et la cadence de l'équipement. Plus la puissance et la cadence sont élevées plus le temps de fonctionnement de l'équipement est réduit.

3.2.3.1 CALCUL DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES ET LES COÛTS ENERGETIQUES DE CHAQUE OPTION

Tableau III 7 : Calcul des consommations énergétiques du dégazeur sous vide

Besoin en air comprimé (L/h)	Besoin en vapeur (kg/h)	Eelec (kWh)	Eelec exact (kWh)	Consommation en air comprimé (L)	Consommation en vapeur (kgvap)
0	0	120	45	0	0
0	0	176	49,5	0	0
0	0	176	48,29	0	0
0	25	96	46,95	0	97,8
0	13	72	45	0	65
8	5	44	41,25	60	37,5
8	7	48	41,53	55,3	48,4
9	18	60	45	54	108

Pour le choix de l'équipement de ce poste l'objectif est de faire des propositions pour lesquelles le compresseur d'air et la chaudière sont intégrés à l'intérieur et des propositions

selon lesquelles il y a un compresseur d'air pour la production d'air comprimé et une chaudière pour la production de vapeur et ensuite de faire des simulations pour voir la meilleure combinaison. Il en ressort de cette étude pour les petites lignes de transformation la mise en place des dispositifs pour la production d'air comprimé et de la vapeur n'est pas rentable il est préférable de choisir des équipements pour lesquels ces deux producteurs de ces vecteurs énergétiques sont intégré à l'intérieur. Par contre pour les grandes lignes de transformation il est important de mettre en place des équipements spécifique pour la production de ces vecteurs énergétique.

Tableau III 8 : Coûts énergétiques du dégazeur sous vide

Coût élec (FCFA)	Coût elect exact (FCFA)	Coût air comprimé (FCFA)	Coût vapeur (FCFA)	Coût total	Coût total exact (FCFA)
12000,0	4500,0	0	0	12000,0	4500,0
17600,0	4950,0	0	0	17600,0	4950,0
17600,0	4829,3	0	0	17600,0	4829,3
9600,0	4695,7	0	782,6	10382,6	5478,3
7200,0	4500,0	0	520	7720,0	5020,0
4400,0	4125,0	60	300	4760,0	4485,0
4800,0	4153,8	55	387	5243,1	4596,9
6000,0	4500,0	54	864	6918,0	5418,0

Ce coût total élevé est dû au fait c'est un poste qui utilise les trois vecteurs énergétiques pour assurer son travail.

CONCLUSION

Dans ce chapitre il a été question de rappeler les différentes étapes d'une ligne de transformation de la pulpe de mangue ; les vecteurs énergétiques utilisés au niveau de chaque étape de cette ligne et enfin l'application de la méthodologie développée pour faire le choix des équipements de certaines postes de la ligne.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a été principalement orientée sur l'optimisation énergétique des lignes de transformation des produits agroalimentaires. L'objectif étant de permettre aux investisseurs et aux entrepreneurs actifs dans le domaine de la transformation des fruits et légumes de réduire leur coût énergétique pour pouvoir réaliser des économies. Au cours de ce travail, il a été constaté que l'optimisation énergétique devient de plus en plus cruciale en raison de l'augmentation des coûts énergétiques et de la nécessité de réduire l'impact environnemental des industriels. En effet, la réduction de la consommation d'énergie permet de réduire les coûts d'exploitation et peut aller encore plus loin en faisant des économies colossales.

L'application de la méthodologie développée dans ce travail sur une ligne de transformation de la pulpe de mangue permettra aux investisseurs et aux entrepreneurs actifs dans ce domaine de réaliser des gains énormes avec une réduction de consommation énergétique considérable en faisant un choix sur les équipements les plus adéquats tout en tenant compte des vecteurs énergétiques associés et de leurs coûts.

