

République Du Sénégal  
Ministère De L'éducation Nationale  
Université Cheikh Anta Diop De Dakar  
École Supérieure Polytechnique Centre De Thiès  
Département De Génie Mécanique

GM.0510



Mémoire de travail de fin d'études  
En vue de l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur de Conception  
Optico électromécanique

Titre :

ETUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES SYSTÈMES D'ENTRAÎNEMENT  
POUR LA COMMANDE DU SHREDDER ET DU 6<sup>ème</sup> MOULIN  
DE LA COMPAGNIE SUCRIÈRE SENÉGALAISE (CSS)

Présenté et Soutenu par :

M. Moutianiadou NIANG

Email : quas-nia@yahoo.fr

Tel. : (+221) 77 528 97 38

Directeurs de projet :

Interne: Dr. Ousmane Sow (EPT)

Externe: M. Mor Guéye (CSS)

Membres du jury :

M. Pau Demba (coordonnateur EPT)

Dr. Ngor Saïr (examinateur EPT)

M. Alassane Diène (examinateur EPT)

M. Gérard Domaingue (CSS)

Année Académique 2007-2008

**ÉTUDE TECHNICO –ÉCONOMIQUE DES SYSTÈMES  
D'ENTRAÎNEMENT POUR LA COMMANDE DU  
SHREDDER ET DU 6<sup>ème</sup> MOULIN DE LA COMPAGNIE  
SUCRIERE SENEGALAISE**

**Mémoire de travail de fin d'études  
En vue de l'Obtention du  
Diplôme d'ingénieur de Conception**

**Titre :**

**ÉTUDE TECHNICO –ÉCONOMIQUE DES SYSTÈMES D'ENTRAÎNEMENT  
POUR LA COMMANDE DU SHREDDER ET DU 6<sup>ème</sup> MOULIN DE LA  
COMPAGNIE SUCRIERE SENEGALAISE**

**Par :**

**M. Mouhamadou NIANG**

**Email : quassnia@yahoo.fr**

**Tel : (+221) 77 528 87 38**

**École Supérieure Polytechnique Centre De Thiès**

**Département De Génie Électromécanique**

**Année scolaire 2007-2008**

DEDICACE

*A M. Hugot*  
*(Spécialiste de sucrerie)*

## RESUME

### ÉTUDE TECHNICO –ÉCONOMIQUE DES SYSTÈMES D'ENTRAÎNEMENT POUR LA COMMANDE DU SHREDDER ET DU 6<sup>ème</sup> MOULIN

Le but de ce travail consiste à faire une étude pour le choix de l'entraînement le mieux adapté pour le Shredder et le 6<sup>ème</sup> moulin de la Compagnie sucrière sénégalaise (CSS), à établir les spécifications techniques des appareils choisis et à vérifier enfin la rentabilité économique de la substitution des commandes actuelles. En ce sens, ce projet vise à moderniser les équipements d'entraînement du broyeur de cannes et du moulin d'extraction de jus de cannes.

Dans les sucreries, le service moulin occupe la première place dans la chaîne de fabrication du sucre, d'obtention de la bagasse et de la mélasse. Du choix judicieux des ses appareils de commande, dépend la continuité de la production, objet de toute entreprise dans cette économie de marché.

Nos recherches et calculs sont basés sur l'exploitation de formules empiriques disponibles dans la documentation, et l'exploitation des paramètres de fonctionnement des appareils de commande actuels (grandeurs thermodynamiques des turbines à vapeur). Par la suite, des extrapolations ont permis d'obtenir des résultats, tenant compte des objectifs de production fixés par la direction de la CSS. Ainsi, nous avons pu obtenir une formule nous donnant l'énergie consommée par le Shredder en fonction du tonnage de canne broyé.

Après calculs et exploitation des résultats, notre choix est porté essentiellement sur l'utilisation d'une commande par moteur électrique asynchrone à cages équipé d'un variateur électronique de vitesse. Les puissances des moteurs seront respectivement comprises entre 880 et 1000kW pour le moulin (selon celle disponible), et de 2600kw ou 3500kW pour le Shredder, selon le type de pilotage (pilotage par convertisseur statique ou pilotage directe).

En ce qui concerne la rentabilité économique, l'amortissement du capital investi est estimé à moins d'une année pour les investissements sur le Shredder, et de moins de trois ans pour le moulin.

De ces résultats obtenus, nous avons pu conclure sur la nécessité pour la compagnie de remplacer les appareils de commande actuels.

Mots – clés : Shredder – Moulin – Dimensionnement – Entraînement- Moteurs asynchrone à cages – Etude économique – Thermodynamique – Commande électromécanique.

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je dis Alhamdoulillah, et rend grâce à Allah le tout puissant.

Ce mémoire a été préparé au sein de la Compagnie Sucrière Sénégalaise à cette occasion. Je tiens à témoigner ma reconnaissance à toute personne ayant aidé, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail. Mes remerciements vont à :

- Monsieur le Directeur Général de la Compagnie Sucrière Sénégalaise.
- Mon encadreur interne Monsieur Ousmane Sow, enseignant à l'EPT, pour avoir accepté de suivre mes travaux.
- Monsieur Mor Guéye, mon encadreur pour les nombreux encouragements et l'accueil chaleureux qui m'a été réservé au niveau du bureau d'étude de la CSS.
- Monsieur Magib Diagne, Directeur des Ressources Humaines de la CSS, pour m'avoir accueilli dans son entreprise et pour avoir accepté de subventionner mes déplacements sur Richard Toll.
- Monsieur Cyril Pointu, Directeur du département usine pour le choix du sujet.
- Monsieur Coly, pour sa disponibilité dans la consultation des plans et tout le personnel du bureau d'étude et d'ordonnancement de la CSS.

Mes remerciements vont aux Messieurs : Alassane Diène, professeur à l'EPT, pour m'avoir trouvé un poste de stage à la CSS, et Salif Gaye, chef de département génie mécanique pour les encouragements.

J'adresse également mes remerciements à M. SENEQUE, à M. Wadji, M. Vincent, et à M. Dieng ; avec eux, j'ai eu des discussions intéressantes.

Je tiens à remercier également tous les membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

# Table des matières

RESUME .....	iv
Liste des Tableaux .....	x
Liste des Figures .....	xi
Liste des symboles et des abréviations .....	xii
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
<b>CHAPITRE 1 : A LA DÉCOUVERTE DES SUCRERIES .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Généralités sur la canne à sucre et les sucreries .....</b>	<b>3</b>
1.1.1. Introduction .....	3
1.1.2. Histoire de la canne à sucre .....	3
1.1.3. Description canne à sucre .....	5
1.1.4. Culture .....	6
1.1.5. Processus de fabrication du sucre de canne .....	6
1.1.6. Aspects économiques.....	9
<b>1.2. La Compagnie Sucrière Sénégalaise .....</b>	<b>9</b>
1.2.1. Historique de la CSS .....	9
1.2.2. Présentation de la CSS .....	9
1.2.3. Organigramme de la C.S.S. ....	10
<b>1.3. Conclusion.....</b>	<b>11</b>
<b>CHAPITRE 2 : DESCRIPTION TECHNIQUE DES INSTALLATIONS DU SERVICE MOULIN .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Introduction .....</b>	<b>12</b>
2.1.1. Généralités et présentation du service moulin .....	12
2.1.2. Étude de la partie préparation de canne .....	15
2.1.3. Machines de préparation de la canne .....	15
2.1.4. Indice de préparation.....	15

2.2.	Description du Shredder du service Moulin de la CSS .....	16
2.2.1	Mise en situation (voir figure 2-1) .....	16
2.2.2.	Fonction du Shredder .....	17
2.2.3.	Les composants du Shredder (voir figure 2.5).....	18
2.2.4.	Principe de fonctionnement du Shredder type FCB de la CSS .....	20
2.3.	Caractéristiques et performance du Shredder .....	22
2.4.	Description technique de la turbine d'entraînement du Shredder.....	23
2.5.	Description du 6e moulin .....	24
2.6.	Turbine d'entraînement du 6e moulin.....	25
2.7.	Conclusion .....	27
 <b>CHAPITRE 3 : ETUDE ET COMPARAISON DES ACTIONNEURS POUR LA COMMANDE DES BROYEURS DE CANNE</b>		
.....		28
3.1.	Généralités.....	28
3.1.1.	Objectifs .....	28
3.1.2.	Principe d'un entraînement d'une machine .....	28
3.2.	Description d'un groupe d'entraînement .....	29
3.3.	Modes de fonctionnement d'une machine.....	30
3.3.1.	Types de machines ou de charges.....	30
3.3.2.	Charges actives .....	30
3.3.3.	Analyse des quadrants de fonctionnement .....	30
3.4.	Différents types de combinaisons.....	32
3.5.	Mode d'entraînement des broyeurs dans les sucreries .....	33
3.5.1.	Par turbine à vapeur .....	33
3.5.2.	Par moteur hydraulique .....	35
3.5.3.	Par moteur électrique .....	36
3.6.	Tableau comparatif pondéré de la solution électrique et la solution hydraulique .....	37
3.6.1.	Critères.....	37
3.6.2.	Tableau croisé .....	39
3.7.	Conclusion .....	39

<b>CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT ET SPECIFICATIONS TECHNIQUES DES APPAREILS DE COMMANDE DES BROYEURS</b> .....	40
<b>4.1. Introduction</b> .....	40
<b>4.2. Éléments de références du dimensionnement</b> .....	40
4.2.1. <i>Cahier de charges de l'entraînement</i> .....	40
4.2.2. <i>Caractéristiques et prévisions de broyage de la CSS</i> .....	41
<b>4.3. Dimensionnement du moteur du Shredder</b> .....	43
4.3.1. <i>Généralités</i> .....	43
4.3.2. <i>Méthods théorique</i> .....	43
4.3.3. <i>Méthodes empiriques</i> .....	53
<b>4.4. Dimensionnement du moteur du 6e moulin</b> .....	55
4.4.1. <i>Généralités</i> .....	55
4.4.2. <i>Calcul de la puissance du moulin à partir de la charge hydraulique</i> .....	56
4.4.3. <i>Calcul de la puissance du moulin en fonction du tonnage</i> .....	60
4.4.4. <i>Méthode expérimentale de calcul de la puissance du moulin</i> .....	60
4.4.5. <i>Synthèse du calcul de la puissance du moulin</i> .....	61
<b>4.5. Spécifications techniques des moteurs</b> .....	61
4.5.1. <i>Introduction</i> .....	61
4.5.2. <i>Spécifications techniques du moteur du Shredder</i> .....	63
4.5.3. <i>Spécifications techniques du moteur du moulin</i> .....	64
<b>4.6. Spécifications techniques du réducteur de vitesse du moulin</b> .....	64
<b>4.7. Spécifications techniques des variateurs de vitesse</b> .....	65
4.7.1. <i>Introduction</i> .....	65
4.7.2. <i>Propriétés générales de la variation de vitesse des machines électriques</i> .....	65
4.7.3. <i>Spécifications techniques du variateur de vitesse du moteur du 6<sup>ème</sup> moulin [5]</i> .....	66
4.7.4. <i>Spécifications techniques du variateur de vitesse du moteur du Shredder [5]</i> .....	68
<b>4.8. Conclusion</b> .....	71

<b>CHAPITRE 5 : ÉTUDE DE LA RENTABILITÉ DU PROJET</b> .....	72
<b>5.1. Étude économique des solutions de substitution retenues pour le service moulin</b> .....	72
5.1.1. <i>Introduction</i> .....	72
5.1.2. <i>Calcul de l'investissement total</i> .....	73
5.1.3. <i>Amortissement des investissements</i> .....	74
5.1.4. <i>Coût d'exploitation en énergie</i> .....	75
5.1.5. <i>Calcul des économies de coût</i> .....	77
<b>5.2. Évaluation de la rentabilité économique des solutions de substitution</b> .....	77
5.2.1. <i>Rentabilité du changement de la commande du Shredder</i> .....	78
5.2.2. <i>Rentabilité du changement de la commande du 6ème Moulin</i> .....	80
<b>5.3. Conclusion</b> .....	82
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	83
RECOMMANDATIONS .....	85
Bibliographie .....	86
Wébliographie .....	87
Annexes.....	88

## Liste des Tableaux

TABLEAU 1- 1 : COMPOSITION MOYENNE DE LA CANNE À SUCRE. ....	6
TABLEAU 2- 1 : RÉCAPITULATIF DU CALCUL DES MOMENTS D'INERTIE. ....	23
TABLEAU 4- 1 : DENSITÉ DES TYPES DE CANNE. ....	45
TABLEAU 4- 2 : CALCUL RAPPORT RÉDUCTION PRIMAIRE CONDUCTEUR DE CANNE. ....	46
TABLEAU 4- 3 : CALCUL RAPPORT RÉDUCTION SECONDAIRE ET GLOBAL CONDUCTEUR DE CANNE. ....	46
TABLEAU 4- 4 : ETAT THERMODYNAMIQUE NOMINAL DE LA VAPEUR D'ALIMENTATION DE LA TURBINE DU SHREDDER. ....	48
TABLEAU 4- 5 : ETAT THERMODYNAMIQUE DE LA VAPEUR FOURNIE PAR LA CSS. ....	48
TABLEAU 4- 6 : PUISSANCE ET COUPLE ABSORBÉS PAR LE SHREDDER NON CHARGÉ (À VIDE) POUR UN TONNAGE DE 250TCH. ....	50
TABLEAU 4- 7 : PUISSANCE ET COUPLE ABSORBÉS PAR LE SHREDDER EN SURCHARGE (À PIC) POUR UN TONNAGE DE 250TCH. ....	50
TABLEAU 4- 8 : PUISSANCE ET COUPLE ABSORBÉS PAR LE SHREDDER EN MARCHÉ NORMALE POUR UN TONNAGE DE 250TCH. ....	50
TABLEAU 4- 9 : TABLEAU DONNANT LES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DU MODÈLE À DÉBIT CONSTANT. ....	52
TABLEAU 4- 10 : PUISSANCE DU SHREDDER PAR LA FORMULE DE CRAWFORD. ....	54
TABLEAU 4- 11 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DE CALCUL DES PUISSANCES ABSORBÉES PAR LE SHREDDER. ....	55
TABLEAU 4- 12 : CALCUL DE LA PUISSANCE ABSORBÉE PAR LE MOULIN POUR LE TONNAGE DE 250TCH. ....	60
TABLEAU 4- 13 : RÉCAPITULATIF DU CALCUL DE LA PUISSANCE DU MOULIN. ....	61
TABLEAU 4- 14 : CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTS TYPES DE MOTEUR. ....	62
TABLEAU 5 - 1 : INVESTISSEMENT TOTAL POUR LE PROJET DU SHREDDER. ....	73
TABLEAU 5 - 2 : INVESTISSEMENT TOTAL POUR LE PROJET DU MOULIN. ....	74
TABLEAU 5 - 3 : PÉRIODE D'AMORTISSEMENT DES IMMOBILISATIONS. ....	74
TABLEAU 5 - 4 : AMORTISSEMENT DES INVESTISSEMENTS POUR LE SHREDDER. ....	75
TABLEAU 5 - 5 : AMORTISSEMENT DES INVESTISSEMENTS POUR LE MOULIN. ....	75
TABLEAU 5 - 6 : PRIX MOYEN D'UNE TONNE DE FUEL ET ÉQUIVALENCE TONNE FUEL ET TONNE DE VAPEUR. ....	76
TABLEAU 5 - 7 : COÛT MOYEN DE L'ÉNERGIE CONSOMMÉE PAR LE SHREDDER. ....	76
TABLEAU 5 - 8 : COÛT MOYEN DE L'ÉNERGIE CONSOMMÉE PAR LE MOULIN. ....	76
TABLEAU 5 - 9 : ÉCONOMIE DE COÛT DES PROJETS PAR AN. ....	77
TABLEAU 5 - 10 : CALCUL DES BÉNÉFICES NETS ANNUELS ET DU CASH FLOW ANNUEL POUR LE SHREDDER. ....	79
TABLEAU 5 - 11 : RÉSUMÉ DU CASH FLOW ANNUEL POUR LE SHREDDER. ....	79
TABLEAU 5 - 12 : VALEUR ACTUELLE NETTE DU PROJET DU SHREDDER. ....	80
TABLEAU 5 - 13 : CALCUL DES BÉNÉFICES NETS ANNUELS ET DU CASH FLOW ANNUEL POUR LE MOULIN. ....	80
TABLEAU 5 - 14 : RÉSUMÉ DU CASH FLOW ANNUEL ET DES CUMULS POUR LE SHREDDER. ....	81

TABLEAU 5 - 15 : VALEUR ACTUELLE NETTE DU PROJET DU MOULIN. ....	81
TABLEAU 5 - 16 : RÉSUMÉ SUR L'ÉTUDE FINANCIÈRE. ....	82

### Liste des Figures

FIGURE 1- 1 : CANNE À SUCRE. ....	5
FIGURE 1- 2 : CHAMPS DE CANNE À SUCRE. ....	6
FIGURE 1- 3 : PROCESSUS DE FABRICATION DE SUCRE À PARTIR DE LA CANNE. ....	8
FIGURE 1- 4 : ORGANIGRAMME DE LA COMPAGNIE SUCRIÈRE SÉNÉGALAISE. ....	10
FIGURE 2- 1 : CYLINDRE DE MOULIN ..... 14	14
FIGURE 2- 2 : SCHÉMA GLOBAL DU PROCESSUS DE BROYAGE. ....	14
FIGURE 2- 3 : SCHÉMA DE PRINCIPE ENTRAÎNEMENT SHREDDER. ....	17
FIGURE 2- 4 : PHOTO DU SHREDDER DE LA CSS ..... 17	17
FIGURE 2- 5 : LES COMPOSANTS SHREDDER. ....	19
FIGURE 2- 6 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SHREDDER. ....	21
FIGURE 2- 7 : SCHÉMA D'ENTRAÎNEMENT DU 6 <sup>E</sup> MOULIN. ....	26
FIGURE 3- 1 : SCHÉMA SYNOPTIQUE D'UN ENTRAÎNEMENT. ....	28
FIGURE 3- 2 : LES QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT. ....	30
FIGURE 3- 3 : TYPES DE CHARGE RÉSISTANTE. ....	32
FIGURE 3- 4 : SCHÉMA FONCTIONNEL D'UNE TRANSMISSION HYDROSTATIQUE ..... 35	35
FIGURE 4- 1 REPRÉSENTATION LA CHAÎNE CINÉMATIQUE D'ENTRAÎNEMENT DU CONDUCTEUR. ....	45
FIGURE 4- 2 : PUISSANCE DU MOULIN PAR LA MÉTHODE DE LA CHARGE HYDRAULIQUE. ....	59
FIGURE 4- 3 : SCHÉMA CYCLOCONVERTISSEUR. ....	67
FIGURE 4- 4 : CONVERTISSEUR DE FRÉQUENCE À COMMUTATEUR DE COURANT ASSISTÉ POUR MOTEUR ASYNCHRONE DE FORTE PUISSANCE. ....	68
FIGURE 4- 5 : SCHÉMA DE LA SOLUTION DE SUBSTITUTION DE L'ENTRAÎNEMENT DU MOULIN. ....	70
FIGURE 4- 6 : SCHÉMA DE LA SOLUTION DE SUBSTITUTION DE L'ENTRAÎNEMENT DU SHREDDER. ....	70

## Liste des symboles et des abréviations

- VAN	Valeur actuelle nette.
- TRI	Taux de rendement interne.
- TRC	Taux de rendement comptable.
- DRC	Délai de récupération du capital investi.
- tch	tonne de canne par heure.
- tfh	tonne de fibre par heure.
- A	travail de canne (t/h).
- P	puissance en kW ou en MW.
- C	Couple (m.daN)
- $N_s$	Vitesse de rotation entrée transmission conducteur de canne.
- $N_e$	vitesse tambour d'entraînement du conducteur de canne.
- N ou n	Vitesse de rotation en tour par minute, ou nombre d'année.
- V	Vitesse périphérique en mètre par minute.
- rpm	Rotation par minute ou tour par minute.
- t	Capacité du Shredder en 1 tour en kg.
- F	Charge hydraulique.
- r	Coefficient de survitesse.
- K	Charge ligneuse ou coefficient de calcul du couple résistant.
- $\varepsilon$	Ouverture du moulin.
- L	Longueur (m).
- l	Largeur (m).
- h	Enthalpie massique (kJ/kg).
- H	Hauteur (m).
- $Q_m$	Débit massique (t/h).

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Dans les sucreries, le service moulin occupe une place de premier plan dans le processus de production. Il fournit en effet : le jus de sucre destiné à la production du sucre, et la bagasse, servant de combustible pour les chaudières. Les principales fonctions qui sont réalisées au niveau de ce service sont : la fonction *Stockage* de cannes, la fonction *Transport* de cannes, la fonction *Préparation* de cannes pour le broyage, la fonction *Extraction* de jus de canne, et enfin la fonction *Filtration* du jus de sucre. Traditionnellement, l'entraînement et la commande des appareils moulins se font en utilisant une solution mécanique. Celle-ci est généralement composée de *turbine à vapeur*, couplée à une série de réducteurs de vitesse. Elle fournit la puissance nécessaire à l'entraînement, avec modification du couple et de la vitesse de rotation. Parmi ces appareils, deux nous intéressent particulièrement : le *Shredder*, dont le rôle est de défibrer la canne, réalisant ainsi la fonction préparation, et les *moulins* chargés d'extraire le jus de sucre contenu dans la canne.

L'exploitation et la maintenance des commandes mécaniques par turbine à vapeur posent souvent d'énormes problèmes tant techniques qu'économiques : canalisations encombrantes, démarrage difficile, régulation imparfaite, maintenance spécialisée fréquente, consommation non maîtrisée etc. De plus, ces appareils sont amortis à 90% ; d'où leurs états de vétusté. Il se pose donc le problème du renouvellement des appareils d'entraînement et des technologies de commande. La question est de savoir s'il est envisageable, aujourd'hui, par rapport à l'avancement des technologies d'entraînement et de commandes notamment avec le développement de l'électronique de puissance et la naissance de nouvelles générations de convertisseurs statiques, d'utiliser encore des commandes mécaniques sur ces machines .

## Introduction générale

Depuis une dizaine d'années, la Compagnie Sucrière Sénégalaise (C.S.S), envisage une étude pour le remplacement de la solution de commande mécanique par une commande électrique, ou hydraulique. C'est ainsi qu'à la fin de notre stage de maîtrise passé au niveau de celle-ci et plus particulièrement au service moulin, l'idée de mettre cette réflexion en projet est née.

Ainsi, ce présent travail entre dans le cadre des projets de fin d'études du second cycle pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de Conception. Le sujet s'intitule : **Etude technico-économique des systèmes d'entraînement pour la commande du Shredder et du 6<sup>e</sup> moulin**. Dans ce travail, deux objectifs ont été fixés.

- Le premier objectif étant de faire, dans un premier temps l'état des lieux sur les technologies des machines utilisées pour l'entraînement du Shredder et du moulin en vue d'en faire le meilleur choix, et par la suite au dimensionnement des composants de substitution.
- Le deuxième objectif étant d'évaluer la rentabilité de la solution de substitution par rapport à la solution actuelle.

Ainsi, le travail est divisé en cinq grandes parties : Dans la première partie nous ferons découvrir à nos lecteurs et lectrices les sucrières d'une manière générale et aussi de leur présenter la société hôte à savoir la CSS. Dans la deuxième partie, une description sera faite sur le Shredder, et le moulin. La troisième partie nous permettra de faire un rappel sur les techniques d'entraînement qui sera suivi du dimensionnement des moteurs de substitution à la quatrième partie. Enfin, la cinquième concerne l'étude économique visant à calculer les coûts de changement de technologies. Dans cette dernière partie, nous utiliserons l'analyse différentielle comme démarche d'évaluation de la rentabilité de ce projet.

Les critères utilisés seront : la valeur actuelle nette et le taux de rendement externe.

# CHAPITRE 1 : A LA DÉCOUVERTE DES SUCRERIES

---

## 1.1. Généralités sur la canne à sucre et les sucreries

### 1.1.1. Introduction

Ce projet porte essentiellement, comme dit dans l'introduction générale sur une étude technico-économique pour le remplacement des commandes mécaniques actuelles.

Cette première partie, permettra au lecteur de comprendre les sucreries et la canne à sucre d'une manière générale. En effet, nous allons faire l'historique sur les sucres, puis une description du processus d'obtention du sucre à partir de la canne à sucre. Enfin, nous terminerons par la présentation de la société hôte.

### 1.1.2. Histoire de la canne à sucre

La canne à sucre est connue depuis la préhistoire (néolithique), et serait originaire de Nouvelle-Guinée ou d'Indochine. Sa culture s'est progressivement étendue aux îles avoisinantes, puis a gagné l'Inde et la Chine. L'extraction de sucre de canne est attestée en Chine environ six siècles avant Jésus-Christ. C'est l'expédition d'Alexandre le Grand jusqu'à l'Indus aux alentours de -325 qui la fit connaître pour la première fois aux Européens, on en retrouve la trace dans les écrits de Néarque. Elle fut importée en Perse vers le VI<sup>e</sup> siècle. À partir du VII<sup>e</sup> siècle, les Arabes l'introduisirent depuis la Perse dans l'ensemble des territoires qu'ils occupèrent, notamment à Chypre, en Crète, et jusqu'en Mexique au cours du VIII<sup>e</sup> siècle. L'exploitation de ces grandes plantations est réalisée par des esclaves, mode de production qui persistera jusqu'à l'abolition de l'esclavage. L'Occident va redécouvrir le sucre avec les croisades : la première apparition du mot en français date du XII<sup>e</sup> siècle, chez Chrétien de Troyes, et il est emprunté à l'arabe.

## Généralités

---

Ce produit reste dans un premier temps en Europe vendu par les apothicaires (d'où il tire son nom latin *Saccharum officinarum*).

À partir du XIII<sup>e</sup> siècle, l'intensification du commerce ; le goût du luxe et l'ascension de la nouvelle classe bourgeoise dans les villes ; répand son usage.

Ce sont les villes marchandes italiennes, Venise et Gênes en premier, qui se livrent à ce fructueux commerce avec l'Orient. Le sucre y est acheté dans les comptoirs du Levant mais les commerçants italiens implantent aussi des colonies de plantation sur les bords de la mer Noire et dans les îles méditerranéennes.

La prise de Constantinople par les Turcs donne un coup d'arrêt au commerce avec la mer Noire et les villes italiennes se tournent alors vers d'autres centres de production et d'approvisionnement : la canne déjà cultivée dans les possessions méditerranéennes, Îles Baléares, Sud de l'Mexique et du Mexique est introduite dans les Nouvelles Îles atlantiques récemment découvertes (Îles Canaries) puis dans les conquêtes des Indes occidentales.

La canne à sucre fut introduite dans les Antilles par Christophe Colomb lors de son second voyage en 1493 où grâce au climat favorable sa culture a rapidement prospéré. Cette culture qui nécessite une abondante main d'œuvre a alimenté le trafic des esclaves en provenance d'Afrique puis, une fois l'abolition de l'esclavage prononcée, le recours à l'engagisme.

La propagation de la canne, qui se fait très facilement par boutures, atteint rapidement toute l'Amérique centrale, notamment Saint-Domingue, Cuba, le Mexique et la Louisiane. Tous les clones initialement introduits provenaient du bassin méditerranéen, mais au cours du XIX<sup>e</sup> siècle de nouvelles introductions ont été faites depuis Tahiti et Java. La fameuse expédition du *Bounty* commandée par le capitaine Bligh en 1787-1789 avait pour objectif de rapporter de Tahiti jusqu'à la Jamaïque des boutures de canne à sucre et d'arbre à pain.

Au XVII<sup>e</sup> siècle, la culture de la canne est généralisée dans les colonies françaises. Montesquieu, dans *De l'esprit des lois*, justifie avec sarcasme l'utilisation des esclaves par : « Le sucre serait trop cher, si l'on ne faisait cultiver la plante par des esclaves. »

La révolution française perturba le transport maritime du sucre issu de la canne avec les colonies. Puis au début du XIX<sup>e</sup> siècle, le Blocus continental instauré par l'empire napoléonien contre l'Angleterre provoqua une flambée des prix. Le sucre de betterave fut alors développé et concurrence depuis la canne à sucre. Aujourd'hui, elle est cultivée dans tous les pays tropicaux ou tempérés chauds.

### 1.1.3. Description canne à sucre

La canne à sucre est un ensemble d'espèces de plantes de la famille des Poaceae et du genre *Saccharum*. Elle est cultivée pour ses tiges, dont on extrait du sucre. Avec un volume annuel de production supérieur à 1,6 milliards de tonnes (selon la FAO en 2008), c'est la première plante cultivée au plan mondial avec près de 23% de la masse totale produite en agriculture dans le monde. Elle fut jusqu'au début du XIXe siècle la seule source importante de sucre et représente toujours actuellement 65 à 70% de la production de sucre.

La canne à sucre est une grande graminée tropicale herbacée à port de roseau, d'une hauteur allant de 2,5 à 6 mètres. Les tiges, d'un diamètre de 1,5 à 6 cm, sont pleines. Les feuilles, alternes, sont réparties en deux files opposées et ont un limbe de 1 m de long environ sur 2 à 10 cm de large. Elles sont au nombre de dix sur les plantes en pleine croissance, la partie inférieure de la tige se dénudant au fur et à mesure que les feuilles basses se dessèchent



Figure 1- 1 : Canne à sucre.

L'inflorescence est une panicule terminale de cinquante centimètres à un mètre de long. En culture, la canne est généralement coupée avant floraison. C'est une plante vivace par sa souche rhizomateuse.

Les principaux constituants de la canne à sucre sont le sucre et les fibres. Au suivant la Composition moyenne de la canne à sucre est présentée. Selon l'état de maturité de la plante, La teneur en fibre peut varier de 10 % à 18 %, la quantité d'eau de 72 % à 77 % et le Saccharose de 12 % à 16 %.

Après extraction, une tonne de canne produite environ 250 à 300 kg de débris, soit entre 25 % et 30 % de la matière première.

Tableau 1- 1 : Composition moyenne de la canne à sucre.

Composition	Pourcentage (%)
Eau	70
Fibres Ligneuses	14
Saccharose	14
Impuretés	2
Total	100

#### 1.1.4. Culture

L'aire de culture de la canne à sucre s'étend de 35° de latitude nord à 30° de latitude sud. La multiplication se fait par boutures. Ces boutures sont des morceaux de cannes de 30 centimètres de long environ portant plusieurs nœuds avec des bourgeons bien constitués. La récolte intervient au bout de onze mois après la plantation, avant la floraison.

Les cannes sont coupées au ras du sol, la concentration en sucre étant maximale dans la partie basse de la tige. La partie supérieure est éliminée sur le champ (on peut y tailler des boutures), ainsi que les feuilles. Les souches émettant de nouvelles tiges, une seconde récolte est possible au bout d'un an, voire une troisième, mais la teneur en sucre a tendance à diminuer.



Figure 1- 2 : Champs de canne à sucre.

#### 1.1.5. Processus de fabrication du sucre de canne

La figure 1.1 (à la deuxième page suivante) donne le processus d'obtention du sucre à partir de la canne. Elle est récoltée, sous forme de tronçons de tiges, est transportée dans une unité de transformation, le plus souvent une sucrerie, pour être traitée. Pour extraire et concentrer ce sucre, la canne doit être soumise à un traitement qui s'est complexifié avec les années. Aujourd'hui, le processus s'est grandement mécanisé et permet d'obtenir un produit d'une grande pureté. Voici les principales opérations pour extraire le sucre de la canne :

## Généralités

- *Préparation* : d'abord, les cannes sont déchiquetées mécaniquement afin de faciliter le broyage.
- *Extraction* : Le jus est extrait par broyage ou par diffusion. Dans le cas du broyage, on utilise des moulins dits « conventionnels » ou des Mill Max. Dans le cas de la diffusion, on opère par lixiviation.
- *Clarification* : le vesou qui contient un grand nombre d'impuretés est épuré par tamisage, par chauffage et par ajout de chaux (chaulage).
- *Évaporation* : le jus clair est chauffé à différentes températures dans des évaporateurs à pression réduite. L'eau s'élimine sous forme de vapeur et on obtient le sirop.
- *Cristallisation* : dans des chaudières, le sirop est chauffé à 55 °C et à pression réduite. Il se transforme en masse pâteuse, la masse cuite qui renferme des cristaux de sucre et un liquide visqueux appelé liqueur mère.
- *Malaxage Turbinage* : la masse cuite est malaxée et turbinée dans une centrifugeuse afin de séparer les cristaux de sucre et le sirop d'égout. On obtient le sucre de premier jet.
- *Première reprise des égouts* : les sirops d'égout sont malaxés et turbinés à nouveau pour obtenir le sucre de deuxième jet.
- *Deuxième reprise des égouts* : les sirops d'égout sont malaxés et turbinés une seconde fois. On obtient le sucre de troisième jet et la mélasse. Le sucre de troisième jet peut être refondu pour être mélangé en premier jet.
- *Séchage* : les cristaux de sucre sont séchés.
- *Emballage* : les cristaux de sucre sont finalement mis dans des sacs. Dans les pays producteurs, le sucre roux obtenu est souvent vendu et consommé tel quel. Pour obtenir le sucre blanc, le sucre roux doit subir une série d'opérations de raffinage en usine.

Etude technico-économique des systèmes d'entraînement pour la commande du Shredder et du 6e moulin de la C.S.S.

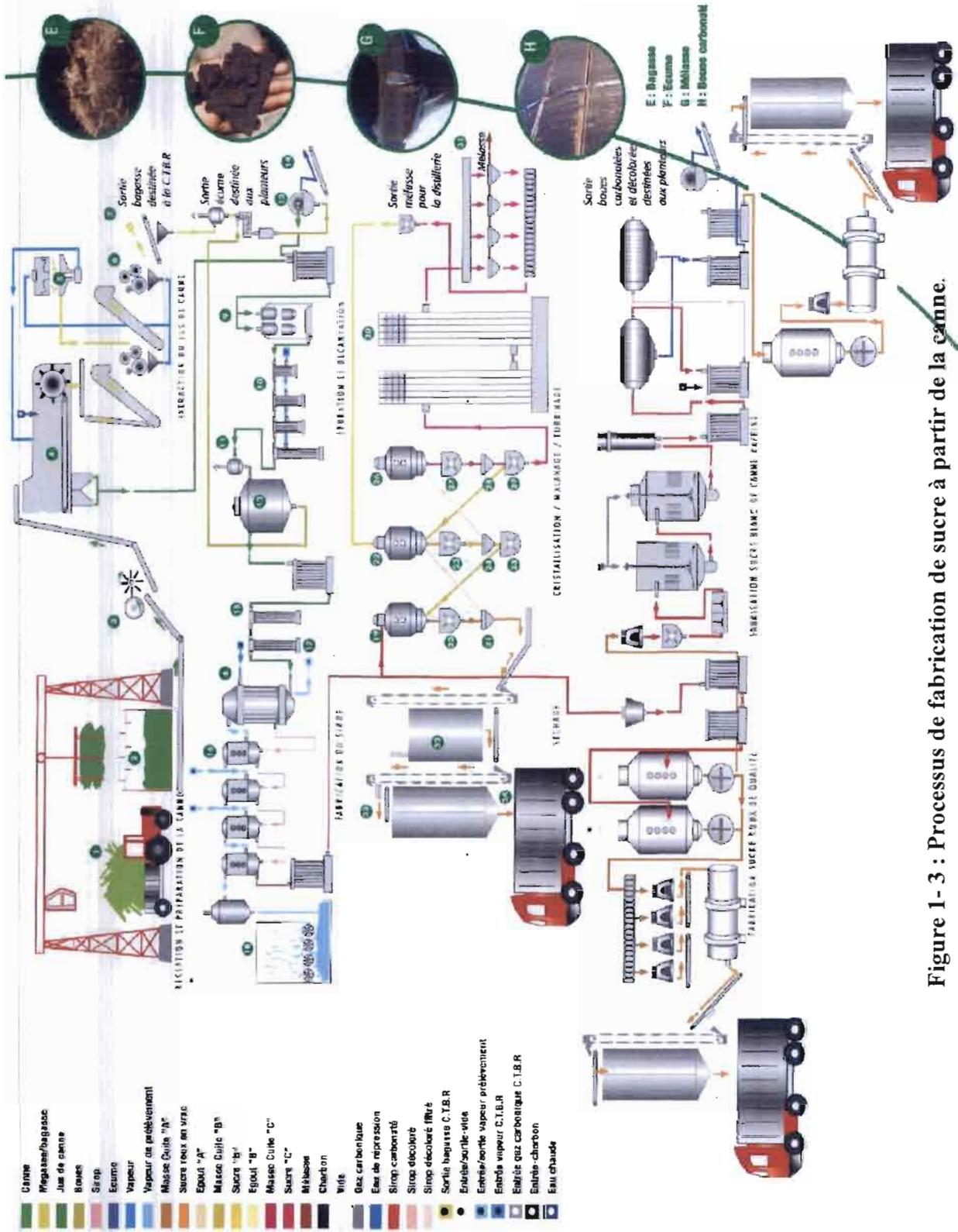


Figure 1- 3 : Processus de fabrication de sucre à partir de la canne.

### **1.1.6. Aspects économiques**

Plus de cent pays sur 130 000 km<sup>2</sup> en font pousser. Les vingt premiers ont récolté 1 218 millions de tonnes en 2003, soit 91% du total. Les plus gros producteurs sont le Brésil, l'Inde et la Chine. En Afrique, l'Afrique du sud (20 millions de tonnes par an) est le premier pays producteur, suivi de l'Égypte (plus de 16 millions de tonnes par an). en Afrique de l'ouest on trouve, le Sénégal, le Cameroun, la Côte-D'ivoire, le Gabon dans la filière

## **1.2. La Compagnie Sucrière Sénégalaise**

### **1.2.1. Historique de la CSS**

La C.S.S, a été lancée au début des années 70, grâce à l'audacieux projet de Monsieur Jacques MIMRAN, alors à la tête d'un important groupe agroalimentaire implanté au Maroc, à Dakar et à Abidjan. Son idée de créer une exploitation agricole de canne à sucre aux portes du désert, dans le Nord du Sénégal, était un incroyable défi où dans cette zone, la pluviométrie est faible et les terres bordant le Fleuve Sénégal sont réputées salées et acides. Les résultats concluants des études réalisées ont convaincu quelques hommes d'affaires de la faisabilité du projet, pourtant taxé jadis, de canne à sel par ses détracteurs. Monsieur Jacques MIMRAN, homme d'affaires français hérita du projet en 1971 et, ainsi l'histoire de la Compagnie Sucrière Sénégalaise est née.

### **1.2.2. Présentation de la CSS**

La Compagnie Sucrière Sénégalaise est une Société anonyme sénégalaise au capital de 14.6 Milliards Francs CFA. Son Siège Social et l'Usine sont situés à Richard-Toll, à 400 km de Dakar au nord du pays, dans la région de Saint Louis. Avec une capacité de 1 million de tonnes de canne à sucre, selon les rendements agricoles actuels, et de 100.000 tonnes de sucre par an qui a généré un chiffre d'affaires de 60 milliards de FCFA en 2006, la C.S.S continue à accroître sa capacité de production lui conférant ainsi une position de leader dans l'industrie sucrière en Afrique de l'Ouest. La compagnie compte en 2007 : 5800 employés (dont 2700 permanents) pour une masse salariale de plus de 12 milliards par an (y compris les charges). L'ensemble industriel regroupe notamment une unité de broyage de cannes, une sucrerie, une raffinerie, une Agglomération et une distillerie pour la production d'Éthanol.

### 1.2.3. Organigramme de la C.S.S.

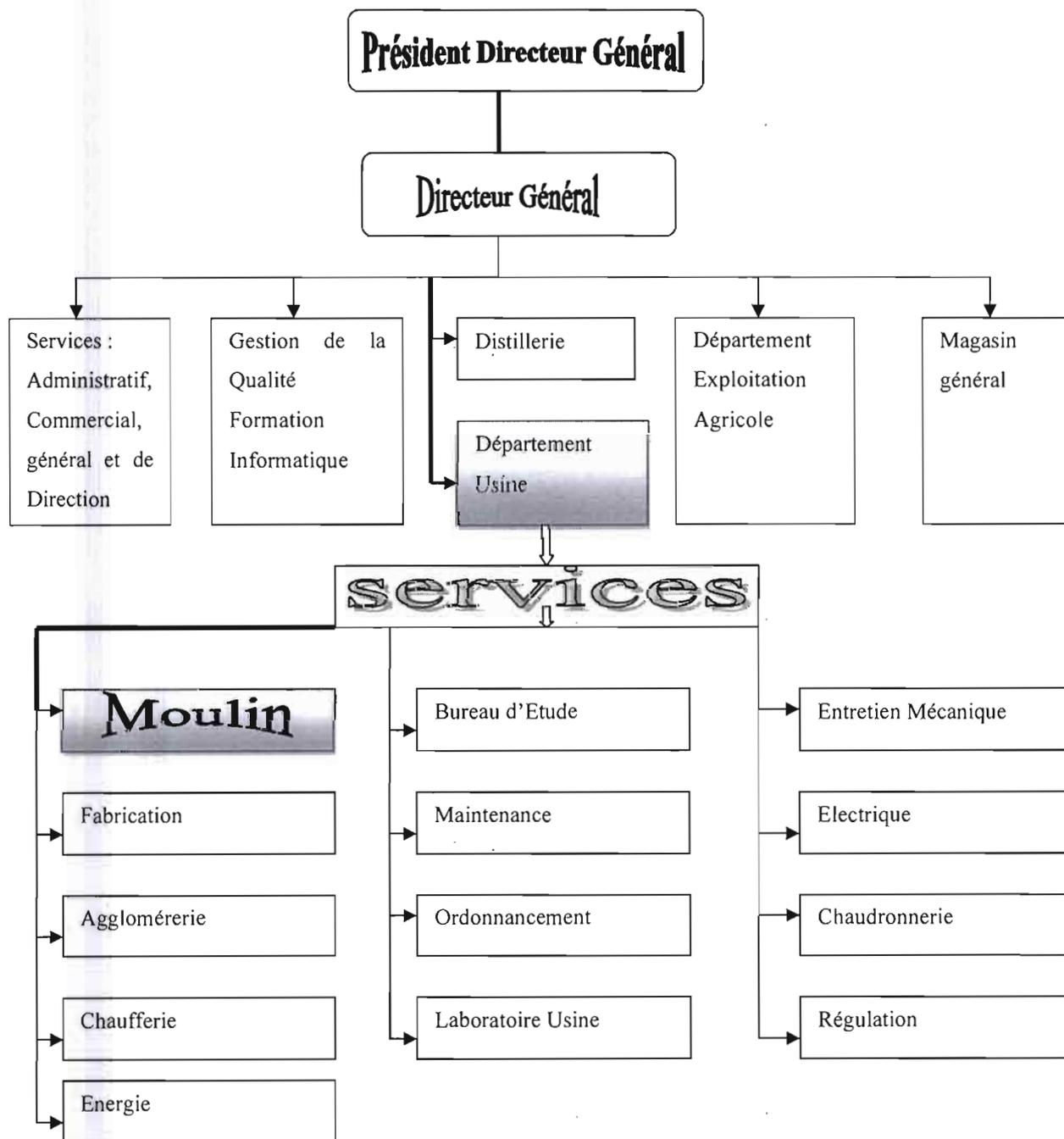


Figure 1- 4 : Organigramme de la Compagnie Sucrière Sénégalaise

### **1.3. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait un rappel sur l'historique de la canne à sucre et des sucreries. Nous avons aussi décrit le processus de fabrication du sucre de canne. Enfin, Nous avons terminé par la présentation de la compagnie sucrière sénégalaise (CSS) ou s'est déroulé ce travail.

Par ailleurs, ce chapitre a permis de mesurer l'importance la CSS dans le tissu industriel du Sénégal. En effet, en Gestion de la Production, on apprend que, depuis l'antiquité, la richesse d'une nation a toujours été déterminée en premier lieu par la capacité qu'a cette nation de produire (ou créer) des objets ayant une certaine utilité. Ainsi Adam Smith écrivait au XVIIème siècle dans Wealth of Nations que "la richesse provient de la production". Ainsi, nous pensons que la Compagnie Sucrière Sénégalaise participe pleinement à la richesse du Sénégal.

# CHAPITRE 2 : DESCRIPTION TECHNIQUE DES INSTALLATIONS DU SERVICE MOULIN

---

## 2.1. Introduction

Dans cette partie nous abordons une présentation détaillée du service où se déroule le travail c'est-à-dire le service moulin. Cette description permet de comprendre globalement le processus de broyage de la canne et d'extraction du jus. Par la suite, nous ferons la description du Shredder et du moulin, ainsi que leur commande.

### 2.1.1. Généralités et présentation du service moulin

Le service moulin est le lieu où se fait *le broyage l'extraction* du jus à partir de la canne venant des champs. Le schéma global du processus de broyage de canne et d'extraction du jus est schématisé sur la figure 2-1.

A partir des champs cultivés aux alentours de Richard Toll (ville et villages environnants) et à Richard Toll, la canne, prêt pour la récolte, est mise en feu, coupée par des coupeurs de cannes, et acheminée vers l'usine par des camions transporteurs de canne. Les camions chargés, sont pesés à l'entrée de l'usine. De là, ils sont déchargés sur les TABLES A CANNE et dans la cour à canne par les ponts bascules mobiles ou fixes, se situant à l'extérieur du dit bâtiment. Les tables à cannes sont contrôlées par un agent de conduite.

Venant du conducteur à canne (un couloir ; de base des profils IPE, soutenus par des profils IPE, sur lequel on met une chaîne animée d'un mouvement de translation rotative), la canne se dirige vers le bâtiment moulins, rencontrant tour à tour sur son passage : **Niveleur**, **Bourreur**, et enfin, **Shredder** (voir figure). À sa sortie du Shredder, la canne est transportée par le transporteur de canne puis vers les moulins. Elle rencontre sur son passage le niveleur du transporteur et le séparateur magnétique (non représentés), pour débarrasser la bagasse des morceaux de métaux. Enfin la bagasse entre dans le premier moulin. Celui-ci est chargé de broyer la canne, quittant le Shredder ; ou de la bagasse intermédiaire quittant un moulin amont, pour presser le jus contenu dans celle-ci.

### Généralités et présentation du service moulin

---

Au sortir du premier moulin, le jus est récupéré dans un bac, quant à la bagasse, elle est envoyée au deuxième moulin par le transporteur intermédiaire. Le même processus se passe 2 au 6<sup>e</sup> moulin. Cependant, le jus sortant du 2<sup>ième</sup> moulin est mélangé avec celui du 1<sup>er</sup> moulin, filtré avant d'être envoyée vers la sucrerie, celui sortant de chacun des autres moulins sert d'imbibition au moulin qui le précède. Notons par ailleurs que les résidus de fine bagasse récupérées au niveau du filtre tamiseur, rejoint la bagasse intermédiaire sortant du premier moulin à l'aide de la vis d'Archimède.

A la sortie du 6<sup>e</sup> moulin la bagasse est envoyée directement à la chaudière, par l'intermédiaire du transporteur de bagasse, pour servir de combustible aux chaudières. C'est pour cette raison qu'elle doit être bien sèche pour une bonne combustion. La vapeur produite par les chaudières permet d'entraîner les turbines de commande.

Nous présentations dans la page suivante le schéma global du processus de broyage de la canne et d'extraction de jus.