Il ressort de cette étude que si la consommation énergétique dans l'industrie a été traditionnellement considérée comme un poste de dépense à contrôler et une facture à payer, les entreprises de nos jours doivent dans une nouvelle perspective réorienter leurs stratégies, leurs équipements et procédés de fabrication vers une solution plus respectueuse de l'environnement, mais qui offre aussi un meilleur retour sur investissement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D. M. E. Amin, “MANAGEMENT DE L’EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT,” p. 114.2014
- [2] S. E. Belkas, H. Delalande, A. Sow, T. Vincent, and J. Wang, “La situation énergétique du Sénégal,” p. 21.2017
- [3] A. S. Ba, “Analyse de la politique d’efficacité énergétique du Sénégal,” Université Paris Dauphine PSL, Research Report, Apr. 2018. Accessed: Oct. 19, 2022. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01956216>
- [4] “Optimisation énergétique dans l’industrie,” *FactoryFuture*. <https://www.factoryfuture.fr/optimisation-energetique-industrie/> (accessed May 27, 2022).
- [5] “Optimisation énergétique dans l’industrie,” *FactoryFuture*. <https://www.factoryfuture.fr/optimisation-energetique-industrie/> (accessed Sep. 14, 2022).
- [6] “Senegal_Strategie de maitrise de l’energie (SMES).pdf.” Accessed: Jun. 01, 2022. [Online]. Available: [https://rise.esmap.org/data/files/library/senegal/Documents/Energy%20Efficiency/Senegal_Strategie%20de%20maitrise%20de%20l'energie%20\(SMES\).pdf](https://rise.esmap.org/data/files/library/senegal/Documents/Energy%20Efficiency/Senegal_Strategie%20de%20maitrise%20de%20l'energie%20(SMES).pdf)
- [7] “Bureau de mise à niveau du Sénégal.” <https://www.bmn.sn/Environnement-et-Efficacite-Energetique-178> (accessed Nov. 05, 2022).
- [8] “L’efficacité énergétique en entreprise : quels enjeux - Oze Energies,” *Oze-Energies*. <https://www.oze-energies.com/audit-energetique/lefficacite-energetique-en-entreprise-quels-enjeux/> (accessed May 29, 2022).
- [9] “63915.pdf.” Accessed: Aug. 19, 2022. [Online]. Available: <https://teslaproject.chil.me/download-doc/63915>
- [10] “Production de l’air comprimé en industrie,” *Site énergie du Service public de Wallonie*. <https://energie.wallonie.be/fr/production-de-l-air-comprime-en-industrie.html?IDC=8040&IDD=97785> (accessed Sep. 26, 2022).
- [11] E. Guillard, “Système d’Air Comprimé : Un facteur clé de l’Efficacité Énergétique dans l’Industrie,” *Dexma*, Oct. 30, 2020. <https://www.dexma.com/fr/blog-fr/systeme-dair-comprime-un-facteur-cle-de-lefficacite-energetique-dans-lindustrie/> (accessed Sep. 26, 2022).
- [12] “Comment réduire la consommation énergétique dans l’industrie ?,” *FactoryFuture*. <https://www.factoryfuture.fr/reduire-consommation-energetique-industrie/> (accessed Sep. 28, 2022).
- [13] A.-T. Belmansour, “Évaluation du taux de production d’une ligne avec stocks intermédiaires et machines à deux modes de défaillances par la technique d’agrégation,” p. 187.2007
- [14] “Capacité de production - Qu’est-ce que c’est, définition et concept - 2021 - Économie-Wiki.com.” <https://economy-pedia.com/11035677-production-capacity> (accessed Jul. 21, 2022).
- [15] “Ligne de production de pulpe de jus de mangue | Machine à jus de pulpe de mangue - Taizy,” May 24, 2021. <https://taizyfoodmachinery.com/fr/mangue-jus-pulpe-production-ligne-presse-presse-agrumes/> (accessed Sep. 19, 2022).
- [16] “Dégazeur sous Vide de Jus de Mangue pour Jus de Fruits,” *mangue*. <https://fr.mangoprocess.com/degazeur-vide-jus-mangue/> (accessed Sep. 20, 2022).
- [17] “Machine Industrielle d’Homogénéisateur de Jus de Mangue,” *mangue*. <https://fr.mangoprocess.com/machine-homogeneisateur-jus-mangue/> (accessed Sep. 20, 2022).

- [18] “156607-23235-29414.pdf.” Accessed: Sep. 20, 2022. [Online]. Available: <https://cdn.reseau-canope.fr/archivage/valid/156607/156607-23235-29414.pdf>
- [19] Inoxmim, “Pasteurisateur électrique Vs Pasteurisateur à Chaudière | InoxMIM 2020,” *Inoxmim*, Jul. 24, 2020. <https://www.inoxmim.com/fr/fr-blog/pasteurisateur-electrique> (accessed Oct. 10, 2022).