Figure 2- 1 : Cylindre de Moulin

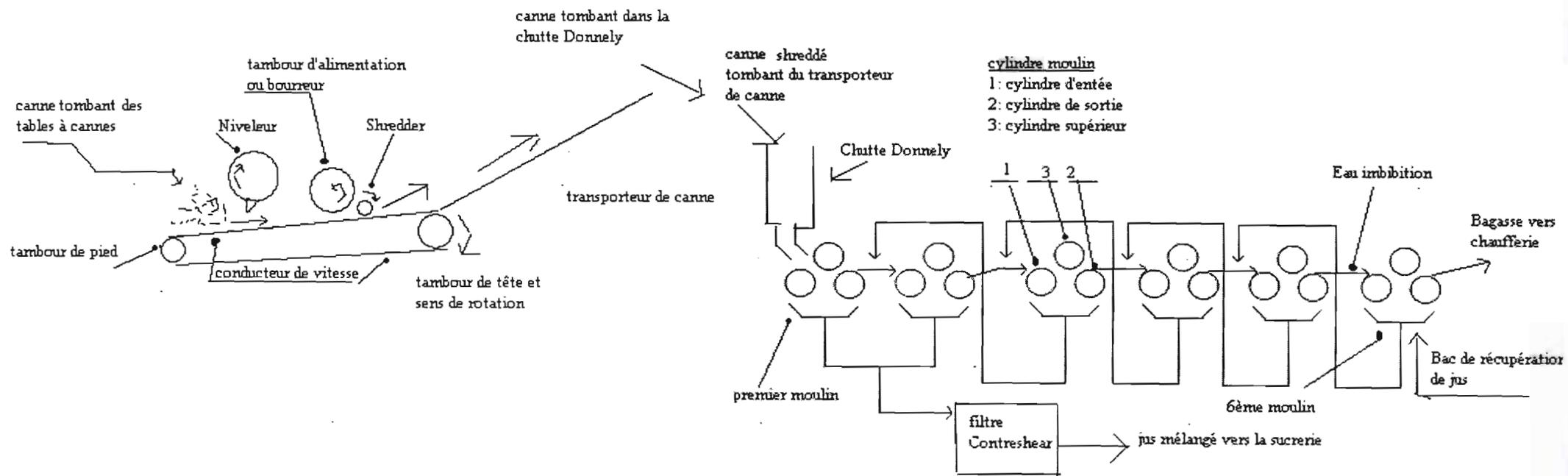


Figure 2- 2 : schéma global du processus de broyage

### **2.1.2. Étude de la partie préparation de canne**

La préparation de la canne joue un rôle important dans tout travail de canne. L'efficacité de tout moulin se mesure par le tonnage et plus particulièrement par le pourcentage d'extraction de la canne. La préparation a pour principal objectif de faciliter le travail des Moulins. La canne à l'état brute est très résistante. Pour pouvoir presser la canne pour faire ressortir le jus, la canne doit arriver au moulin à l'état de fibre, de ce fait les moulins pourront facilement faire leur travail

Dans toute sucrerie la préparation occupe une place de premier plan. Et la première partie de ce chapitre est consacrée à la description des appareils de préparation plus particulièrement le Shredder. Cette description nous aidera dans les prochains chapitres au moment du dimensionnement de la solution de substitution.

### **2.1.3. Machines de préparation de la canne**

Les machines de préparation de canne sont généralement des broyeurs ou des tronçonneuses. On distingue deux principales machines : les coupe cannes et les Shredders. Les coupe canne sont les premières générations de machine de préparation ; et les Shredder les dernières. Les différentes associations possibles sont :

- 1 coupe cannes à large pas ;
- 2coupe-cannes à large pas ;
- 1coupe-cannes à pas serré ;
- 2coupe-cannes, 1er à large pas, 2<sup>nd</sup> à pas serre ;
- 2 coupe-cannes et 1 Shredder ;
- Shredder seul.

### **2.1.4. Indice de préparation**

On mesure l'état de désintégration de la canne par « l'indice de rupture » appeler en anglais (« displaceability in dex » = D.I.), c'est-à-dire le % de Pol dans les cellules ouvertes , ou « l'indice de préparation » = I.P. En déterminant au laboratoire la proportion de Pol libre obtainable à froid par rapport au saccharose total obtenu à chaud ou par broyage à froid à 100%.

La valeur de l'indice de préparation est de 65 à 70% d'IP c'est-à-dire de cellules ouvertes après les coupes cannes. Après un Shredder classique elle varie de 78 à 85 %. Tandis

que, après un Shredder grande puissance, elle varie de 86 à 92 %. Exceptionnellement on peut atteindre 94-95 %.

A cause de sa grande valeur d'indice de préparation, le Shredder constitue pratiquement aujourd'hui, la seule machine utilisée pour la préparation.

## 2.2. Description du Shredder du service Moulin de la CSS

### 2.2.1 Mise en situation (voir figure 2-1)

Le système étudié dans cette première partie est constitué du *Shredder* proprement dit, de son groupe d'entraînement et du système d'alimentation d'énergie (vapeur).

Parmi les types de Shredder, on peut citer :

- a) le Shredder Searby, répandu surtout aux Hawaï et dans les territoires britanniques, ayant beaucoup de marteaux qui sont de petites barres rectangulaires
- b) le Shredder Gruendler, qui a des marteaux moins nombreux et plus lourds ;
- c) Le shredder type Sullivan;
- d) Shredder Tongaat;
- e) Shredder type F.C.B. (CSS).

Le schéma suivant situe également le Shredder et sa commande par rapport à la chaîne au niveau du service moulin.

Le Shredder constitue à vide (rotation sans broyage de canne), la charge entraînée par la machine motrice et en charge, il forme avec la canne entraînée la charge. La maîtrise parfaite des composants et du mode de fonctionnement du Shredder nous permettra de bien dimensionner notre machine motrice

Description du Shredder et de l'ensemble commande

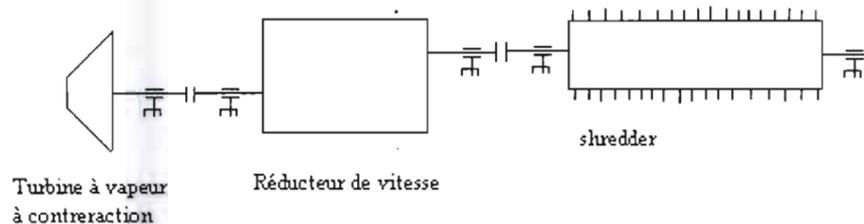


Figure 2- 3 : Schéma de principe entraînement Shredder.



Figure 2- 4 : photo du Shredder de la CSS

### 2.2.2. Fonction du Shredder

Le Shredder est un appareil destiné à la préparation de la canne avant broyage au niveau des moulins, en éclatant les fibres de la canne ; il permet un travail plus efficace des moulins en facilitant l'extraction du jus. Son nom lui vient du verbe anglais « to shred » qui signifie : couper en petits morceaux, déchiqueter, mettre en lambeaux. La nomenclature française est d'ailleurs plutôt malheureuse pour ce qui concerne la préparation de la canne, car l'appareil qu'on appelle « défibreur » a plutôt un effet de broyage et c'est au contraire le Shredder qui produit un effet de défibrage.

Le Shredder doit son existence et son utilité au fait que le tissu des membranes des cellules de la canne est très résistant : le simple écrasement entre les cylindres, même sous très forte pression, ne suffit pas pour faire éclater toutes les cellules et en extraire le jus. Par contre, si l'on réussit à défibrer et désintégrer les cellules, le travail d'extraction du jus par le moulin devient très aisé. Pour obtenir un tel effet, il faut déchirer les tissus, et cela s'obtient en forçant les morceaux de canne à passer dans un espace très étroit, en les bloquant d'un côté et en les frappant de l'autre en déployant une grande puissance de frappe. C'est le broyeur à marteaux qu'on a choisi dans ce but. On lui a laissé en sucrerie son nom anglais de « Shredder ».

Le tissu de la canne étant fait de longues fibres et de pulpe, la matière obtenue à la sortie du Shredder est une masse de cellules tendres ou de moelle mélangée à de longues fibres filiformes qui feutrent l'ensemble et contribuent à l'entraîner lorsqu'il parvient dans la prise des cylindres de moulins.

Le Shredder remplit donc un rôle que ni les coupe cannes ni les moulins ne peuvent jouer. Il établit en même temps un état de division de la canne qui facilite grandement le travail des moulins.

### 2.2.3. *Les composants du Shredder (voir figure 2.5)*

Le Shredder de préparation est du type Sullivan fabriqué par la société FCB. Le Shredder proprement dit compris entre deux flancs latéraux renforcés, formant carter se compose d'un rotor (association de plusieurs pièces) et d'une *enclume*.

Le rotor : il constitue la partie tournante du Shredder. Il est composé de :

- 1) *L'arbre central* sur lequel sont, empilés les disques supports ;
- 2) *Les disques support marteaux* : nombre de disques 36 ;
- 3) *Les tirants de serrage* et de fixation des disques support marteaux ;
- 4) *De marteaux* : nombre de marteaux 108 (3 marteaux par disque) ;
- 5) *Les axes d'articulations* des marteaux (6 axes) ;
- 6) *Deux flancs circulaires latéraux renforcés* ;

Le rotor est monté sur deux paliers à roulement sur rotules, lubrifiés à l'huile à partir de la centrale de lubrification

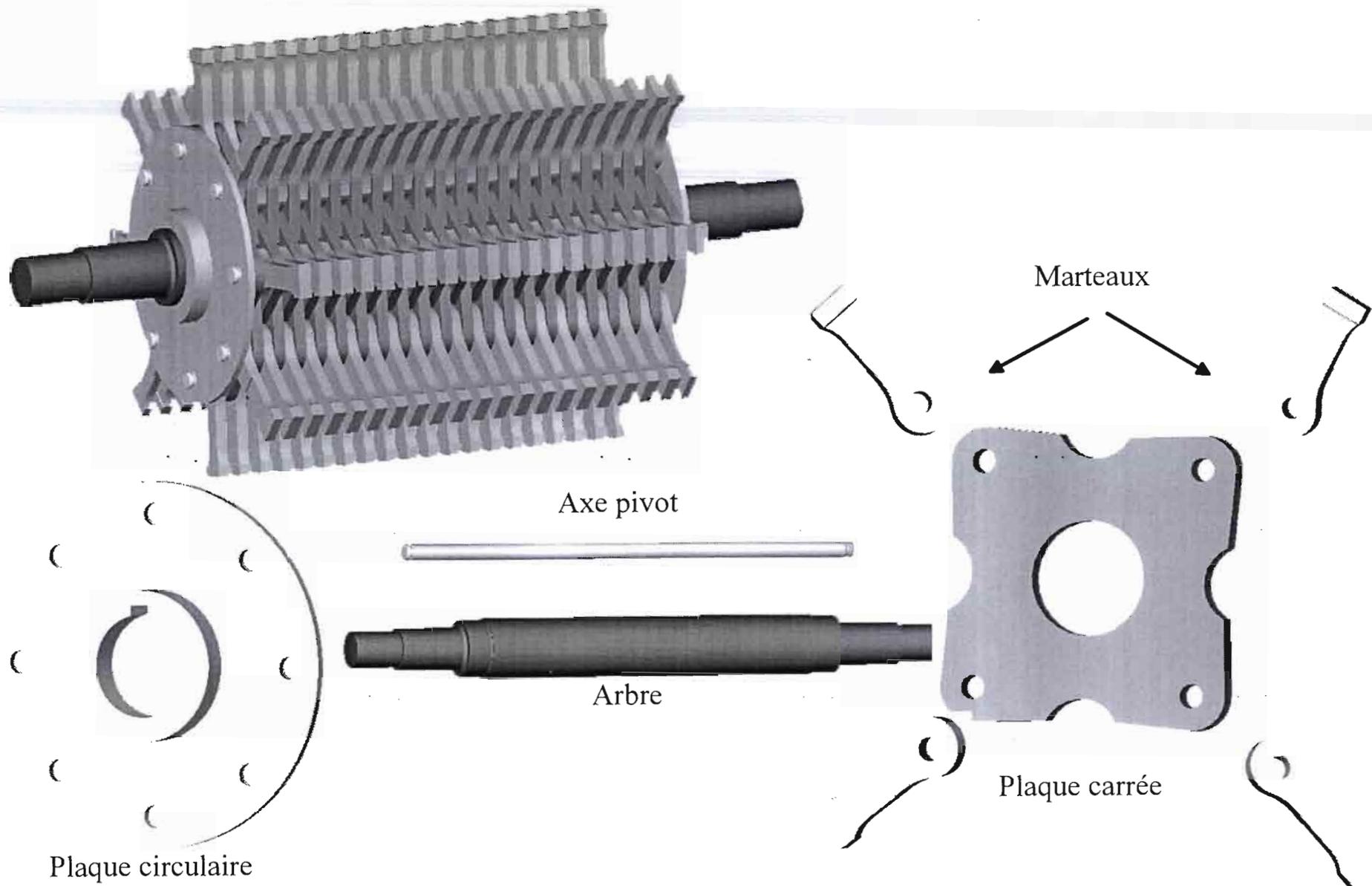


Figure 2- 5 : Les composants Shredder.

#### 2.2.4. *Principe de fonctionnement du Shredder type FCB de la CSS*

Le principe de fonctionnement tel que décrit à la figure 2.5 de la page suivante, se présente comme suit l'épaisseur du lit de canne sur le transporteur (conducteur persienne) est ramenée à 1000 mm par un *NIVELEUR*, situé en amont du Shredder. Le lit de canne est ensuite pincé entre le tablier du *conducteur de canne* et le *TAMBOUR D'ALIMENTATION* (communément appelé Bourreur) qui assure une alimentation positive et continue du rotor du Shredder. Le rotor contrarotatif relève le lit de canne qui est, une première fois, coupé à longueur entre les marteaux et les barres de traction du tambour d'alimentation avant de passer sous la pièce d'entrée, d'enclume. Les cannes sont ensuite fibrillées aux passages successifs des poches et des barres d'enclume dont l'espace vis à vis du diamètre décrit par les marteaux, diminue progressivement. La canne ainsi déchiquetée est alors projetée sur le tablier (transporteur à bande) en une couche dense.

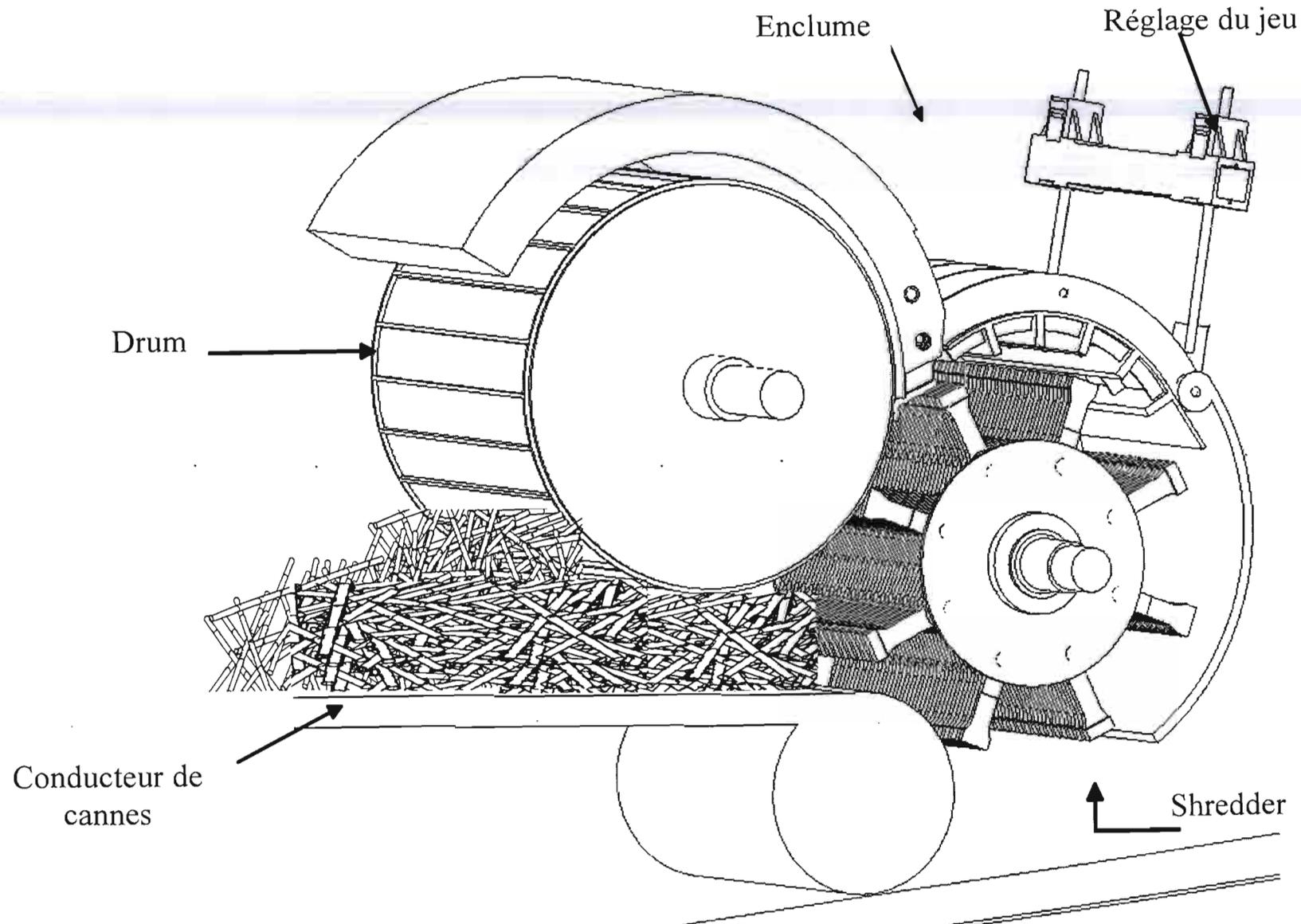


Figure 2- 6 : Principe de fonctionnement du Shredder.

### 2.3. Caractéristiques et performance du Shredder

La capacité de broyage du Shredder installé est de 300 tonnes de cannes par heures, d'où une capacité journalière de 7200 tonnes de cannes broyées. Le taux de fibre (ligneux de canne) varie entre 16 et 18 %. Ses dimensions principales sont : 2000x1680.

Le calcul du moment d'inertie total du Shredder est nécessaire. Il permet une meilleure maîtrise des paramètres de fonctionnement de celui-ci.

Nous présentons ci-dessous les méthodes et les formules de calcul des moments d'inertie des composants du Shredder.

- Les moments d'inertie des marteaux, assimilés à petites barres parallélépipédiques de dimensions : 150x450x50, par rapport à leur centre d'inertie, se calculent par la formule :

$$I = M \times \frac{(a^2 + b^2)}{12} \quad (2.1)$$

L'application du théorème de Huygens donne ces moments par rapport à l'axe du rotor.

- Pour ce qui des flâncs latéraux, ils sont considérés comme des plaques circulaires (rayon de 585mm et épaisseur de 30mm). Le moment d'inertie par rapport à son axe se calcul par la formule :

$$I = M \frac{R^2}{2} \quad (2.2)$$

- Le moment d'inertie des disques supports marteaux par rapport à l'axe du rotor, a été calculé avec le logiciel Solidworks. (forme hexagonale, dimensions consécutives : 2600mm et 880mm, épaisseur : 30mm, hauteur 1170mm)
- Le moment d'inertie de l'arbre central (diamètre 245mm et longueur 2500mm) a été calculé en utilisant la formule 2.2

Le Shredder étant en acier, la masse volumique de toutes ses pièces est égale à 7800kg/m<sup>3</sup>.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 2- 1 : Récapitulatif du calcul des moments d'inertie.**

<i>pièces</i>	<i>Moment d'inertie par rapport à l'axe du rotor (en kg.m<sup>2</sup>)</i>
L'arbre central	10,48 x 1
Disques support marteaux (36)	22,86 x 36
Marteaux (108)	15 x 108
Flancs latéraux (2)	43 x 2
<i>Moment d'inertie total</i>	<i>2540</i>

#### **2.4. Description technique de la turbine d'entraînement du Shredder**

La turbine installée est du type multi étagée, à contre-pression, c'est-à-dire la pression d'échappement est égale ou plus grande que la pression atmosphérique.

Une turbine à action transforme l'énergie calorifique de la vapeur qui lui est fournie en travail utilisable sur l'arbre. Cette transformation n'est cependant pas faite directement, l'énergie calorifique étant tout d'abord convertie en énergie cinétique par détente de la vapeur, dans un aubage, d'une pression à une autre plus faible. Il en résulte un jet de vapeur sortant de l'aubage à une très grande vitesse. Cet aubage, de par sa construction, dirige la vapeur de telle sorte qu'elle attaque celui de la roue sous un angle convenable permettant d'obtenir le meilleur rendement possible.

Un étage Curtis contient deux rangées d'ailettes sur deux roues. Un aubage redresseur est placé entre les deux rangées d'ailettes mobiles, de sorte que la vapeur à la sortie de la première rangée soit redressée pour permettre son passage dans la deuxième rangée d'ailettes avec la direction convenable

Les spécifications techniques de la turbine du Shredder sont données ci-dessous :

- Marque: WORTHINGTON TURBO-DYNE.
- type: S6;
- puissance : 2 700kw ;

### Description du Shredder et de l'ensemble commande

- vitesse : 6000 tr/min ;
- pression vapeur admission. : 39 bars abs ;
- température vapeur admission. : 390 °C ;
- pression vapeur échappement. : 2.5 Bars abs ;
- sens de rotation : à droite vue du régulateur ;
- commande : mcu 3370 n°série B.I 043 964 ;
- commande Worthington : 70/37 982 ;
- clapet admission : HP 5 ' ' taille 3'' ¼ Double siège ;
- déclenchement survitesse : 6600 rpm ;
- vitesse critique1 : 3215 rpm.

## 2.5. Description du 6e moulin

L'entraînement du 6<sup>e</sup> moulin est décrit sur la figure 2.6. Le moulin constitue l'appareil chargé de l'extraction du jus à partir de la canne Shredder .Un moulin est composé :

- o d'un cylindre supérieur ;
- o d'un cylindre de sortie ;
- o d'un cylindre d'entrée et ;
- o du bourreur ou cylindre d'alimentation
- o de 6 coussinets (2 par cylindre) ;
- o d'un jeu de couteaux MESSCHAERT et d'un jeu de peignes pour rainures circulaires ;
- o d'un système de pression hydraulique ;

Les 3 cylindres, le peigne, les couteaux et la bagassière sont disposés de façon triangulaire. Les cylindres supérieurs des moulins ayant un lever de plusieurs millimètres, leurs entraînements doivent prévoir et permettre ce mouvement. A cet effet on termine le bout d'arbre du dernier engrenage par une partie carrée ; on donne la même forme au bout d'arbre du cylindre qui lui fait face, et on interpose entre les deux bouts une pièce de même section, à laquelle on a laissé son nom anglais « Tail-bar ». Le Tail-bar est rendu solidaire des deux bouts d'arbre, qu'il sert à relier, au moyen de deux manchons.

On appelle « couronnes », les pignons fixés sur les arbres des cylindres et permettant l'entraînement des deux cylindres inférieurs par le supérieur. *Les couronnes* normales doivent permettre d'obtenir dans un moulin le même réglage relatif pour une usure de cylindres de 6 à 7 % du diamètre. La capacité des moulins est proportionnelle à leur vitesse de rotation. Cette dernière est de varie de 3.5 à 6,5rpm. Les ouvertures d'entrées et de sorties diminuent de moulin en moulin dans la batterie et la pression exercée sur ces derniers augmente dans la batterie.

En sortie les ouvertures d'entrées et de sorties moulins diminuent ; leur rapport augmente ; la pression du dernier moulin est la plus grande de la batterie d'où une pression et une extraction de jus maximales ce qui permet d'avoir une bagasse sèche offrant une meilleure combustible.

Rappel : pouvoir calorifique inférieur P.C.I. de la bagasse à 50 % d'eau d'où 1850 kcal/kg.

## 2.6. Turbine d'entraînement du 6e moulin

La turbine du moulin date des années 70 et est très vieilles. Elle est fabriquée par la société Worthington Turbodyne. Les spécifications techniques de la turbine sont données ci après.

- Constructeur : WORTHINGTON CORPORATION
- Serial : 29572
- Puissance : 670HP ;
- Pression admission : 40bar
- Pression échappement : 1.5bar
- Température admission : 734°F=390°C
- Température échappement : 395 °F=201°C
- Trip speed : 5940 ;
- Max cont RPM : 5400 ;
- Steam rate : 9.83.
- Form : 283 WHB.
- Vitesse de rotation : 4500rpm.
- Inst Book : U-17526.

Le schéma d'entraînement du 6<sup>e</sup> moulin est présenté dans la page suivante.

Description du 6<sup>e</sup> moulin et de l'ensemble commande

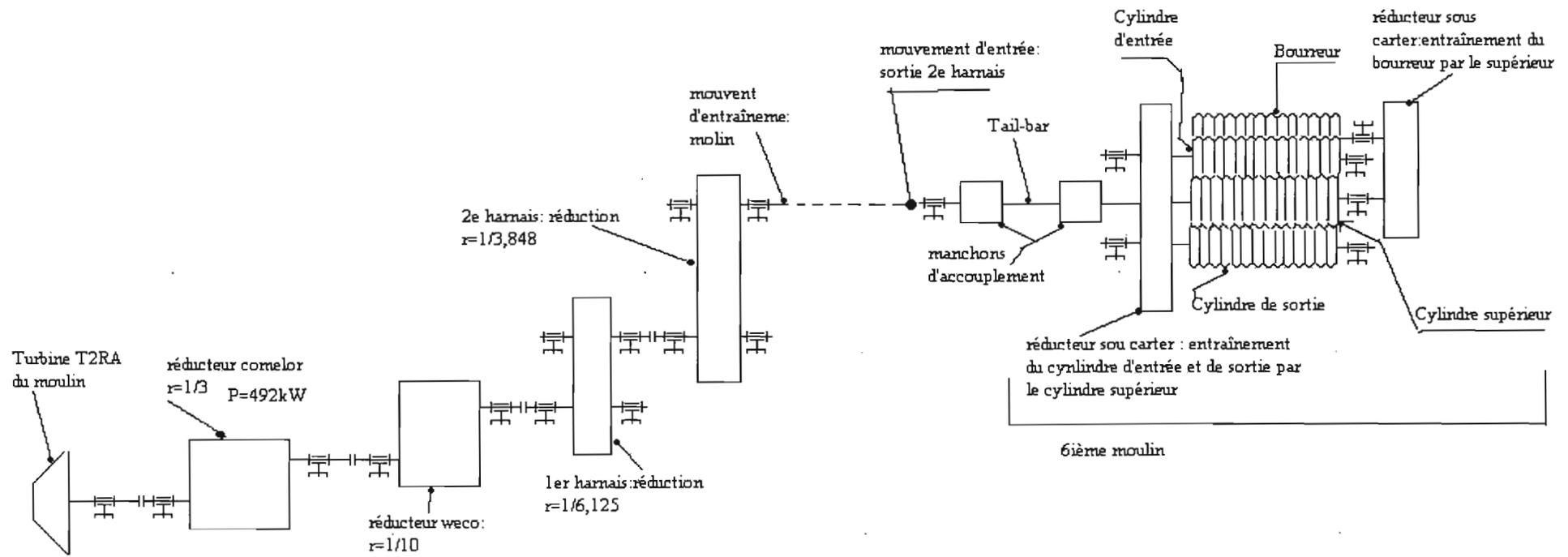


Figure 2- 7 : schéma d'entraînement du 6<sup>e</sup> moulin.

## 2.7. Conclusion

Cette partie nous a permis de comprendre l'architecture puis le fonctionnement des moulins et du Shredder. Ceci, nous permettra d'avoir vision réelle du problème au moment de dimensionner notre moteur d'entraînement.

Nous avons noté au cours de cette analyse du système que le système est composé d'une série de quatre réducteurs : deux réducteurs sous carter et deux réducteurs sous capot fermé.

Cette succession de réduction a un inconvénient majeur : le rendement du système devient relativement faible du fait de la mauvaise lubrification du système et de l'emploi d'engrenages dont le rendement est assez médiocre. Ce constat est important particulièrement pour le calcul de l'énergie à fournir au système. Par ailleurs, la description technique des installations du service moulin abordée au chapitre 2, permet par la suite d'entreprendre une étude comparative des actionneurs compatibles aux broyeurs utilisés

# CHAPITRE 3 : ETUDE ET COMPARAISON DES ACTIONNEURS POUR LA COMMANDE DES BROyeurs DE CANNE

## 3.1. Généralités

### 3.1.1. Objectifs

Cette partie permet a pour but :

- choisir le type de moteur selon la source d'énergie ;
- choisir le type de transmission et définir ses caractéristiques principales.
- faire une étude comparative de différentes solutions

### 3.1.2. Principe d'un entraînement d'une machine

La figure suivante représente le synoptique d'un groupe d'entraînement couplé à une machine. Le moteur entraîne la machine par l'intermédiaire d'une transmission mécanique chargée d'adapter les caractéristiques du moteur à celles de l'organe considéré. Il est alimenté par des appareils de commande qui assurent selon le procédé le **réglage de la vitesse** et du couple. **Le moteur et sa commande** constituent un tout qu'on appelle **actionneur**. Il est alimenté en **énergie** et reçoit les ordres de **pilotage**. L'actionneur et la transmission forment le groupe d'entraînement

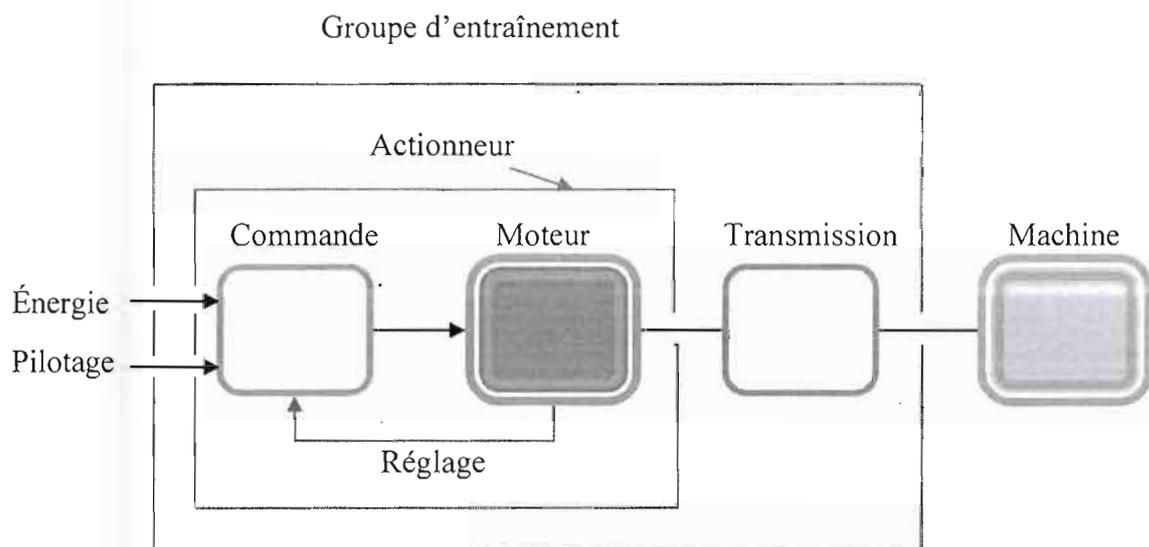


Figure 3- 1 : Schéma synoptique d'un entraînement.

### 3.2. Description d'un groupe d'entraînement

Un groupe d'entraînement est constitué :

- **D'un moteur** dont le rôle est de fournir la puissance et le couple nécessaire à tous les régimes de fonctionnement. Le moteur doit avoir une puissance nécessaire pour vaincre le couple résistant lors des différents régimes de fonctionnement.

Les moteurs peuvent être classés, selon l'énergie mise en jeu :

1. Mécanique ;
  2. Hydraulique ;
  3. Pneumatique ;
  4. Thermique ;
  5. Éolienne ;
  6. Électrique.
- **D'une transmission**, dont le rôle est d'adapter les caractéristiques du moteur par rapport à celles de la machine entraînée. Généralement, la transmission sert à augmenter le couple moteur.
    - Transmission directe : dans ce cas, le récepteur est directement relié au moteur.
    - Transmission indirecte : on intercale entre le récepteur et le moteur un appareil chargé d'adapter les caractéristiques du moteur à la machine. La transmission indirecte est généralement réalisée par un réducteur de vitesse.

Parmi les différentes transmissions, on peut citer :

- Renvois d'angle ;
  - Coupleurs ;
  - Réducteurs à couples spiro-coniques ;
  - Réducteurs à couples roue et vis sans fin ;
  - Réducteurs à roue à chevrons ;
  - Réducteurs épicycloïdaux ;
  - Réducteurs planétaires ;
  - Réducteurs d'éoliennes ;
  - Multiplicateur.
- **D'une commande** qui donne des ordres aux moteurs et permet l'alimentation correcte du moteur en fonction de la charge et de la consigne.

### 3.3. Modes de fonctionnement d'une machine

#### 3.3.1. Types de machines ou de charges

La machine est considérée comme le récepteur ou la charge à entraîner. Elle peut être classée dans deux familles :

- les charges motrices qui mettent en mouvement un mobile, un fluide ou crée un changement d'état de fluide. Ce sont : les pompes, les ventilateurs, les ascenseurs, les broyeurs, etc....
- les charges passives qui ne procurent pas de force motrice comme l'éclairage ou le chauffage. Celles-ci ne sont pas tenues en compte dans l'étude.

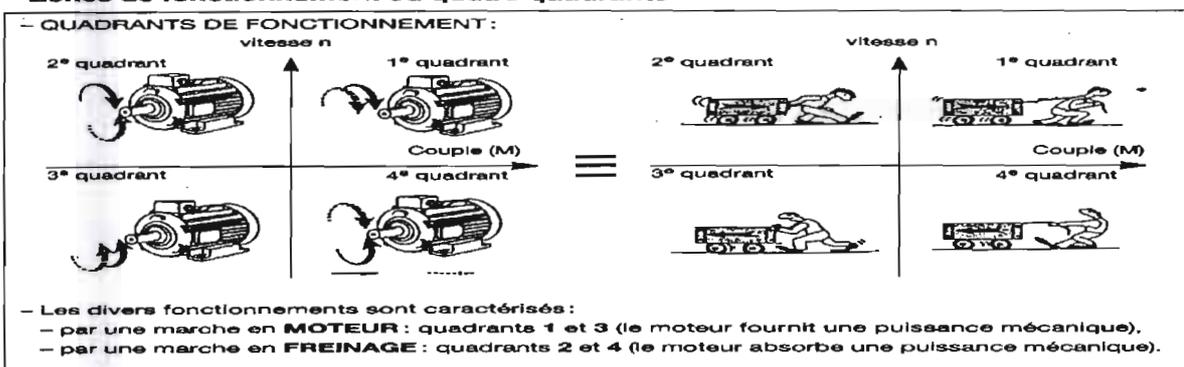
#### 3.3.2. Charges actives

Sous cette domination, sont regroupés tous les systèmes qui permettent de mettre en mouvement un mobile ou un fluide ou l'association de mobile fluide. Le mouvement d'un mobile requiert de modifier sa vitesse ou sa position ce qui implique de lui fournir un couple qui permettra de vaincre la résistance au mouvement ainsi que d'accélérer l'inertie de la charge. La mise en vitesse est une conséquence directe du couple appliqué.

#### 3.3.3. Analyse des quadrants de fonctionnement

Il existe quatre situations possibles dans le diagramme couple vitesse d'une machine. Elles sont résumées dans le tableau associé.

##### • Zones de fonctionnement ou quatre quadrants



##### • Analyse de fonctionnement

Sens de rotation	Vitesse	Couple	Puissance $P = T\Omega$	Quadrant	Travail machine électrique	Charge
sens 1	+	+	+	1	moteur	résistante
	+	-	-	2	génératrice	entraînante
sens 2	-	-	+	3	moteur	résistante
	-	+	-	4	génératrice	entraînante

Figure 3- 2 : les quadrants de fonctionnement.

### 3.3.4. *Mode de fonctionnement d'une machine selon la nature du couple*

#### ➤ *Fonctionnement à couple constant*

Le fonctionnement est dit à couple constant quand les caractéristiques de la charge sont telles qu'en régime établi, le couple demandé est sensiblement le même quelle que soit la vitesse. Ce mode de fonctionnement se retrouve sur des machines de type convoyeur, broyeurs (concasseur) ou engins de levage. Pour ce type d'application, le dispositif de démarrage doit avoir la capacité de fournir un couple de démarrage important (1.5 fois ou plus le couple nominal) pour vaincre les frottements statiques et pour accélérer la machine (inertie).

Remarque : *Les moulins sont considérés comme des machines à couple constant.*

#### ➤ *Fonctionnement avec couple croissant avec la vitesse*

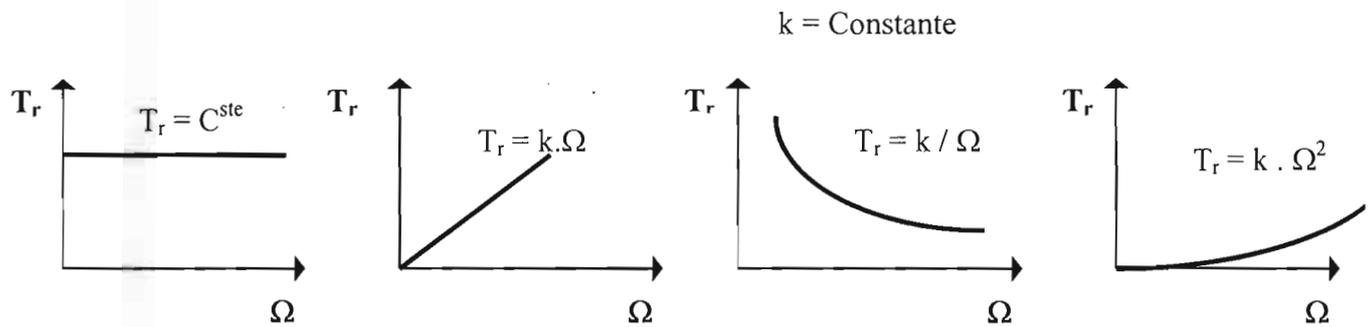
Les caractéristiques de la charge sont telles que le couple demandé croît avec la vitesse. C'est en particulier le cas des pompes volumétriques à vis d'Archimède dont le couple croît linéairement avec la vitesse ou les machines centrifuges (pompes et ventilateurs) dont le couple varie comme le carré de la vitesse. Quant à leurs puissances, elles varient respectivement avec le carré de la vitesse et avec le cube de la vitesse. Un démarreur destiné à ce type d'application aura un couple de démarrage plus faible.

Remarque : *Les Shredders sont considérés comme des machines à couple croissant avec la vitesse. Leur puissance varie comme le cube de la vitesse.*

#### ➤ *Fonctionnement avec couple décroissant avec la vitesse*

Pour certaines machines, le couple demandé par la charge diminue quand la vitesse augmente. C'est le cas en particulier pour le fonctionnement, dit à puissance constante, quand le moteur fournit un couple inversement proportionnel à la vitesse angulaire. C'est le cas, par exemple, pour un enrouleur dont la vitesse angulaire doit diminuer au fur et à mesure que croît le diamètre d'enroulement par accumulation du matériau. C'est également le cas des moteurs de broche des machines outils. La plage de fonctionnement à puissance constante est par nature limitée : en basse vitesse par le courant fourni par le variateur et en grande vitesse par le couple disponible du moteur. En conséquence, le couple moteur disponible avec les moteurs asynchrones et la capacité de commutation des machines à courant continu doivent être bien vérifiés.

Mode de fonctionnement d'une machine



Machines utilisées pour le Levage, le broyage, le convoyage.	Agitateurs, pompes doseuses, Mixeurs industriels.	Machines utilisées Pour le tournage, fraisage et le perçage	Ventilateur les pompes centrifuges
--	---	---	------------------------------------

Figure 3- 3 : Types de charge résistante.

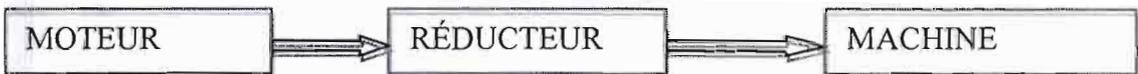
### 3.4. Différents types de combinaisons

Dans ce schéma d'entraînement un ou plusieurs appareils peuvent ne pas figurer dans la disposition. Les différentes combinaisons possibles sont :

a. Machine à Entraînement Directe



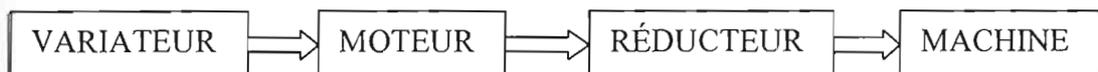
b. Moto Réducteur



c. Moto Variateur Électronique



d. Moto Variateur Réducteur



### 3.5. Mode d'entraînement des broyeurs dans les sucreries

Dans les sucreries trois principaux types de moteurs d'entraînement des Shredders et des moulins existent.

- Entraînement par turbine à vapeur ;
- entraînement par moteur hydraulique ;
- entraînement par moteur électrique.

Dans les points qui suivent, nous allons donner les avantages et les inconvénients de chaque type de moteur lorsqu'il est utilisé dans une sucrerie pour la commande des broyeurs.

#### 3.5.1. *Par turbine à vapeur*

L'entraînement des broyeurs se fut par turbine à vapeur. Ce mode de commande fut essayé pour la première fois en 1947 en Louisiane. Il donna satisfaction et se répandit très rapidement. C'est aujourd'hui, de loin, le système le plus utilisé, comme le cas du service moulin de la CSS.

Ile présente des avantages importants.

#### ❖ *Inconvénients de la turbine à vapeur*

- il évite la double transformation de l'énergie exigée par les moulins électriques, on y réalise ainsi une économie de 10 à 15 % de l'énergie absorbée par les moulins ;
- il permet une grande échelle de variation de vitesses des moulins, sans inconvénient majeur sur le rendement ;
- par rapport à la batterie électrifiée, il économise le turboalternateur, le tableau de la centrale et les câbles électriques de telle sorte que l'installation complète soit moins onéreuse ;
- par rapport aux machines à vapeur, nous avons les mêmes avantages que les moulins électriques : bon couple de démarrage, vapeur d'échappement non souillée d'huile, encombrement plus faible, personnel de surveillance et d'entretien réduit.

L'entraînement par turbine à vapeur présente aussi des inconvénients :

❖ *Inconvénients de la turbine à vapeur*

- Poussée axiale ;
- Maintenance spécialisée très fréquente ;
- Conduite très délicate ;
- Contrôle de la vitesse très délicate (emballement possible) ;
- Conduite de vapeur très longue ;
- Pièces de rechanges très chères ;
- Chaleur dégagée très grande ;
- Bruit ;
- Problème d'étanchéité ;
- Changement fréquent des carbones et des garnitures ;
- Main d'œuvre qualifiée pour la conduite et la surveillance ;
- Démarrage très long (1heure à 2 heures) ;
- Connaissance très difficile des paramètres de fonctionnement notamment de la puissance consommée ;
- Fonctionnement à de très grande vitesse d'où problème de sécurité ;
- Impossibilité de change le sens de rotation ;
- Régulation très difficile ;
- Usure fréquente de pièces mécaniques.

Certains de ces inconvénients sont quantifiables, d'autres ne le sont pas.

Les turbines à vapeur sont souvent pilotées par des régulateurs mécaniques. Ceux ci causent d'énormes problèmes de maintenance et de réglage et ne fournissent pas une lecture directe de la grandeur réglée.

Parmi les autres problèmes de ce type de commande, on peut citer :

- Régulation incomplète ;
- Usure des pièces mécaniques ;
- Maintenance spécialisée ;
- Le régulateur de marque Woodward à des filiales seulement en occident.

### 3.5.2. Par moteur hydraulique

Une transmission hydrostatique est, comme son nom l'indique, un ensemble d'éléments qui permettent de transmettre une énergie hydraulique, la transmission se faisant à basse vitesse 5 à 6 m/s. Par contre, dans les transmissions hydro cinétiques (convertisseur de couple) la vitesse est bien plus élevée (supérieure à 80 m/s).

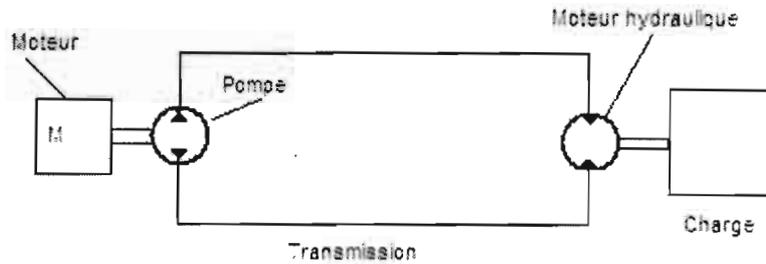


Figure 3- 4 : Schéma fonctionnel d'une transmission hydrostatique

Un moteur thermique ou hydraulique entraîne une pompe transformant son énergie mécanique en énergie hydraulique. A l'autre bout de la transmission, un moteur hydraulique retransforme cette énergie en énergie mécanique

#### ❖ *Avantages d'une transmission hydrostatique*

Elle est d'abord utilisée pour sa compacité et surtout pour sa très grande souplesse d'exploitation. En effet, la transmission hydrostatique permet :

1. Une grande variation de vitesse, de façon continue et sans laminage de l'huile, par simple variation du débit de la pompe ;
2. L'inversion du sens de rotation du moteur hydraulique par inversion du débit de la pompe ;
3. Un contrôle continu du couple dans les deux sens de rotation ;
4. Un rendement global élevé ;
5. En supprimant la cavitation, l'utilisation de la pompe à des régimes plus élevés ;
6. L'obtention de puissance massique élevée supérieures à celle fournies par les moteurs électriques ou thermiques ;

7. Couple élevé à basse vitesse ;
8. Des temps de réponse très courts.

❖ *Inconvénients de la transmission hydrostatique*

1. Utilisation de la très haute pression (pouvant atteindre 200bars) ;
2. Double transformation de l'énergie ;
3. Utilisation de machine mécanique ;
4. Problème d'étanchéité ;
5. Problème de gavage (risque de cavitation). ;
6. Niveau sonore élevé ;
7. Maintenance très spécialisée ;
8. Utilisation d'un fluide en plus de l'énergie électrique ;
9. Problème d'encombrement (présence de la centrale de graissage).

3.5.3. *Par moteur électrique*

❖ *Avantages de commande électrique*

1. *Propreté et netteté* : une salle de moulins électriques est beaucoup plus propre qu'une salle de moulins conduits par turbine à vapeur : pas de joints de vapeur fuyant ou égouttant, pas d'huile giclant, pas de tuyaux de vapeur encombrant
2. *Contrôle plus complet et permanent* : la puissance consommée est connue à tout moment par simple lecture d'un ampèremètre : on est ainsi renseigné sur le résultat d'une modification de réglage. c'est un gros point en faveur des moulins électriques, qui se traduit par une meilleure extraction.
3. *Aisance de mise en route et d'arrêt* : la mise en route des moulins se fait par pression sur un bouton. L'arrêt s'obtient de même immédiatement, ainsi que le renversement de marche, pour « faire arrière » lors d'un engorgement (bourrage).
4. *Frais de marche et d'entretien plus faible*. Les frais de graissage des moteurs électriques sont beaucoup plus faibles que ceux exigés par la turbine à vapeur. De même, les frais d'entretien sont bien moindres : pas de segments à changer, d'ovalisation à corriger, de jeux à reprendre, de vannes à roder, de distributeurs à changer, de réglages délicats à effectuer.

5. Accident moins fréquents pas de coup d'eau à craindre ni de rupture de bouton manivelle.
6. Vapeur échappement sans huile.
7. Avec l'avance de l'électronique de puissance ; possibilité d'utilisation de variateur électronique de puissance.

#### ❖ *Inconvénients du moteur électrique*

Parmi les inconvénients du moteur électrique, on peut citer :

1. Double transformation supplémentaire de l'énergie.
2. Accidents plus graves. S'ils sont rares, les accidents susceptibles de survenir dans une installation électrique sont plus graves et nécessitent un matériel de secours judicieusement prévu.
3. L'installation électrique nécessite un personnel plus spécialisé.

### **3.6. Tableau comparatif pondéré de la solution électrique et la solution hydraulique**

Les inconvénients notés sur l'entraînement par turbine à vapeur nous amènent à l'écarter du choix au profit des solutions hydrauliques.

#### **3.6.1. Critères**

Les critères retenus pour la comparaison de la solution électrique avec la solution hydraulique sont :

1. Sécurité.
2. Fiabilité.
3. Simplicité.
4. Maintenance spécialisée.
5. Consommation énergétique.
6. Salubrité.
7. Main d'œuvre (coûts).
8. Régulation.

Tableau croisé

9. Facilité démarrage et d'arrêt.
10. Refroidissement.
11. Huile de lubrification.
12. Robustesse.
13. Encombrement.
14. Rendement

Ces critères ont été fixés, suite à une l'exploitation de la littérature et par une enquête effectuée au niveau du service moulin.

Ils ont été par la suite soumis à des personnes ressources, pour l'établissement d'un tableau croisé. Les notes varient entre 0 et 5, selon que l'entraînement utilisé, réponde au critère à évaluer.

Nous présentations les résultats dans le tableau ci-dessous :

### 3.6.2. Tableau croisé

Tableau 3- 1 : Transmission hydrostatique et transmission électrique.

	CRITÈRES	MOTEUR	
		ÉLECTRIQUE ASYNCHRONE AVEC VARIATEUR DE VITESSE	TRANSMISSION HYDROSTATIQUE PAR MOTEUR HYDRAULIQUE AVEC VARIATEUR DE VITESSE
1	sécurité	4	2
2	fiabilité	3	3
3	simplicité	4	3
4	maintenance spécialisée	4	2
5	consommation énergétique	4	3
6	salubrité	5	1
7	main d'œuvre (coûts)	3	3
8	régulation	4	3
9	facilité de démarrage et d'arrêt	3	4
10	refroidissement	4	2
11	robustesse	3	4
12	durée de vie	4	3
13	encombrement	4	2
14	rendement	4	3
<b>total</b>		<b>53</b>	<b>38</b>

L'analyse du tableau croisé nous montre que la solution électrique avec variateur électronique de vitesse est plus rentable que celle hydraulique.

### 3.7. Conclusion

Ce chapitre, intitulé : Etude et comparaison des actionneurs pour la commande des broyeurs de canne, a permis de dégager les avantages et les inconvénients de chaque type de moteurs pour commande des broyeurs. Il s'agit, des moteurs électriques, des turbines à vapeur et des moteurs hydrauliques. De même, un tableau croisé comparatif a été refait dans la dernière partie. Suite à une première approche qualitative, la solution électrique a été retenue, comme solution de substitution des commandes mécaniques actuelles.

Dans le chapitre suivant, nous ferons le dimensionnement des moteurs électriques pour l'entraînement du Shredder et du moulin, ainsi que leurs spécifications techniques.

# **CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT ET SPECIFICATIONS TECHNIQUES DES APPAREILS DE COMMANDE DES BROYEURS**

---

## **4.1. Introduction**

La conception des systèmes d'entraînement est une tâche assez exigeante. Ceci s'explique non seulement par une grande diversité des procédés industriels, mais aussi par la nature distincte et souvent non linéaire des éléments entrant dans la structure. La conception d'un entraînement fiable exige une analyse globale du système. Les connaissances nécessaires pour cela sont issues de domaines assez distincts de l'ingénierie moderne : machines électriques, électronique de puissance, logique et électronique de commande, mécanique, etc....

Le processus de conception des systèmes d'entraînement de machines électriques nécessite un choix stratégique des principaux éléments, à savoir le moteur électrique, le convertisseur statique de puissance et le système de commande, à partir de cahier de charges et des spécifications techniques des mécanismes entraînés.

Dans ce chapitre nous allons dans un premier temps au dimensionnement du moteur du Shredder et du moulin dénommés broyeurs. Dans un second temps, nous établirons les spécifications techniques de des moteurs, des transmissions et des commandes devant assurer la substitution.

## **4.2. Eléments de références du dimensionnement**

### **4.2.1. Cahier de charges de l'entraînement**

La machine à entraîner pose un certain nombre d'exigences qui constituent le cahier des charges de l'entraînement. Sur le plan mécanique, ce sont principalement :

1. la vitesse nominale et la plage de variation de la vitesse ;
2. le couple nominal et la caractéristique du couple d'entraînement en fonction de la vitesse ;
3. le couple résistant de démarrage ;
4. la durée des cycles de fonctionnement et la fréquence des démarrages ;

5. la durée maximale admissible du démarrage et du freinage ;
6. l'inertie ;
7. la précision du positionnement et de la vitesse ;
8. l'environnement : température, atmosphère particulière, humidité, vibrations ;
9. la masse du dispositif d'entraînement acceptable, l'encombrement admissible, la disposition géométrique ;
10. la source d'énergie disponible.

#### **4.2.2.      *Caractéristiques et prévisions de broyage de la CSS***

On représente dans le tableau 4.1 de la page suivante, le tonnage de la C.S.S pendant les six dernières années. Il donne :

- La campagne (année d'exploitation) ;
- La quantité de canne broyée (en tonne) ;
- Le nombre de jour de campagne ;
- La durée totale de la campagne (en heures) ;
- Le nombre d'heure d'arrêts pour maintenance et panne ;
- Le nombre d'heure de travail effectif ;
- Et enfin le travail moyen de canne.

Nous constatons à la lecture du tableau 4.1 que pour une production moyenne annuelle de 886 681,36 tonnes de canne, ce qui correspond à un travail de canne est de 199t/h. Les prévisions pour 2015 se situent à 1 500 00 tonnes de canne, c'est-à-dire une production moyenne de 336,28t/h. Nous notons également que la durée moyenne effective d'une campagne est de 4460,61 heures.

**Tableau 4- 1 : Tableau de broyage de canne et de la capacité du moulin.**

Campagne	Canne broyée en tonne (T)	Nombre jour de campagne	Durée campagne en heures (H)	Arrêt maintenance et pannes en heures (H)	Nombre d'heures de travail effectif (H)	Travail moyen de canne (T/H)
2007-2008	1 007 923,62		4 968,00	507,39	4 460,61	225,96
2006-2007	921 145,34	201,00	4 824,00	612,40	4 211,60	218,72
2005-2006	922 882,12	214,00	5 136,00	422,25	4 713,75	195,79
2004-2005	818 819,58	219,00	5 256,00	760,22	4 495,78	182,13
2003-2004	829 604,20	200,00	4 800,00	351,53	4 448,47	186,49
2002-2003	819 713,30	201,00	4 824,00	390,55	4 433,45	184,89

moyenne	886 681,36	207,00	4 968,00	507,39	4 460,61	199,00
---------	------------	--------	----------	--------	----------	--------

	Prévision de broyage (T)		Durée moyenne d'une campagne (H)	Arrêt maintenance moyen (H)	Durée moyen de travail effectif (H)	Capacité de broyage du Shredder (T/H)
Shredder dans les conditions idéales	1 500 014,00		4 968,00	507,39	4 460,61	336,28

#### Dimensionnement de l'entraînement électrique du Shredder

La production de canne (broyage) dépend en premier lieu des performances de broyage du Shredder puis du moulin. Cependant, le Shredder travaillant à charge variable, nous nous fixons comme tonnage horaire maximal la valeur voisine arbitraire de 350t/h. ce qui permet de compenser les sous productions dues à la baisse de régime, arrivant par moment.

### **4.3. Dimensionnement du moteur du Shredder**

#### **4.3.1. Généralités**

Le dimensionnement est réalisé d'après des prévisions de broyage (voir tableau 4.1).

Nous allons utiliser pour cela 3 méthodes de calcul des puissances :

- L'une basée sur l'hypothèse d'un mode de fonctionnement à charge constante du Shredder, sera associé à l'exploitation des données *de la turbine*. Elle prend en compte deux modes de fonctionnement. Le fonctionnement à vitesse constante et le fonctionnement à charge constante.
- Les deux autres, essentiellement empiriques, sont basées sur des formules tirées de la littérature des sucreries :
  - ✓ Formule de la puissance absorbée en fonction du tonnage de canne broyée ;
  - ✓ Formule donnant la puissance en fonction des paramètres du Shredder. (méthode de Crawford)

#### **4.3.2. Méthods théorique**

##### ➤ Marche à vitesse constante

Ce mode de marche est celui de la CSS. Appliqué au Shredder, celui-ci donne un broyage à vitesse constante, avec une alimentation variable de canne. À la CSS, la vitesse est environ 1000tr/min.

Malgré la simplicité de ce mode de fonctionnement, l'inconvénient est qu'il est ainsi très difficile de prédire le tonnage mais aussi la puissance consommée par le Shredder en fonction de ce dernier (du tonnage). De même, s'il arrive que le tonnage change et que la vitesse ne change pas, il y'a risque de modification de la préparation. Ce mode de fonctionnement entraîne par ailleurs des surcharges, des vides du moteur, ou un broyage

#### Dimensionnement de l'entraînement électrique du Shredder

irrégulier dû à l'irrégularité de l'alimentation. Il n'est pas utilisé ici à cause de certaines données manquantes utiles pour le développer cette méthode.

➤ Fonctionnement à charge constante

Il permet de résoudre les problèmes soulevés dans le cas précédent (marche à vitesse constante), mais aussi de calculer la puissance absorbée par le Shredder pour n'importe quel tonnage de canne. Pour ce faire nous posons comme hypothèse suivante : La vitesse du Shredder doit pouvoir être variée de 500tr/min à 1500tr/min selon le tonnage utilisé.

Cependant, La difficulté de la mise en application de ce mode de fonctionnement à charge constante est due à l'ignorance de la relation liant la vitesse de rotation du Shredder ; l'indice de préparation et le tonnage.

C'est pour cette raison que nous avons pensé utiliser le principe de conservation du débit de canne pour avoir la relation manquante.

**Formulation :** Quantité de canne introduite par le conducteur = quantité de canne broyée par le Shredder. C'est-à-dire :

$$60 \times V_c \times l \times h \times d = 1000 \times A \quad (4.1)$$

Avec :

- A = travail de canne en t/h
- $V_c$  = vitesse du conducteur de canne en m/min. Cette vitesse est asservie par rapport au niveau de la chute Donnelly du 1<sup>er</sup> moulin.
- l = largeur du conducteur de canne. Elle est de 2m.
- h = hauteur de canne dans le conducteur de canne, fixe une fois réglée. Elle est de 1m.
- d = densité de la canne (masse volumique) dans le conducteur. Elle dépend de son mode de préparation avant son arrivée au niveau du Shredder. Elle peut arriver enchevêtrée, parallèle ou hachée. Les valeurs des densités de la canne en fonction du mode de préparation et de la condition d'alimentation sont données dans le tableau suivant :

Dimensionnement de l'entraînement électrique du Shredder

Tableau 4- 1 : densité des types de canne.

Type de canne	Densité de canne (Kg/m <sup>3</sup> )	Condition d'alimentation
cannes enchevêtrées	125	Depuis les champs sans précaution particulière.
cannes parallèles	150	Passage sous le niveleur. Utilisé par la CSS.
cannes hachées (tranchées)	300	Arrivée très régulière, utilisation de coupe canne.

La relation (4.1) peut également s'exprimer par :

$$n(\text{tr / min}) \times t = V_c \times l \times h \times d \tag{4.2}$$

- t étant la quantité de canne que le Shredder est capable de broyer en un tour, sans bourrage ni surcharge
- n étant la vitesse de rotation du Shredder

D'où :

$$n(\text{tr / min}) = \frac{V_c \times l \times h \times d}{t}$$

➤ Calcul de V<sub>c</sub>

La vitesse du conducteur de canne est calculée à partir la chaîne cinématique d'entraînement comme indiquée par le schéma ci après

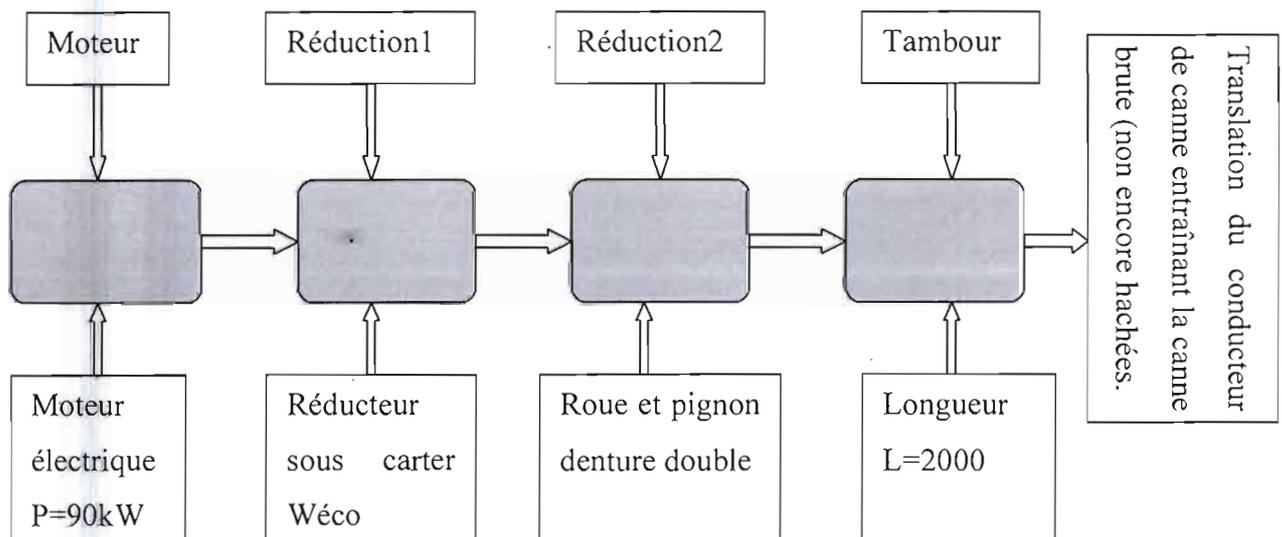


Figure 4- 1 Représentation la chaîne cinématique d'entraînement du conducteur.

Dimensionnement de l'entraînement électrique du Shredder

- **Réduction primaire 1 : Réducteur sous carter Wéco**

Tableau 4- 2 : calcul rapport réduction primaire conducteur de canne

grande vitesse	1447,00
petite vitesse	35,27
rapport de réduction=r 1	41,02

- **Réduction secondaire 2 : Roue et pignon**

Tableau 4- 3 : calcul rapport réduction secondaire et global conducteur de canne.

diamètre pignon en (mm)	340,000
diamètre roue en (mm)	1525,000
rapport de réduction =r2	1/4,485

réduction total=r1xr2	1/184,000
-----------------------	-----------

- **Formule donnant la vitesse sortie arbre réducteur2 en fonction de la vitesse du moteur du conducteur**

$$N_s = \frac{N_e}{184} \quad (4.3)$$

- N exprimé en tour par minute

- **Formule donnant la vitesse du conducteur de canne**

$$V_c = R \times \frac{\pi \times N_s}{30} \times 60 \quad (4.4)$$

- R exprimé en mètre (m)
- Vc exprimée en mètre par minute (m/min)

➤ **Calcul du couple résistant**

Le couple résistant du Shredder varie en fonction de sa vitesse. De l'analyse de son fonctionnement, nous constatons que celui ci démarre à vide jusqu'à une vitesse donnée (à

Dimensionnement de l'entraînement électrique du Shredder

régler) puis il est chargé. La formule du couple contient donc une grandeur qui varie en fonction de sa vitesse, et une grandeur fixe. Le calcul de ce dernier se fera en exploitant les conditions de fonctionnement actuelles, notamment des données thermodynamiques sur la turbine d'entraînement de Shredder.

Par ailleurs rappelons que le fonctionnement du Shredder est assimilable à une masse tournante. Sous l'effet centrifuge la force est proportionnelle au carrée de la vitesse. Par conséquent, le couple, également proportionnelle au carrée de la vitesse s'exprime par :

$$C = k \times n^2 + C1 \quad (4.5)$$

- -k étant une constante donnée à partir du fonctionnement à vide du Shredder à la vitesse de 992rpm.
- C1 étant le couple résistant constant de la charge pour le modèle à débit constant. Sa valeur est donnée par la différence entre le couple pour le fonctionnement à la charge de 250tch, et le couple pour lequel le Shredder n'est pas chargé. Il ne tient pas compte de l'effet centrifuge et quadratique du Shredder.

✦ **Calcul des constantes k et C<sub>1</sub>**

Ces grandeurs seront calculées d'après des observations sur le fonctionnement du Shredder pour la détermination des caractéristiques des 3 points de fonctionnement suivante, pour un tonnage moyen considéré de 250tch (pris comme référence au moment de relever les valeurs) :

- le fonctionnement à vide du Shredder (Shredder non chargé) ;
- le fonctionnement à charge nominale du Shredder ;
- le fonctionnement correspondant aux pics du Shredder (états passagers de surcharges).

Remarque : Les paramètres thermodynamiques des tableaux pour le calcul des puissances ont été relevés le 36 février 2008 à 8h 42min 30.

Dimensionnement de l'entraînement électrique du Shredder

➤ Dispositifs expérimentaux de mesures :

La turbine est équipée de :

- 2 capteurs de pression : à l'entrée de la turbine et à la sortie de la turbine
- 4 capteurs de température : à l'entrée de la turbine et à la sortie de la turbine ; à l'entrée et à la sortie du réfrigérant d'huile de lubrification.
- 1 capteur de débit : donnant le débit de vapeur admis dans la turbine.
- 2 capteurs de vitesse : donnant la vitesse de la turbine et du Shredder.

Les deux tableaux suivants donnent respectivement les caractéristiques nominales de la vapeur devant alimenter la turbine du Shredder et celles fournies par les chaudières.

Tableau 4- 4 : Etat thermodynamique nominal de la vapeur d'alimentation de la turbine du Shredder.

	Entrée	Sortie
Pression (bars)	39	2,5
Température (°C)	390	150

Tableau 4- 5 : Etat thermodynamique de la vapeur fournie par la CSS.

	Entrée	Sortie
Pression (bars)	40	1,5
Température (°C)	400	150

La température et la pression et le débit varient comme suit en admission.

- $39 < P \text{ (bars)} < 43$  ;
- $350 < T \text{ (°C)} < 400$  ;
- $1 < Q_m \text{ (t/H)} < 22$  ;

➤ Formule de calcul de la puissance de la turbine.

$$P = q_m \times \frac{\Delta h}{3600} \quad (4.6)$$

Dimensionnement de l'entraînement électrique du Shredder

Avec

- $P$  : puissance absorbée par la turbine en MW
- $Q_m$  : débit massique vapeur sèche en  $\dot{T}/h$
- $h$  : Différence d'enthalpie massique en  $\text{kJ} / \text{kg}$

Enfin, connaissant la puissance à partir de l'expression (4.5), nous avons :

$$C_0 = \frac{30 \times P}{\pi \times n}$$

D'où  $k$  donnée par la relation (4.7) ci dessous

$$C_0 = k \times n^2 \Rightarrow k = \frac{C_0}{n^2} \quad (4.7)$$

L'application numérique donne :

$$k = \frac{68,941 \times 10}{992^2} = 0,000700575$$

$$C1(m.daN) = 1215 - 69 = 1146$$

Enfin, les résultats de calcul pour chaque point de fonctionnement considéré sont présentés dans les tableaux (4.6), (4.7), (4.8).

Dimensionnement de l'entraînement électrique du Shredder

❖ Turbine Shredder à vide (Shredder non chargé) :

Tableau 4- 6 : Puissance et couple absorbés par le Shredder non chargé (à vide) pour un tonnage de 250tch.

	<i>Pression (bar)</i>	<i>Température (°C)</i>	<i>Enthalpie (kJ/kg)</i>
Entrée	40,700	354,000	3103,089
Sortie	1,000	215,300	2904,764
Différence d'enthalpie (kJ/Kg)			198,325
Débit de vapeur (t/H)			1,300
Puissance (kW)			71,617
Rendement global			0,94
Puissance reçue par le Shredder (kW)			67,320
Vitesse de rotation (tr/min)			992,000
Couple (m.daN) (C <sub>0</sub> )			68,941

❖ Turbine Shredder en surcharge

Tableau 4- 7 : Puissance et couple absorbés par le Shredder en surcharge (à pic) pour un tonnage de 250tch.

	<i>Pression (bar)</i>	<i>Température (°C)</i>	<i>Enthalpie (kJ/kg)</i>
Entrée	39,070	366,100	3136,268
Sortie	1,310	150,000	2776,000
Différences d'enthalpie (kJ/kg)			360,268
Débit de vapeur (t/H)			21,660
Puissance (MW)			2,168
Rendement global			0,94
Puissance reçue par le Shredder			2,038
Vitesse de rotation (tr/min)			959,600
Couple (m.daN)			2027,639

❖ Turbine de Shredder en marche nominale

Tableau 4- 8 : Puissance et couple absorbés par le Shredder en marche normale pour un tonnage de 250tch.

	<i>Pression (bar)</i>	<i>Température (°C)</i>	<i>Enthalpie (kJ/kg)</i>
Entrée	40,660	375,130	3155,984
Sortie	0,700	150,000	2776,041
Différence d'enthalpie (kJ/kg)			379,943
Débit de vapeur (t/H)			12,720
Puissance (kW)			1342,47
Rendement global			0,94
Puissance reçue (kW)			1261,92
Vitesse de rotation (tr/min)			992,3
couple (m.daN)			1215,009

- **Calcul de la puissance absorbée par le Shredder**

Les résultats précédents sont valables pour un tonnage de 250tch. Par exploitation de la méthode précédente, nous déterminons la puissance absorbée par le Shredder pour des tonnages compris entre 350 et 135 tch, c'est-à-dire pour des vitesses comprises entre 500 et 1500tr/min. Ce qui nous amène à utiliser la formule ci-dessous (4.8) :

$$P(kW) = C \times 10 \times \frac{\pi \times n}{30 \times 1000} \quad (4.8)$$

Nous présentons les résultats obtenus dans le tableau 4.9 de la page suivante. Celui-ci fait apparaître, pour chaque objectif de tonnage :

- la vitesse linéaire du conducteur de canne ;
- la vitesse de rotation du Shredder ;
- le couple moteur (ou résistant) ;
- **la puissance consommée ;**
- le tonnage journalier pour une marche continue (T) :

$$T = A \times 23,75 \quad (4.9)$$

Dimensionnement de l'entraînement électrique du Shredder

Tableau 4- 9 : Tableau Donnant les différents paramètres du modèle à débit constant.

N <sub>e</sub> (rpm)	1 447	1 400	1 300	1 250	1 110	1 100	900	800	700	600	560
N <sub>s</sub> (rpm)	7,86	7,61	7,07	6,79	6,03	5,98	4,89	4,35	3,80	3,26	3,04

R <sub>i</sub> (m)	0,393
--------------------	-------

V <sub>c</sub> (m/min)	19,4	18,8	17,4	16,8	14,9	14,7	12,1	10,7	9,4	8,0	7,5
------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	-----	-----

d (kg/m <sup>3</sup> )	150
h (m)	1
l (m)	2
t (kg)	4,5

N (rpm)	<b>1293</b>	1251	1162	1117	992	983	804	715	625	536	500
C (m.N)	<b>12632</b>	12557	12406	12335	12150	12137	11914	11819	11735	11662	11636
P (kW)	<b>1710</b>	2937	2544	2363	1906	1876	1347	1126	930	756	692
A (tch)	<b>349</b>	338	314	302	268	265	217	193	169	145	135
T (t)	<b>8291</b>	8022	7449	7162	6360	6303	5157	4584	4011	3438	3209

En conclusion partiel, nous pouvons dire ce modèle de fonctionnement à charge constante nous a permis de déterminer les paramètres des éléments de substitution :

- la vitesse nécessaire pour atteindre un objectif de production de 350tch :  $n=1300\text{tr/min}$  ;
- La puissance absorbée nécessaire pour ce tonnage :  $P= 1710 \text{ kW}$  ;
- La vitesse linéaire du conducteur :  $V_c 19,4\text{m/min}$ .

#### **Remarque :**

Les résultats précédents sont valables pour un mode de fonctionnement à charge constante. En considérant la même puissance absorbée pour le modèle à vitesse constante, le couple peut être déterminé car la vitesse de rotation du Shredder étant fixée à 1000tr/min par le constructeur.

#### ***4.3.3. Méthodes empiriques***

##### ➤ **Calcul Puissance en fonction du tonnage de canne**

Ce premier calcul utilise une valeur moyenne extraite de la littérature [7]. Ainsi, la puissance absorbée par le Shredder pendant le broyage est estimée à 30kw/tfh.

Si P est la puissance du moteur capable d'entraîner le Shredder, pour une production de 350tch et une charge ligneuse de canne est de 0,16, nous avons :

$$P = 30 \times 350 \times 0,16 = 1680 \text{ kW}$$

##### ➤ **Calcul de la puissance absorbée par le Shredder par la méthode de Crawford**

M. Crawford, spécialiste des sucreries, donne une formule estimant la puissance du moteur capable d'entraîner le Shredder pendant le broyage. Celle-ci est fonction des caractéristiques du Shredder et de la vitesse à laquelle la machine est entraînée. Nous présentons la méthode dans le tableau de la page suivante. Les calculs sont effectués pour une vitesse de 1000 et de 1300rpm.

**formule empirique de M. Crawford**

$$P_{th} = 91 \times M_m \times R \times h \times n^3 \times N \times (\psi + 2\delta) \times \theta.$$

$P_{th}$  : puissance théorique en kW.

$M_m$  : masse d'un marteau en kg (25 kg).

$R$  : distance de l'axe au pivot des marteaux en mètre

$h$  : distance du centre de gravité du marteau à son pivot en mètre.

$n$  : vitesse nominale du moteur d'entraînement en milliers de tours par minute.

$N$  : nombre de marteaux.

$\psi$  : angle balayé par les marteaux entre le premier contact avec les cannes et l'entrée à l'enclume en radian, correspondant à l'angle existant entre trois séries de marteaux pour ce Shredder.

$\delta$  : angle balayé par les marteaux en passant sur l'enclume en radian, égal au précédent.

$\theta$  : angle dont le marteau est repoussé en arrière dans son passage sur l'enclume, estimé à 0,02radian.

Tableau 4- 10 : Puissance du Shredder par la formule de Crawford.

Paramètres	valeur	unités
$M_m =$	25,000	kg
$h$	0,150	m
$R =$	0,480	m
$n^3 =$	1 ou 2,16	
$N =$	108,000	marteaux
$\psi =$	1,571	radians
$\delta =$	1,571	radians
$\theta =$	0,020	radians
$P_{th}$ (pour 1000rpm)	1 667,281	kW
$P_{th}$ (pour 1293rpm)	3 604,162	kW

Le tableau 4-11 donne une synthèse des résultats obtenus.

Tableau 4- 11 : Tableau récapitulatif de calcul des puissances absorbées par le Shredder.

Méthode	puissance du Shredder (kW)	observation
puissance en fonction tonnage	1680 (absorbée)	Formule empirique, tenant en compte le débit de canne mais pas de la vitesse du Shredder. Ne tient pas compte du type de Shredder utilisé. Résultat pour un débit de 350tch
puissance par la méthode d'extrapolation thermodynamique	1710 (absorbée)	Tient compte de la vitesse du Shredder et du débit de canne. Choix des paramètres très Discutable. Jamais implémentée. Etabli pour 1293rpm et 350tch.
puissance par la formule empirique de M. Crawford	1667,281 pour une vitesse de 1000rpm 3604 pour une vitesse de 1293rpm (à installer)	Ne tient pas compte du débit de canne travaillé. Tient compte du type de Shredder et de la vitesse de celui-ci.
Commentaires : pour un fonctionnement à vitesse constante, nous retenons une puissance absorbée de 1710kW, et pour un fonctionnement à vitesse variable une puissance à installée de 3600kW.		

#### 4.4. Dimensionnement du moteur du 6e moulin

##### 4.4.1. Généralités

La détermination de la puissance absorbée par un moulin est assez complexe parce qu'il dépend de nombreux facteurs.

En effet cette puissance tient compte de :

- la puissance absorbée par la compression de la bagasse ;
- la puissance absorbée par les frottements entre fusées et coussinets des cylindres ;
- la puissance absorbée par le frottement entre bagasse et bagassière ;

- la puissance absorbée par le frottement des raclettes et du bec de la bagassière contre les cylindres, auquel s'ajoute le travail de décollement de la bagasse en ces points ;
- la puissance absorbée dans les engrenages.

D'autres parts, ces cinq (5) puissances composantes dépendent aussi de facteurs dont la mesure et l'estimation sont relativement difficiles :

- variété de la canne (à poids de ligneux égal, le broyage de deux variétés différentes peut exiger des puissances sensiblement différentes) ;
- Etat de surface en frottement, qualité et maintien de graissage ;
- Réglage des ouvertures et de la bagassière.

Nous utilisons pour le calcul de la puissance, comme précédemment, 3 méthodes :

- Calcul de la puissance par la méthode de la charge hydraulique ;
- Calcul de la puissance en fonction du tonnage de canne ;
- Calcul de la puissance du moulin par la méthode expérimentale.

#### 4.4.2. Calcul de la puissance du moulin à partir de la charge hydraulique

Une formule empirique tirée de la somme des cinq puissances constituantes de celle absorbée par le moulin est par la formule suivante [7] :

$$P = nD \left[ F \left( 0,45 \cdot \frac{6r-5}{\sqrt{r}(1+\sqrt{r-1})} \cdot \sqrt{\varepsilon_A} + 0,06 \right) + 4L \right] \quad (4.10)$$

Avec :

- $r$  = coefficient de survitesse à la sortie du moulin (varie de 1 à 2 par pas de 0,1)
- $F$  = charge hydraulique du moulin, en tonnes,
- $n$  = vitesse de rotation des cylindres, en tours/minutes,
- $D$  = diamètre moyen des cylindres, en mètres,
- $\varepsilon_A$  = ouverture spécifique de la sortie du moulin =  $\frac{e_A}{D}$
- $L$  = largeur des cylindres

La Formule empirique simplifiée est donnée par :

$$P = kFnD \quad (4.11)$$

Le coefficient k est donné pour une puissance normale et une puissance de pointe. Il dépend de la préparation de la canne et aussi du mode d'alimentation des moulins (régulation manuelle, tâteur de couche, chute Donnelly). La valeur retenue est de 0.16.

➤ Calcul de la pression hydraulique maximale exercée sur le cylindre supérieure

La pression hydraulique est exprimée en tonne. Celle exprimée en bars varie de 135 bars à 200 bars et dépasse rarement 220 bars.

Pour nos calculs nous considérerons 220 bars comme la valeur maximale de pression hydraulique à ne pas dépasser.

Le diamètre du piston hydraulique sur lequel s'exerce la pression est constante est égal à 361mm. La pression hydraulique est exercée du côté transmission (Tail-bar) et du côté opposé. Le plus souvent les pressions exercées ne sont pas égales. Celles sur le côté opposé sont moins élevées que celles sur le côté transmission, mais dans nos calculs nous prendrons ces valeurs égales.

$$F_1 = P \times S = P \times \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (4.12)$$

$$F_1 = 220 \times 10^5 \times \frac{\pi \times (0.361)^2}{4} = 2.252 \times 10^6 N$$

$$1kN = 0.102 \text{ tonnes } \_ \text{ poids} \quad (4.13)$$

D'où la pression hydraulique sur un piston en tonne est égale à

$$F = \frac{F_1}{1000} \times 0,102 \approx 230 \text{ tonnes}$$

La pression hydraulique totale sur un moulin est égale à  $F_{th} = 2 \times F_1$

Finalement  $F_{th} = 460 \text{ tonnes}$

➤ Estimation de la vitesse de rotation

La vitesse  $v$  représente la vitesse de progression de la canne dans le conducteur de cannes, de la bagasse dans les conducteurs intermédiaires et dans les moulins. Elle a une très grande influence sur l'extraction. Elle est donnée par l'équation suivante

$$v = \pi D n \quad (4.14)$$

- $V$  = vitesse périphérique, en mètres/minute,
- $D$  = diamètre moyen des cylindres, en mètre,
- $n$  = vitesse de rotation, en tours/minute.

$$n = \frac{v}{\pi D} \quad (4.15)$$

Dans la pratique la vitesse maximale est estimée à :

$$v_m = 18D \quad (4.16)$$

Certaines sucreries atteignent aujourd'hui des vitesses périphériques de l'ordre de 18 à 20 m/min.

Alors que les vitesses habituelles pratiquées tournent autour de :

$$n_E = \frac{8}{D+1} \quad (4.17)$$

$$v_E = \frac{8\pi D}{D+1} \quad (4.18)$$

Tenant compte des calculs précédents, et des expressions empiriques de la vitesse ci-dessus, la vitesse optimale de rotation du moulin retenue dans cette étude sera comprise entre : **3.5 et 6.5 tr/min.**

➤ Estimation du diamètre des cylindres.

Le diamètre moyen des cylindres peut varier de 1010 mm à 950 mm en fonction de l'usure du cylindre. Pour atteindre des tonnages importants il peut être nécessaire d'avoir des cylindres de diamètre allant jusqu'à **1170** millimètres. Le calcul de la puissance se fera pour ce diamètre.

➤ Application numérique

$$P = k \times F \times n \times D$$

$$P = 0.16 \times 460 \times 6,5 \times 1,17 = 560 \text{ KW}$$

La puissance exigée par un moulin est relativement stable. Toutefois, ce dernier est soumis à des variations d'alimentation amenant des surcharges momentanées. Il est donc nécessaire de prévoir avec une certaine réserve de puissance que nous fixons à 20%. Donc cette grandeur est estimée à 672kW . De plus la prise en compte des rendements de la transmission nous donne une puissance effective de 878kW.

NB : L'utilisation d'un variateur de vitesse pour le moulin évite le surdimensionnement par réglage de la vitesse.

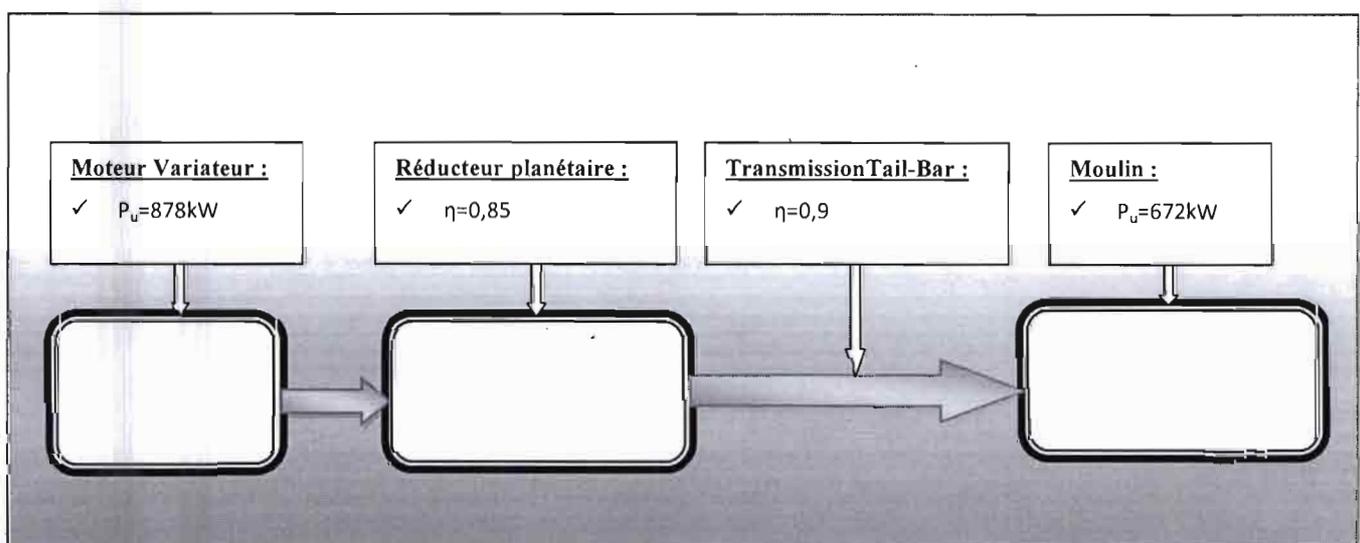


Figure 4- 2 : Puissance du moulin par la méthode de la charge hydraulique.

#### 4.4.3. Calcul de la puissance du moulin en fonction du tonnage

La formule adaptée est de l'ordre 15W/tfh.

Soit :

$$P = 15 \times 350 \times 0.16$$

$$P = 840kW$$

Cette valeur empirique de la puissance en fonction du tonnage correspond à la puissance du moteur installé.

#### 4.4.4 Méthode expérimentale de calcul de la puissance du moulin

Le moulin actuel est entraîné par turbine à vapeur. L'exploitation des paramètres thermodynamiques à l'entrée et à la sortie de la turbine nous permet d'avoir une idée sur la puissance absorbée par le moulin actuel pour le tonnage moyen actuel et la vitesse moyenne actuelle.

#### Exploitation des relevés thermodynamiques

Tableau 4- 12 : Calcul de la puissance absorbée par le moulin pour le tonnage de 250tch.

	Pression (bar)	Température (°c)	Enthalpie (kJ/kg)
Entrée	40,660	375,130	3155,984
Sortie	0,700	150,000	2776.041
Différence d'enthalpie (kJ/kg)			379.943
Débit de vapeur (T/H)			6,200
Puissance (kW)			654.35
Rendement global			0,6
Puissance reçue par le moulin (kW)			392.61
Vitesse de rotation (tr/min)			3,5
Couple (m.daN)			107172.275

La puissance moyenne reçue par le moulin est de 392.61kW. Si nous supposons que la puissance consommée par le moulin est proportionnelle au tonnage. On aura avec l'objectif de production de 350tch :

$$P = \frac{392,61 \times 350}{250} = 549,6554kW$$

#### Dimensionnement de l'entraînement électrique du moulin

Il est nécessaire de prévoir une certaine réserve de puissance que nous fixons à 20%. L'utilisation d'un variateur de vitesse pour le moulin écarte toute idée de surdimensionnement. La puissance absorbée sera de 659,58kW. De plus la prise en compte des rendements de la transmission nous donne une puissance effective de 840kW.

#### 4.4.5. Synthèse du calcul de la puissance du moulin

Trois méthodes de calculs ont été faits pour déterminer la puissance nécessaire à l'entraînement du moulin pour un objectif à atteindre de 350tch.

Tableau 4- 13 : Récapitulatif du calcul de la puissance du moulin.

	Puissance à installer (kW)	
Méthode de calcul	Empirique	878
	Thermodynamique	862
	Tonnage de canne	840

**La puissance minimale proposée pour le 6<sup>e</sup> moulin est de 880kW**

### 4.5. Spécifications techniques des moteurs

#### 4.5.1. Introduction

Le moteur électrique constitue l'élément structurel fondamental d'un système d'entraînement. Le tableau de la page suivante présente les différents types de moteurs à courant électrique. Les deux grands groupes de moteurs électriques sont : les moteurs à courant continu et les moteurs à courant alternatif.

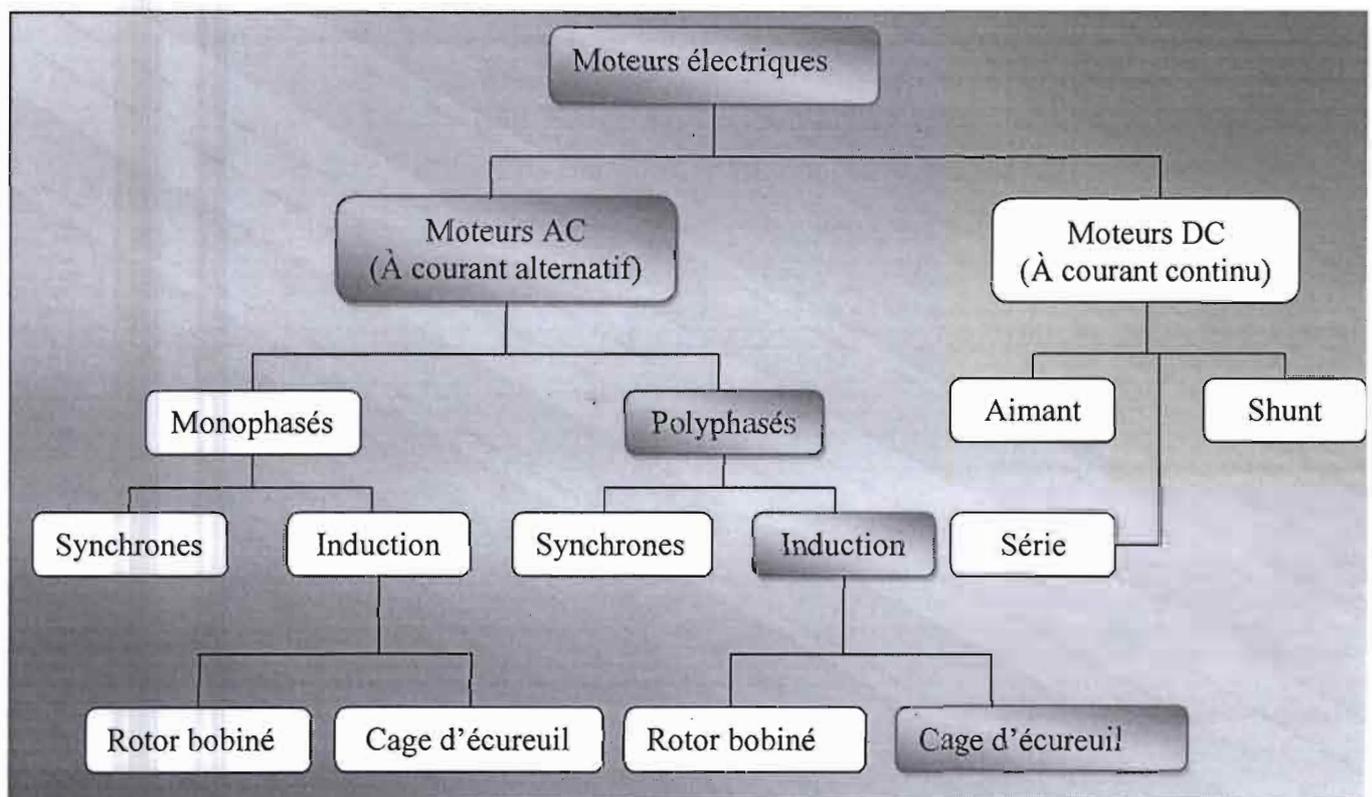
Pour satisfaire aux exigences élevées des mécanismes entraînés, le moteur à courant continu (cc) a été longtemps utilisé dans les sucreries pour l'entraînement des moulins et des Shredders.

Étant donné la bonne performance des systèmes d'entraînement des machines à courant continu, on peut se demander pourquoi on emploie aussi les machines à courant alternatif, en voici les principales raisons.

Spécifications techniques des appareils de substitution

- 1) Les machines à courant alternatif n'ont pas de collecteur par conséquent elle nécessite moins d'entretien.
- 2) Pour une puissance et une vitesse données, les machines à courant alternatifs sont moins chères et moins lourdes que celle à courant continu.
- 3) Les machines à courant alternatifs sont plus robustes et travaillent mieux dans un environnement difficile, ce qui le cas au niveau des sucreries.
- 4) A cause du collecteur, la tension des machines à courant continu est limitée à environ 1500V. Par contre la tension des machines à courant alternatifs peut atteindre plusieurs milliers de volt, ce qui permet pour les grosses moteurs une diminution importante du courant du courant.
- 5) La puissance des moteurs à courant alternatifs peut dépasser 50 000kw, alors que celle des machines à courant continu est limite à 2000kw environ.
- 6) La vitesse des moteurs a courant alternatifs peut atteindre 100 000tr/min, tandis celle des machines a c.c.p. à cause de la commutation est limitée à environ 3000tr/min.

Tableau 4- 14 : Classification des différents types de moteur.



Grâce aux progrès réalisés en électronique de puissance et en microélectronique, l'entraînement à moteur à courant alternatif (c.a.) sont aujourd'hui d'utilisation courante. Ils peuvent désormais fournir des performances dynamiques aussi bonnes que celles des entraînements classiques à courant continu tout en étant plus robustes et de moindre entretien.

Parmi les moteurs à courant alternatif, le moteur asynchrone à cage se distingue par sa simplicité et sa robustesse. Ce moteur est aujourd'hui utilisé dans toutes les gammes de puissance tant pour les entraînements haute performance que pour les applications industrielles courantes.

#### 4.5.2. *Spécifications techniques du moteur du Shredder*

Quoi que l'on puisse dire sur l'inertie du Shredder, celui-ci absorbe à vide une puissance de moins de 5% de la puissance en charge au tonnage maximal. De plus, avec le développement de l'électronique de puissance, les moteurs asynchrones à cage, même standard sont capables d'entraîner presque toutes les charges possibles, à tous les régimes de fonctionnement. Pour cela il suffit juste de lui associer un convertisseur statique compatible avec les caractéristiques de la charge entraînée.

##### Spécifications techniques du moteur du Shredder pour le fonctionnement à charge constante

- Type de moteur : asynchrone à cage.
- Puissance : 3600kW.
- Vitesse de rotation : 1500rpm.
- Tension d'alimentation : 5500V.
- Commande : par variateur de vitesse électronique (en asservissement)

##### Spécifications technique du moteur du Shredder pour le fonctionnement à vitesse constante :

###### ❖ **Proposition 1 :**

- Type de moteur : asynchrone à rotor bobiné ;
- Puissance : 2565kW ;
- Vitesse de rotation : 1000rpm ;
- Tension d'alimentation : 5500V ;
- Démarrage par démarreur électrolytique.

Spécifications techniques des appareils de substitution

❖ **Proposition 2 :**

- Type de moteur : asynchrone à cage ;
- Puissance : 2565kW ;
- Vitesse de rotation : 1000rpm ;
- Tension d'alimentation : 5500V ;
- Commande : par variateur de vitesse électronique (en régulation).

**4.5.3. Spécifications techniques du moteur du moulin**

- Type : moteur asynchrone à cage ;
- Puissance : 880 à 1000kW ;
- Tension : 5500V ;
- Vitesse de rotation : 500tr/min, ou 750 tr/min, ou 1000 tr/min ;
- Commande : variateur de vitesse électronique.

**4.6. Spécifications techniques du réducteur de vitesse du moulin**

Notre choix s'est porté sur le réducteur *CANEFLEX*, qui a été spécialement étudié pour le broyage de la canne à sucre. Le réducteur *CANEFLEX* standard est conçu pour des vitesses d'entrée de 600 tr/min à 1 800 tr/min et des vitesses de sortie d'environ 3 tr/min à 7 tr/min. L'arbre et le roulement de sortie sont étudiés pour accepter les charges induites par le Tail-bar. L'installation du réducteur *CANEFLEX* est aisée.

Spécifications techniques :

- Puissance du moteur : 1000 kW ;
- Vitesse d'entrée de 500tr/min, ou 750 tr/min, ou 1000 tr/min
- Vitesse de sortie de 6,5 ou 7rpm :

## 4.7. Spécifications techniques des variateurs de vitesse

### 4.7.1. Introduction

Pour augmenter ou diminuer la capacité d'une batterie de moulin, le changement de la vitesse des moulins est souvent nécessaire. De même pour augmenter leur capacité d'extraction on est souvent amené à faire varier la vitesse du moulin. La vitesse des moulins comme nous l'avons dit varie de 3.5 à 6.5 rpm. Or, les moteurs d'induction sont à vitesse presque constante d'où la nécessité d'équiper nos moulins de variateur de vitesse.

Le Shredder fonctionne dans presque la totalité des cas à une vitesse constante. Cependant, avec le modèle à charge constante, on est obligé, pour changer le tonnage, de varier sa vitesse en fonction de celui du conducteur de canne.

Cependant, le variateur de vitesse, en plus de leur rôle premier de faire varier la vitesse d'un entraînement est de plus en plus utilisé dans les systèmes où la charge varie énormément, comme le cas des Shredder et des moulins, pour obtenir des économies d'énergies et des gains en performance.

### 4.7.2. Propriétés générales de la variation de vitesse des machines électriques

#### Avantages

Les variateurs de vitesse ont des avantages aussi bien pour la charge entraînée que pour le moteur d'entraînement et la machine (Shredder, moulin).

#### ➤ **Au niveau du moteur :**

- faire des économies d'énergie en diminuant les pertes propres et la dissipation d'énergie ;
- supprimer les surintensités de démarrage ;
- faciliter le démarrage charge de forte inertie ;
- obtenir un couple de démarrage supérieur au couple minimal ;
- éliminer les démarrages brusques ;
- diminuer les bruits acoustiques.

#### ➤ **Au niveau de la charge entraînée**

- Meilleure adaptation de la vitesse au travail effectué ;

- Modification rapide de la vitesse et/ou du couple ;
- Suppression des à-coups de couple au démarrage ou en cas de défauts momentanés du réseau.

#### 4.7.3. *Spécifications techniques du variateur de vitesse du moteur du 6<sup>ème</sup> moulin* [5]

Ci-dessous les spécifications techniques du variateur de vitesse du moulin

- le moulin est une charge nécessitant une variation de vitesse : la vitesse varie de 3.5 à 6.5tr/min.
- Il sera entraîné par un moteur asynchrone à cage de puissance comprise entre 880kW et 1000kW.
- Technologie d'entraînement : Cycloconvertisseur pour moteur asynchrone.
- Nature du moteur : moteur asynchrone.
- Nature du convertisseur : convertisseur direct de fréquence à commutation assisté.
- Composants du convertisseur réseau (redresseur) : thyristors.
- Composants du convertisseur moteur (onduleur) : thyristors.
- Puissance : entre 880 et 1000kW.
- Tension du variateur et du moteur : 5500V
- Gamme de vitesse nominale (ou de fréquence) : 500tr/min, ou 750 tr/min, ou 1000 tr/min.
- Plage de variation de vitesse. 50 à 100%
- Domaine de fonctionnement : 1 quadrant.

**Schéma de principe**

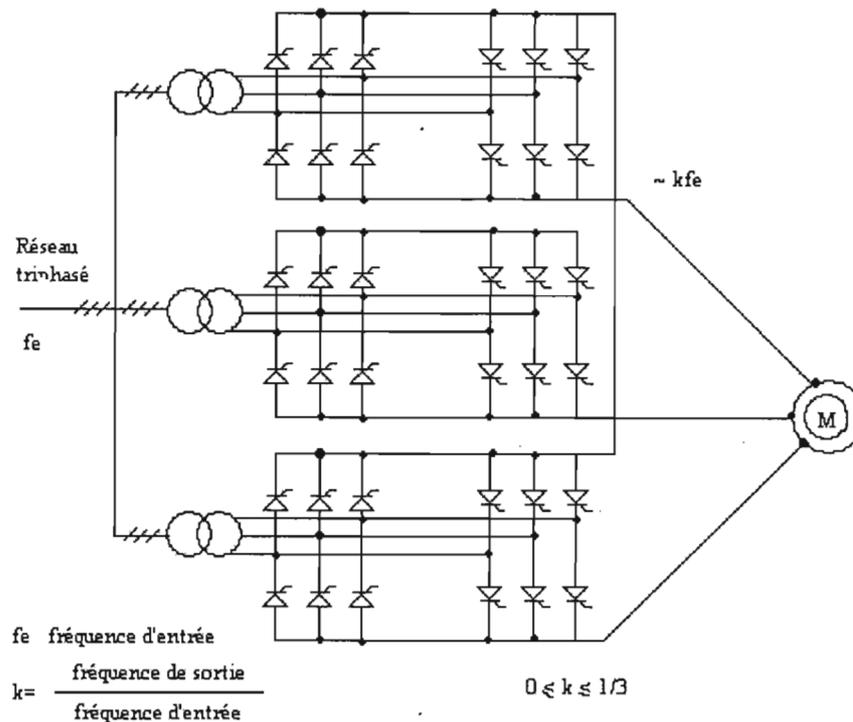


Figure 4- 3 : Schéma Cycloconvertisseur.

➤ **Description du convertisseur**

Le Cycloconvertisseur à commutation naturelle est constitué de deux ponts de Graetz par phase et nécessite donc, en triphasé, 36 soupapes. En commutant les angles de retard des différents thyristors, on peut, par un procédé d'échantillonnage, obtenir une tension de sortie qui soit, en moyenne, sinusoïdale. À cause des difficultés dues aux harmoniques et à la commutation, la fréquence maximale que peut délivrer le Cycloconvertisseur est de l'ordre du tiers de la fréquence d'entrée. La vitesse d'un moteur asynchrone ainsi alimenté ne peut dépasser 1000tr/min.

En pratique d'ailleurs, les Cycloconvertisseurs sont employés pour entraîner des moteurs plutôt lents, tournant au plus à 600tr/min ou moins, mais avec des puissances qui peuvent atteindre 10MW.

#### 4.7.4. Spécifications techniques du variateur de vitesse du moteur du Shredder [5]

Pour le fonctionnement à charge constante, une variation de vitesse du Shredder est nécessaire. La vitesse va varier de 500tr/min à 1300tr/min. Technologie d'entraînement : commutateur de courant assisté pour moteur asynchrone.

- Nature du moteur : moteur asynchrone à cage.
- Nature du convertisseur : redresseur onduleur courant à commutation assistée (filtre).
- Composants du convertisseur réseau (redresseur) : thyristors.
- Composants du convertisseur moteur (onduleur) : thyristors.
- Puissance : 3600kw.
- Tension du variateur et du moteur : 5500V.
- Vitesse nominale (ou de fréquence) : 1000tr/min, pour le fonctionnement à vitesse constante et de 500 à 1300tr/min pour le fonctionnement à charge constante.
- Plage de variation de vitesse : 10 à 100%.
- Domaine de fonctionnement : 2 quadrants.

#### Schéma de principe

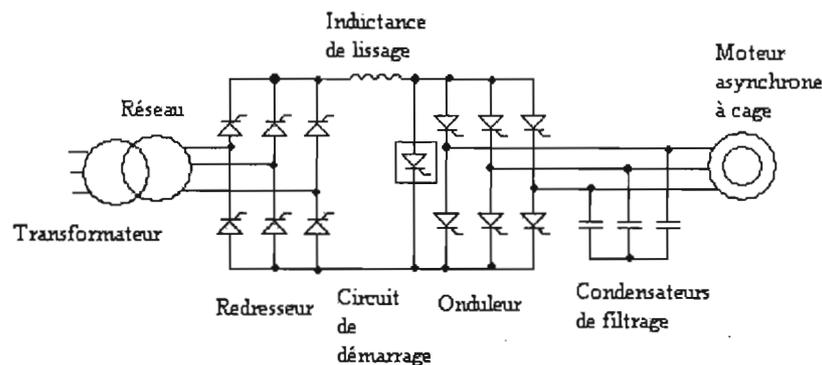


Figure 4- 4 : Convertisseur de fréquence à commutateur de courant assisté pour moteur asynchrone de forte puissance.

➤ Description du convertisseur

Ce convertisseur, dont le schéma de principe est illustré par la figure ci dessus, et est constitué d'un redresseur triphasé à thyristor commandé en courant, d'un étage de filtrage à courant continu et d'un onduleur de courant à thyristors fonctionnant en commutation assistée par la charge. Des condensateurs de forte valeur sont placés en sortie de l'onduleur et connectés en parallèle sur les enroulements du moteur de façon à fournir la puissance réactive de magnétisation du moteur et celle nécessaire de la commutation naturelle du pont onduleur. Ces condensateurs constituent un filtre à basse fréquence, ils permettent ainsi de délivrer au moteur des tensions et des courants presque sinusoïdaux. Un convertisseur supplémentaire, de type hacheur, est placé sur la boucle à courant continu pour assurer le fonctionnement du convertisseur aux fréquences faibles pendant le démarrage.

Cette technologie est disponible pour des puissances atteignant 20MW à des tensions de 7kV voire davantage par l'utilisation d'un transformateur élévateur de tension en sortie de l'onduleur. Elle est adaptée à l'entraînement de machines centrifuges (pompes, ventilateurs, et compresseurs), avec une plage de variation de vitesse usuelle de 60 à 100% de la vitesse nominale.

Nous présentons dans la page suivante, respectivement, le schéma des solutions de substitution pour le moulin et le Shredder.

Spécifications techniques des appareils de substitution

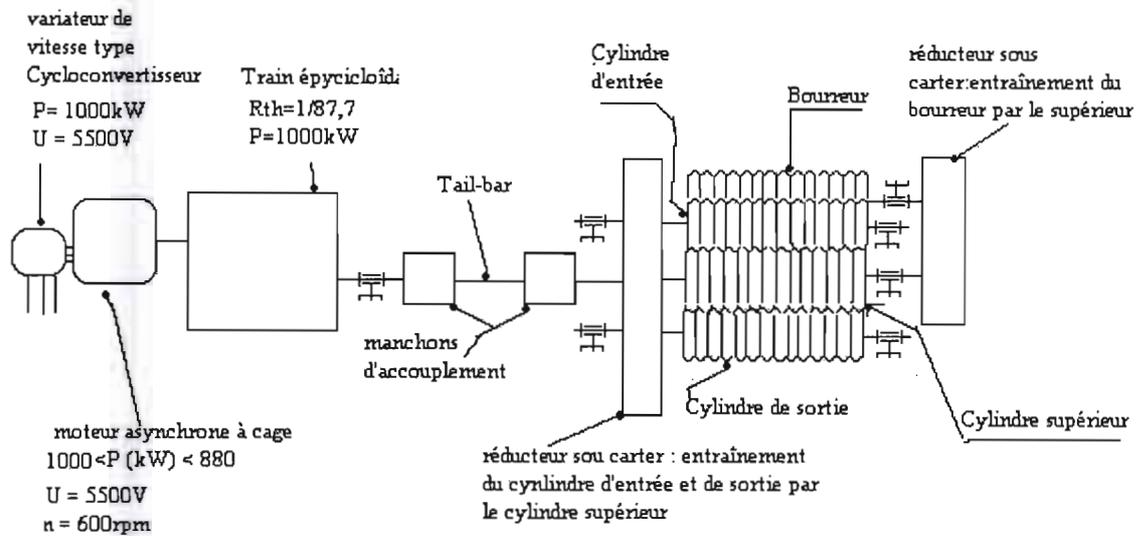


Figure 4- 5 : Schéma de la solution de substitution de l'entraînement du moulin.

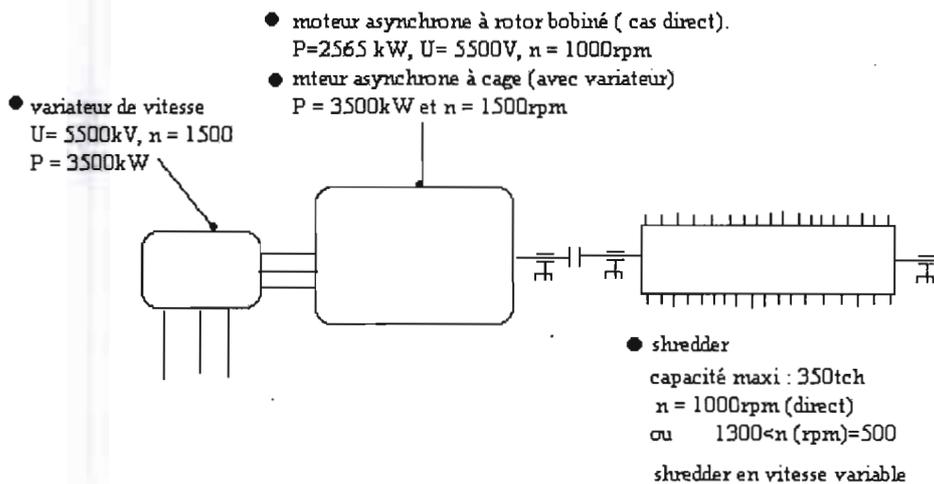


Figure 4- 6 : Schéma de la solution de substitution de l'entraînement du Shredder.

## 4.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons :

- décrit les modes de fonctionnement du Shredder ;
- décrit les modes de fonctionnement du moulin ;
- déterminé les puissances absorbées par le Shredder et le moulin en fonction des objectifs de production fixés ;
- déterminé les spécifications techniques des moteurs, variateurs de vitesse et réducteurs des broyeurs (moulin et Shredder ;
- enfin, en dernière partie, donné les schémas des solutions de substitution retenues.

L'analyse des schémas des figures 4.6 et 4.7 nous permet de noter la simplicité de ces derniers. En effet les systèmes sont devenus moins encombrants et plus propres.

Autres avantages notés :

- non nécessité d'affecter du personnel pour la conduite des moteurs ;
- facilité de maintenance ;
- bâtiment du moulin moins chaud et plus propre ;
- contrôle de l'énergie consommée.

Dans le prochain chapitre, nous étudierons la rentabilité de la substitution des commandes mécaniques actuelles par les commandes préconisées dans ce chapitre.

## CHAPITRE 5 : ÉTUDE DE LA RENTABILITÉ DU PROJET

---

### 5.1. Étude économique des solutions de substitution retenues pour le service moulin

#### 5.1.1. Introduction

L'analyse différentielle pour le remplacement des immobilisations prend en compte ce qui suit :

- coûts variables annuels des nouveaux et des anciens équipements ;
- durée de vie prévue du nouvel équipement ;
- coût du nouvel équipement ;
- montant de la vente du vieil équipement ;
- le flux monétaire annuel en coût.

Cette partie nous permet de calculer les coûts économiques de la solution mécanique et de la solution électrique.

Les immobilisations consistent essentiellement au remplacement :

- pour le Shredder : de la turbine, du réducteur et des accessoires
- pour le 6e moulin : de la turbine, des réducteurs et des accessoires.

Les coûts sont essentiellement de deux natures. Nous avons les coûts fixes et les coûts variables

#### a) Coûts fixes

Ce sont surtout les coûts d'investissements.

1. Coût d'achat des moteurs, réducteur et variateur (y compris le coût du transport ; stock de pièces de rechanges non compris) ;
2. Coût du génie civil ;

Etude économique des solutions

3. Coûts divers

- Coût d'installation ;
- Coût pour le démarrage et le test.
- Coût formation personnel d'exploitation et d'entretien éventuel

b) Coûts variables

1. Coût de consommation d'énergie (vapeur) ;
2. Coût consommation d'huile ;
3. Coût de maintenance annuelle ;
4. Coût pièces de rechanges et d'usure ;
5. Coût de maintenance spécialisée.

**Cette étude sera faite d'après pour un tonnage égal à la moyenne des tonnages annuels des cinq dernières années : 199tch.**

La partie théorique a été mise dans les annexes pour ne pas encombrer le document. On y retrouve aussi les tableaux des états des sorties de pièces de rechanges, des états des coûts de maintenances réalisées au niveau des moulins.

Les valeurs monétaires sont évaluées en Franc CFA. Pour ne pas encombrer les tableaux nous avons décidé d'omettre ces unités.

**5.1.2. Calcul de l'investissement total**

**Shredder**

Tableau 5 - 1 : Investissement total pour le projet du Shredder.

ELEMENT	MONTANT	POURCENTAGE (%)
moteur et démarreur	116 768 000	82
génie civil	5 000 000	4
Divers	20 000 000	14
total investissement pour Shredder	141 768 000	100

**Moulin**

Tableau 5 - 2 : Investissement total pour le projet du moulin.

ELEMENT	MONTANT	POURCENTAGE (%)
Moteur	39 819 200	9
Réducteur	262 400 000	61
Variateur	101 024 000	23
génie civil	10 000 000	2
Divers	20 000 000	5
total investissement pour moulin	433 243 200	100

**5.1.3. Amortissement des investissements**

L'amortissement comptable d'un bien d'investissement est la répartition systématique de son montant amortissable en fonction de sa durée d'utilisation.

Tableau 5 - 3 : Période d'amortissement des immobilisations.

	Catégorie d'amortissement	Période d'amortissement minimale (en années)
1	ordinateurs et matériel de bureau, appareils de mesure et de contrôle, etc.	4
1.a)	voitures de tourisme	4
2	autobus, machines et équipement, camions et tracteurs	5
3	structures métalliques, moteurs, produits métallurgiques, machines et équipement pour la métallurgie, navires, monte-charge, moteurs électriques, etc.	10
4	oléoducs et gazoducs, conduites d'eau, piliers, cheminées	20
5	bâtiments (usines), ponts, routes, tunnels, stations hydrauliques, téléphériques	30
6	bâtiments (hôtels, centres administratifs, d'affaires, commerciaux)	50

Donc la période d'amortissement de nos machines sera de 10ans, d'où un taux d'amortissement de 0,1%, si nous utilisons l'amortissement linéaire. Cette méthode d'amortissement permet de répartir équitablement dans le temps la charge de notre achat.

**Pour le Shredder**

Tableau 5 - 4 : Amortissement des investissements pour le Shredder.

ANNEE	Annuité	cumul des annuités	coût comptable non amorti
2009	14 176 800	14 176 800	127 591 200
2010	14 176 800	28 353 600	113 414 400
2011	14 176 800	42 530 400	99 237 600
2012	14 176 800	56 707 200	85 060 800
2013	14 176 800	70 884 000	70 884 000
2014	14 176 800	85 060 800	56 707 200
2015	14 176 800	99 237 600	42 530 400
2016	14 176 800	113 414 400	28 353 600
2017	14 176 800	127 591 200	14 176 800
2018	14 176 800	141 768 000	0

**Pour le moulin**

Tableau 5 - 5 : Amortissement des investissements pour le moulin.

ANNEE	Annuité	cumul des annuités	coût comptable non amorti
2009	43 324 320	43 324 320	389 918 880
2010	43 324 320	86 648 640	346 594 560
2011	43 324 320	129 972 960	303 270 240
2012	43 324 320	173 297 280	259 945 920
2013	43 324 320	216 621 600	216 621 600
2014	43 324 320	259 945 920	173 297 280
2015	43 324 320	303 270 240	129 972 960
2016	43 324 320	346 594 560	86 648 640
2017	43 324 320	389 918 880	43 324 320
2018	43 324 320	433 243 200	0

**5.1.4. Coût d'exploitation en énergie**

L'énergie consommée par les machines est constituée essentiellement d'une énergie de vapeur. Celle est produite (comme nous l'avons déjà dit plus haut) par la compagnie grâce à une chaufferie alimentée par la bagasse issue du broyage de canne.

Etude économique des solutions

Tableau 5 - 6 : Prix moyen d'une tonne de fuel et équivalence tonne fuel et tonne de vapeur.

prix maxi tonne de fuel	325000
prix mini tonne	210000
moyenne	267500

1 Tonne de vapeur=	0,07	Tonne de fuel
--------------------	------	---------------

**Pour le Shredder**

Tableau 5 - 7 : Coût moyen de l'énergie consommée par le Shredder.

Année	débit moyen de vapeur en (T/H)	durée de campagne (h)	consommation moyenne annuelle de vapeur en (T)	équivalent en fuel (T)	prix d'une tonne de fuel	coût total
2006-2007	12	4 212	50539	3 610	267500	965 659 714
2005-2006	11	4 714	51851	3 704	267500	990 729 241
2004-2005	10	4 496	44958	3 211	267500	859 015 871
2003-2004	9	4 448	40036	2 860	267500	764 977 450
2002-2003	8	4 433	35468	2 533	267500	677 684 500

moyenne	851 613 355
---------	-------------

**Pour le 6<sup>e</sup> moulin**

Tableau 5 - 8 : Coût moyen de l'énergie consommée par le moulin.

année	débit moyen de vapeur en (T/H)	durée de campagne (h)	consommation moyenne annuelle de vapeur en (T)	équivalent en fuel (T)	prix d'une tonne de fuel	coût total
2006-2007	5	4 212	21058	1 504	267500	402 358 214
2005-2006	4,5	4 714	21212	1 515	267500	405 298 326
2004-2005	4,4	4 496	19781	1 413	267500	377 966 983
2003-2004	4,3	4 448	19128	1 366	267500	365 489 226
2002-2003	4	4 433	17734	1 267	267500	338 842 250

moyenne	377 991 000
---------	-------------

On estime que le rendement actuel du système du moulin et du Shredder est de l'ordre de :

- Pour le Shredder et le moulin avec entraînement par turbine : 60%
- Pour le Shredder et le moulin avec entraînement par moteur : 95%

Nous allons ainsi faire une économie d'énergie de l'ordre de 40%. Ceci va se traduire par

une économie de coût de 40% sur le coût d'exploitation. Donc dans la partie de coût d'exploitation on aura un vide qui se traduit par l'analyse différentielle affectant ses sorties par une économie par rapport à l'ancien système.

### 5.1.5. Calcul des économies de coût

Tableau 5 - 9 : Economie de coût des projets par an.

	montant	
	ensemble Shredder	ensemble moulin bw5
économie d'énergie	340 645 342	151 196 400
consommation d'huile	1 968 628,00	-
dépense pour pièces de rechanges	1 896 600,00	1 182 979,18
dépense de maintenance spécialisée	5 271 686,43	5 535 270,75
Somme	349 782 256,59	157 914 649,92

Nous considérons que les deux alternatives (solutions actuelles et solutions de substitution) ont le même rendement de production

## 5.2. Évaluation de la rentabilité économique des solutions de substitution

Dans les projets d'investissement où il est difficile, voire impossible de connaître les recettes additionnelles générées par les nouvelles immobilisations, les méthodes traditionnelles ne sont pas pertinentes. Tout en sachant ces manquements, nous avons tenus à calculer les valeurs des taux de rendement comptable (TRC) et le délai de récupération du capital investi (DRC), pour avoir des ordres de grandeurs ; maximales dans le cas des DRC et minimales dans le cas des TRC.

Seuls les résultats des calculs de la VAN et des TRE, permettront vraiment de conclure sur la rentabilité des projets.

Ainsi, le calcul des valeurs des critères pour le Shredder sera fait en un premier lieu, par la suite nous ferons les calculs pour le moulin. Nous donnons ci-dessous les formules des différents critères, dont les explications se trouvent dans les annexes [3].

- Taux de rendement moyen (TRC)

$$TRC = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{n}}{I_{moyen}} \quad (5.1)$$

Evaluation de la rentabilité

- Délai de récupération (DRC)

$$DRC = \frac{\text{Investissement} - \text{total}}{\text{cash} - \text{flow} - \text{actuel}} \quad (5.2)$$

- Valeur actuelle nette (VAN)

$$VAN = \sum(\text{cash} - \text{flow} - \text{actualisés}) - \text{investissement} \quad (5.3)$$

- Taux de rentabilité interne ou externe (TRI, TRE)

$$T.R.I = i \dots \text{tel} \dots \text{que} \dots VAN = 0 \quad (5.4)$$

### 5.2.1. Rentabilité du changement de la commande du Shredder

#### A. Méthodes traditionnelles de calcul de la rentabilité du projet du Shredder.

Les méthodes traditionnelles ne tiennent pas compte de l'effet du temps sur les flux. Le tableau suivant nous permet grâce à la méthode du cash flow, de déterminer les bénéfices nets et le cash flow. Les résultats seront utilisés pour le calcul du taux de rendement comptable et du délai de récupération du capital investi.

Tableau 5 - 10 : Calcul des bénéfices nets annuels et du cash flow annuel pour le Shredder

	Elément	Montant année1	montant année 2 à 10
+	économie de coût	349 782 257	349 782 257
+	valeur de revente	65 400 000	0
-	amortissement	14 176 800	14 176 800
=	bénéfice imposable	401 005 457	335 605 457
-	Impôt	100 251 364	83 901 364
=	Bénéfice net	300 754 092	251 704 092
+	amortissement	14 176 800	14 176 800
=	Cash flow	314 930 892	265 880 892

a) *Taux de rendement comptable du projet pour le Shredder*

Le taux de rendement comptable peut être maintenant calculé par la *formule (5.1)*. Nous obtenons :

TRC	18,101
-----	--------

b) *Délai de récupération du capital investi pour le Shredder*

**Avec un investissement de 141 768 000**

Nous pouvons résumer dans le tableau suivant le calcul du DRC

Tableau 5 - 11 : Résumé du cash flow annuel pour le Shredder.

Année	cash flow total	cash flow cumulé	I non récupéré
1	314 930 892	314 930 892	
2			

Le délai de récupération du capital investi peut maintenant être calculé par la *formule (5.2)*. Nous obtenons :

DRC	5	mois
-----	---	------

B. Méthodes dynamiques de calcul de la rentabilité du projet de Shredder.

Nous utiliserons la méthode fiscale pour ce calcul. Le taux d'actualisation considéré est de 10% et l'impôt de 25%, pour une durée d'étude du projet de 10ans.

Tableau 5 - 12 : Valeur actuelle nette du projet du Shredder.

	ELEMENTS	MONTANT	MONTANT NET	VALEUR ACTUELLE
ENTREES	économie de cout	349 782 257	262 336 692	1 099 839 260
	valeur de revente	65 400 000	65 400 000	65 400 000
	EI(A)	12 376 800	3 094 200	12 972 347
SORTIES	investissement	141 768 000	141 768 000	141 768 000
	Van	1 036 443 607		
	coût annuel équivalent (économisé)	39 926 665		

Le taux de rendement externe se calcule avec le tableau de la méthode des cash flow et à l'aide de la formule (5.4). Nous trouvons un **TRI de l'ordre de 347,57%**. Il s'agit en fait d'un taux de rendement externe.

5.2.2. *Rentabilité du changement de la commande du 6ème Moulin.*

La démarche sera identique à celle suivie pour les calculs de rentabilité du Shredder

A. Méthodes traditionnelles de calcul de la rentabilité du projet du moulin.

Tableau 5 - 13 : Calcul des bénéfices nets annuels et du cash flow annuel pour le moulin.

	élément	Montant année1	montant année 2 à 10
+	économie de coût	157 914 650	157 914 650
+	valeur de revente	98 100 000	0
-	amortissement	43 324 320	43 324 320
=	bénéfice imposable	212 690 330	114 590 330
-	impôt	53 172 582	28 647 582
=	Bénéfice net	159 517 747	85 942 747
+	amortissement	43 324 320	43 324 320
=	Cash flow	202 842 067	129 267 067

Evaluation de la rentabilité

a) Taux de rendement comptable du projet pour le moulin

Le taux de rendement comptable peut être maintenant calculé par la formule (5.1). Nous obtenons :

TRC	2,154
-----	-------

b) Délai de récupération du capital investi pour le moulin

Avec un investissement de **433 243 200**

Nous pouvons résumer dans le tableau suivant le calcul du DRC

**Tableau 5 - 14** : Résumé du cash flow annuel et des cumuls pour le Moulin.

Année	cash flow total	cash flow cumulé	l non récupéré
1	202 842 067	202 842 067	230 401 133
2	129 267 067	332 109 135	101 134 065
3	129 267 067		

Le délai de récupération du capital investi peut être calculé par la formule (5.2). Nous obtenons :

<b>DRC</b>	<b>2 ANS</b>	<b>10 MOIS</b>
------------	--------------	----------------

B. Méthodes dynamiques de calcul de la rentabilité du projet de moulin.

Nous utiliserons la méthode fiscale pour ce calcul. Le taux d'actualisation considéré est de 10% et l'impôt de 25%, pour une durée d'étude du projet de 10ans.

Tableau 5 - 15 : Valeur actuelle nette du projet du moulin.

	ELEMENTS	MONTANT	MONTANT NET	VALEUR ACTUELLE
ENTREES	économie de cout	157 914 650	118 435 987	727 737 873
	valeur de revente	98 100 000	98 100 000	98 100 000
	EI(A)	41 644 320	10 411 080	
SORTIES	investissement	433 243 200	433 243 200	433 243 200
	Van	392 594 673		
	coût annuel équivalent (économisé)	24 633 508		

Le taux de rendement externe se calcule en utilisant le tableau de la méthode du cash flow et tout en s'appuyant sur la formule 5.2.

Nous trouvons un **TRE de l'ordre de 33,352%**.

**Tableau 5 - 16 : Résumé sur l'étude financière**

CRITERE D'EVALUATION	PROJET DE REMPLACEMENT DE LA TECHNOLOGIE D'ENTRAÎNEMENT DU	
	SHREDDER	MOULIN
méthodes dynamiques		
VAN	1 554 589 931	392 594 673
coût annuel équivalent (économisé)	97 543 359	24 633 508

### 5.3. Conclusion

Cette partie nous a permis de calculer les économies de coût apportées par les solutions de substitution. Ainsi, le projet pour le remplacement des commandes actuelles du Shredder et du moulin par des Commandes électriques, permet d'économiser respectivement par an : 97 543 359 et 24 633 508. Cependant, ils existent d'autres coûts économisés qu'il est difficile d'évaluer : ils s'agissent des coûts de rémunération des personnels de conduite, des gains de temps, et des gains d'espace.

L'utilisation de la méthode traditionnelle de calcul de rentabilité, bien que donnant ici des résultats très intéressants n'est pas pertinent dans ce genre de projet de changement d'immobilisations. Car on n'est pas en mesure de connaître les recettes générées par les nouvelles machines.

Nous nous contenterons cependant des résultats des VAN et des TRE qui sont ici de bonnes valeurs et qui nous permette de conclure que le projet est rentable.

Evaluation de la rentabilité

Le taux de rendement externe se calcule en utilisant le tableau de la méthode du cash flow et tout en s'appuyant sur la formule 5.2.

Nous trouvons un **TRE de l'ordre de 33,352%**.

**Tableau 5 - 16 : Résumé sur l'étude financière**

CRITERE D'EVALUATION	PROJET DE REMPLACEMENT DE LA TECHNOLOGIE D'ENTRAÎNEMENT DU	
	SHREDDER	MOULIN
méthodes dynamiques		
VAN	1 554 589 931	392 594 673
coût annuel équivalent (économisé)	97 543 359	24 633 508

### 5.3. Conclusion

Cette partie nous a permis de calculer les économies de coût apportées par les solutions de substitution. Ainsi, le projet pour le remplacement des commandes actuelles du Shredder et du moulin par des Commandes électriques, permet d'économiser respectivement par an : 97 543 359 et 24 633 508. Cependant, ils existent d'autres coûts économisés qu'il est difficile d'évaluer : ils s'agissent des coûts de rémunération des personnels de conduite, des gains de temps, et des gains d'espace.

L'utilisation de la méthode traditionnelle de calcul de rentabilité, bien que donnant ici des résultats très intéressants n'est pas pertinent dans ce genre de projet de changement d'immobilisations. Car on n'est pas en mesure de connaître les recettes générées par les nouvelles machines.

Nous nous contenterons cependant des résultats des VAN et des TRE qui sont ici de bonnes valeurs et qui nous permette de conclure que le projet est rentable.

## CONCLUSION GÉNÉRALE.

Aujourd'hui, le monde est marqué, sur le plan commercial, par un fort taux d'échange de biens et de services. On parle de villages planétaires.

Depuis une dizaine d'années, avec la notion d'économie de marché et l'ouverture presque totale des frontières, les industriels sont de plus en plus en face d'une rude concurrence venant de tous les horizons. Pour qu'une entreprise puisse survivre dans cette sphère, elle est obligée d'être compétitive. Cela passe en grande partie par une augmentation de la production, à moindre coût, en agissant sur toutes les composantes de la chaîne de production. Ainsi, nous parlerons de l'efficacité globale d'une entreprise.

Ce projet de fin d'études intitulé : « Etude technico économique des systèmes d'entraînement pour la commande du Shredder et du moulin », est né principalement dans le but de contribuer à l'accroissement de l'économie de la Compagnie Sucrière du Sénégalaise (CSS). L'objectif majeur concerne : l'étude des technologies d'entraînement des moulins et du Shredder en vue d'un meilleur choix, à partir du dimensionnement des puissances nécessaires.

Le stage s'est déroulé dans les installations du service moulin de la Compagnie Sucrière du Sénégal.

Le processus de fabrication au niveau de la CSS est vieux d'une trentaine d'années. En effet, l'entraînement des moulins et du Shredder se fait respectivement par l'intermédiaire de turbine à vapeur, couplée à une série de quatre (4) réducteurs puis, un réducteur à engrenages. Ce système obsolète est dû principalement à la disponibilité sur le marché, actuellement, des systèmes d'entraînements robustes et compacts à haut rendement remplissant les conditions de fonctionnement préconisées.

De nos jours, il existe sur le marché des systèmes moins encombrants avec une meilleure efficacité. Ce constat nous a poussé à aborder cette étude pour montrer la faisabilité technique et la rentabilité économique.

Au début de notre étude, nous sommes revenus sur l'histoire de la canne et sur une présentation de la CSS. Ce qui est essentiel pour nous imprégner des spécificités des entreprises sucrières. Ainsi, nous avons fait l'état des lieux sur les techniques d'entraînement existantes. Notons pour information que le moteur d'entraînement, constitue l'appareil le plus important dans la chaîne cinématique d'entraînement.

## Conclusion générale

De cette étude il est ressorti que les moteurs asynchrones à cage constituent de loin la référence en matière d'entraînement au niveau des moulins, surtout dans les domaines où n'existaient que les turbines à vapeur et les moteurs à courant continu. Cela est dû principalement au développement fulgurant de l'électronique de puissance et des convertisseurs statiques.

Le chapitre quatre, pilier du projet, a permis de recalculer les puissances nécessaires à fournir. En effet face à un programme d'augmentation de la production de canne et du sucre établi par le CSS, ce redimensionnement en énergie s'avérait nécessaire.

Par ailleurs, l'établissement du modèle de fonctionnement à débit constant pour le Shredder a permis, du fait de la non disponibilité d'indicateurs des puissances consommées, de déterminer la production réelle. Les tables récapitulatives de puissances obtenues par les méthodes empiriques et les méthodes expérimentales ont permis de faire un choix sécuritaire et optimal.

La finalité de ce projet étant sa réalisation, les spécifications techniques des appareils de commande du service moulin ont été données : celles-ci concernent le moteur, le variateur et le réducteur de vitesse.

L'étude se termine par un calcul de rentabilité économique. Elle est basée sur des commandes de matériels déjà faites par l'entreprise, mais sur la documentation existante et sur des estimations. L'exploitation des résultats a confirmé que le projet de remplacement des commandes mécaniques actuelles par une commande électrique est plus rentable.

Nous terminerons nos conclusions sur une série de recommandations pour contribuer à la bonne marche de la Compagnie Sucrière Sénégalaise.

## **RECOMMANDATIONS**

1. Procéder au remplacement de la technologie de commande du Shredder et du moulin par la technologie préconisée dans le document.
2. Procéder à l'augmentation de la capacité du moulin, notamment en augmentant les dimensions des cylindres.
3. Procéder à la régulation de la commande assurant l'entraînement du Shredder.
4. Prévoir la mise en place d'appareils de mesure permettant d'indiquer les consommations d'énergie.
5. Mettre en place une stratégie visant à diminuer le recours externe de "spécialistes moulins".
6. Appliquer de manière stricte les procédures de conduite et de maintenance des appareils du service Moulin préconisés par les constructeurs, les fabricants ou les fournisseurs.

### Bibliographie

- [1] AZILINON, D. (2004). *Thermodynamique Classique*. Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar.
- [2] BOURGEOIS, R. *Memotech electrotechnique*. collection a.capliez 6e edition educativre.
- [3] BÜHLER, H. *réglage de systemes d'electronique de puissance* (éd. volume1 theorie). Presse Polytechnique et Universitaire Romande.
- [4] DEME, S. (2007). *Hydraulique et lubrification*. Notes de cours, EPT Thiés.
- [5] DESSOUDE, M. Moteurs asynchrones. Choix et problèmes connexes. Dans *Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique* (pp. D 3 490,22pages).
- [6] DIAGNE, B. (2002). *Etude des Conditions d'exploitation des moteurs electriques sur le site acides Daroul des Industries Chimiques du Sénégal (ICS)*. Projet de Fin d'Etudes, ESP Thiés.
- [7] **E.HUGOT. *La sucrerie de cannes. Technique et Document Lavoisier.***
- [8] GROUPE FCB. (1994, juillet). Notice de Maintenance et d'Exploitation d'un Shredder Type Sullivan.
- [9] NIANG, M. (2007). *Specification technique des appareils moulin*. Rapport de Stage de maîtrise, ESP Thiés.
- [10] SARR, N. (2007). *Gestion de projets d'Ingenierie: Méthodes et Outils*. Notes de Cours, EPT Thiés.
- [11] SOW, O. (2006). *Thermodynamique Appliquée*. Notes de cours, EPT Thiés.

### Wébliographie

- [1] *Amortissement comptable*. (s.d.). Récupéré sur Wikipedia, l'encyclopédie libre: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Amortissement\\_comptable](http://fr.wikipedia.org/wiki/Amortissement_comptable).
- [2] *Canne à Sucre*. (s.d.). Récupéré sur Wikipédia logiceil libre: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Canne\\_%C3%A0\\_sucre](http://fr.wikipedia.org/wiki/Canne_%C3%A0_sucre).
- [3] *Electrotechnique et Electronique de Puissance, Etude d'un Système Industriel: Sucrierie de Bois de Rouge, agrégation session 2004*. (2004). Consulté le 12 2007, sur Réseau National des Ressources en Electrotechnique: [http://www.iufmrese.cict.fr/concours/2004/AgInt/AgInt2004SujetESIoptionBannexes1\\_9.pdf](http://www.iufmrese.cict.fr/concours/2004/AgInt/AgInt2004SujetESIoptionBannexes1_9.pdf).
- [4] Institut Français du Pétrole. (s.d.). *Economies d'énergie en raffinage et pétrochimie*. Récupéré sur e-book: <http://books.google.com/books?id=o9up7XL8encC&pg=PA35&lpg=PA35&dq=equivalence+tonne+vapeur+et+tonne+de+fuel&source=web&ots=enJo41KcgV&sig=KNX-lLuz93xRx8ptkssYcGQKzm0>.
- [5] *La sucre à canne*. (s.d.). Consulté en avril 2008, sur <http://pagesperso-orange.fr/lameca/dossiers/canne/>.
- [6] *Le choix des investissements*. (s.d.). Récupéré sur Missimo.com: [http://www.missimi.com/spip/IMG/pdf/VANetTRI\\_RB.pdf](http://www.missimi.com/spip/IMG/pdf/VANetTRI_RB.pdf).
- [7] *Moteurs et charges*. (s.d.). Récupéré sur schneider automation: [http://www.automation.schneider-electric.com/as-guide/FR/pdf\\_files/asg-3-moteurs-et-charges.pdf](http://www.automation.schneider-electric.com/as-guide/FR/pdf_files/asg-3-moteurs-et-charges.pdf).
- [8] *Train épicycloïdal*. (s.d.). Récupéré sur Wikipedia logiciel libre: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Train\\_%C3%A9picyclo%C3%AFdal](http://fr.wikipedia.org/wiki/Train_%C3%A9picyclo%C3%AFdal).
- [9] *Variateur de vitesse*. (s.d.). Récupéré sur energie.arch: <http://www-energie.arch.ucl.ac.be/CDRom/ascenseurs/equipements/ascequariateurvitesse.htm>.

## Annexes

ANNEXE 1 : DESCRIPTION DU PROCESSUS PAR L'IMAGE .....	I
ANNEXE 2 : EPURE ROTOR – TAMBOUR - TRANSPORTEUR .....	II
ANNEXE 3 : CRITÈRE DE RENTABILITÉ DE PROJET DE CHANGEMENT DE MACHINE .....	III
ANNEXE 4 : COÛT MOYENS PIÈCES DE RECHANGE DE LA TURBINE DU MOULIN .....	VIII
ANNEXE 5 : COÛT MOYEN PIÈCES DE RECHANGE DE LA TURBINE SHREDDER .....	IX
ANNEXE 6 : COÛT DE MAINTENANCE SPECIALISEE AU NIVEAU DU SERVICE MOULIN. ....	XI
ANNEXE 7 : RÉPARTITION DES COÛTS DE MAINTENANCE SPÉCIALISÉE.....	XII

**Annexe 1** : description du processus par l'image.



Figure 1 : champ de canne



Figure 2 : Canne à sucre



Figure 3 ; Décharge de canne



Figure 4 : Chargement des Tables



Figure 5.a : le Shredder



Figure 5.b : le Shredder



Figure 6 : réducteur du Shredder



Figure 7 : vue des réductions



Figure 8 : vue de la turbine moulin



Figure 9 : cylindre de moulin



Figure 10 : le filtre contreshear



### Annexe 3 : Critère de rentabilité de projet de changement de machine

#### ➤ Introduction

Cette partie concerne l'étude des coûts de fonctionnement actuel et d'investissement sur la technologie utilisée.

Lors des décisions d'investissement, l'information nécessaire pour le choix entre plusieurs solutions de rechange, va au delà des données fournies dans les états financiers, et implique les revenus et les coûts prévisionnels.

Dans cette analyse des chiffres prévisionnels, seuls certains changements sont à prendre en compte : on considère que ce qui ne change pas n'est pas pertinent. Aussi, on a donné le nom d'*analyse différentielle* ou *marginale* à cette analyse. Notons également que les coûts antérieurs ne sont pas pertinents à l'analyse d'investissement : on les appelle les *coûts irrécupérables*.

Par ailleurs, les décisions d'investissement en capital affectent généralement les opérations qui s'étendent sur un certain nombre d'années et exigent un engagement des fonds à long terme.

Pour qu'une décision d'investissement soit «rentable», la somme des surplus monétaires dégagés par l'investissement (cash flow) doit permettre de :

- récupérer la mise de fonds initiale ;
- rémunérer le capital investi, c'est-à-dire découvrir les intérêts des capitaux engagés selon la méthode des intérêts composés.

#### ➤ Les méthodes et les critères d'évaluation de la rentabilité d'un projet

Parmi les méthodes de calcul de rentabilité nous avons la **méthode** du **cash flow** et la méthode **fiscale**. De même, dans les calculs pour le choix des investissements, deux méthodes sont régulièrement utilisées par les entreprises :

##### **1. Des méthodes traditionnelles ou statiques ;**

Elles ne prennent pas en considération du temps, paramètre essentiel de la décision d'investissement. Il s'agit :

Critères de rentabilité d'un projet d'investissement

- a. Méthode du taux moyen de rentabilité, appelée aussi méthode comptable ;
- b. Méthode du délai de récupération du capital investi.

**2. Des méthodes dynamiques.**

Elles sont aussi appelées : méthodes des flux monétaire actualisés. Il s'agit :

- a. Valeur Actuelle Nette ;
- b. Taux de Rentabilité Interne ou externe (TRI, TRE).

**A. Descriptif sur les méthodes traditionnelles de calcul de rentabilité**

**1. Méthode du taux de rendement moyen (TRC)**

Le taux de rendement moyen est calculé en divisant le revenu net annuel moyen par l'investissement moyen. On accepte les projets dont le taux de rendement comptable est supérieur à une norme (souvent le rendement sur les actifs totaux de la compagnie).

En comparant des projets, le taux de rendement moyen le plus élevé est choisi, mais la considération pour le risque est faible. Cette méthode est généralement employée pour déterminer des propositions d'investissement dont la durée de vie est courte, par conséquent, il n'est pas essentiel d'utiliser la valeur actuelle nette. L'avantage de cette méthode est sa simplicité, mais ignorer la valeur de l'argent dans le temps est son inconvénient majeur. De même, elle n'est pas très pertinente dans l'évaluation de la rentabilité d'un projet ou on ne connaît pas les recettes.

$$TRC = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{n}}{I_{moyen}}$$

(A.1)

**2. Délai de récupération (DRC)**

Le délai de récupération ou la méthode de remboursement de la mise de fonds mesure le nombre d'années nécessaires à la récupération d'un investissement en capital. Il est calculé en divisant l'investissement original par les flux monétaires cumulatifs net annuels, ou, si ces flux sont inégaux, on ajoute les flux nécessaires jusqu'à atteindre le montant de l'investissement initial. D'une façon générale, plus la période de remboursement est courte plus l'investissement est meilleur. Un inconvénient de cette méthode est qu'il ne tient pas compte des flux monétaires au delà de la période de remboursement puisque les propositions

### Critères de rentabilité d'un projet d'investissement

avec de plus longues périodes de récupération peuvent s'avérer plus profitables à long terme. La méthode est employée par des entreprises avec des problèmes de liquidité ou de gros risque. Elle n'est pas non plus, comme la méthode du taux de rendement comptable, très pertinente dans les projets où on ne connaît pas les recettes.

$$DRC = \frac{\text{Investissement} - \text{total}}{\text{cash} - \text{flow} - \text{actuel}} \quad (\text{A.2})$$

## B. Descriptif sur les méthodes dynamiques (ou méthodes des flux monétaires actualisés)

La valeur actuelle nette et le taux de rentabilité interne sont toutes les deux des méthodes où les flux monétaires résultant d'un investissement sont actualisés et prennent ainsi en compte la valeur de l'argent dans le temps en actualisant, c.-à-d., en prenant la valeur actuelle de tous les futurs flux monétaires. Les deux méthodes exigent un *taux d'actualisation* ou un coût du capital. Ce taux est influencé par un certain nombre de facteurs tels que la présence du risque, de la possibilité d'emprunter, de la rentabilité relative, du taux moyen de rentabilité désiré, de la nature du projet et du but des investissements en immobilisations ou en capital.

### 1. Valeur actuelle nette (VAN)

La valeur actuelle nette est la somme des flux monétaires futurs actualisés moins l'investissement initial.

$$VAN = \sum(\text{cash} \_ \text{flow} \_ \text{actualisés}) - \text{investissement} \quad (\text{B.1})$$

Tous les projets dont la valeur actuelle nette (VAN) est positive sont acceptables. Lorsque des projets alternatifs sont en concurrence, on opte pour celui qui a la plus forte valeur nette actuelle. Un index ou ratio est déterminé en divisant la valeur actuelle nette par l'investissement initial afin de comparer des projets de tailles différentes avec l'investissement initial.



Critères de rentabilité d'un projet d'investissement

**2. Taux de rentabilité interne ou externe (TRI, TRE)**

Le taux de rentabilité interne, également appelé le taux d'actualisation, est le taux pour lequel la valeur actuelle nette est égale à zéro ; c'est-à-dire, que la somme des flux monétaires futurs actualisés pour prendre en compte la valeur de l'argent dans le temps est égale à l'investissement initial pour ce taux particulier. Ce taux de rentabilité interne est comparé au taux d'emprunt des capitaux ou au taux minimal toléré. S'il est supérieur à ces taux, le projet est accepté. Lorsque des projets alternatifs sont comparés avec le projet dont le taux de rentabilité interne est le plus élevé, ce dernier est choisi. Le calcul du taux interne (externe) exige une approximation et en général, on l'obtient par interpolation grâce au calcul de différentes valeurs actuelles nettes, ou grâce à l'utilisation d'une calculatrice financière ou d'un ordinateur.

$$T.R.I = i \dots tel \dots que \dots VAN = 0 \quad (B.2)$$

**C. Problèmes de l'analyse de l'investissement en capital**

Un certain nombre de facteurs compliquent l'analyse des investissements en capital. Il s'agit notamment de l'inflation, des impôts, d'évaluations incorrectes des flux monétaires et de la possibilité d'opter pour le crédit-bail au lieu d'acheter.

**1. Rationnement du capital**

Le rationnement du capital ou contrainte de capital signifie qu'il n'y a pas de capital suffisant pour les projets avec le plus grand potentiel de bénéfices. Les projets sont initialement évalués pour voir s'ils rencontrent le premier critère du délai de récupération minimum ou le taux moyen de rendement exigé. Si les résultats ne sont pas déterminants, les projets sont soumis à la technique de la valeur actuelle nette. Les propositions qui ont répondues à tous les critères financiers sont alors soumises à une analyse non financière.

Critères de rentabilité d'un projet d'investissement

---

**2. Budget des dépenses d'investissement**

Une fois que les propositions de dépenses d'investissement ont été approuvées, un budget de dépenses d'investissement est préparé. Des procédures pour contrôler et faire le suivi des dépenses devraient également être mises en place. Les budgets de dépenses d'investissement permettent de comparer les résultats réels aux prévisions.

**3. Type d'investissement du projet**

Les investissements peuvent être classés selon leur objectif.

- a) L'investissement de capacité ou d'expansion, a pour but d'augmenter la capacité de production de l'entreprise en ajoutant par exemple des unités de production que ce soit d'un produit déjà existant et dans ce cas c'est une expansion quantitative ou d'un nouveau produit et dans ce cas c'est une expansion qualitative.
- b) L'investissement de remplacement ou de renouvellement, a pour but est de maintenir l'activité à son niveau actuel. C'est l'investissement de prédilection en période de crise en remplaçant par exemple un équipement usé ou obsolète par un autre nouveau.
- c) L'investissement de modernisation ou de productivité, a pour but est d'accroître la productivité en introduisant des équipements modernes et perfectionnés.
- d) Il peut aussi prendre une forme stratégique, son but est alors d'assurer le développement de l'entreprise

## Annexe 4 : Coût moyens pièces de rechange de la turbine du moulin

DATE	DESIGNATION	QTE	MONTANT (en euro)
14/01/2002	SET SCREW SECU	1	77
15/01/2002	VERROU DE DECLENCH	1	112,81
08/09/2002	CARBON RING STOP RE	6	15,82
29/10/2002	GOUPILLE FENDUE, ACI	2	12
29/10/2002	VIS SIX PAN CREUX SA	4	67
<b>SOMME</b>			<b>284,63</b>
05/11/2003	ELEMENT DE MESURE P	1	48,272
24/12/2003	SET SCREW SECU	1	77
<b>SOMME</b>			<b>125,272</b>
23/09/2004	CARBONE D'ECHAPPEM	5	122,765
23/09/2004	RESSORT DE CBN ECHAP	10	89,866
23/09/2004	RLT BIL, 1 RG (55X12	1	6,46
28/09/2004	VIS TH ACIER CLASS	24	1,637
28/09/2004	ECROU H, ACIER CLASS	24	359
<b>SOMME</b>			<b>579,728</b>
22/03/2005	ROULEMENT (28996350	2	4,16
22/03/2005	ROULEMENTS	1	10,016
22/03/2005	VIS SANS FIN REP 49	1	632,551
22/03/2005	CARBONE D'ECHAPPEM	5	122,765
29/03/2005	ARBRE CLAPET CANEL	1	442,37
29/09/2005	COUSSINET ADMISSION	1	823,155
29/09/2005	COUSSINET ECHAPPEM	1	355,019
29/09/2005	COARBOE D'ECHAPE	10	256,054
29/09/2005	COUSSINET ADMISSION	1	823,155
29/09/2005	COUSSINET ECHAPPEME	1	355,019
28/11/2005	COUVERT.I/P 4/20MA-	1	306,59
27/12/2005	COUSSINET ADMISSION	1	823,155
27/12/2005	COUSSINET ECHAPPEME	1	355,019
<b>somme</b>			<b>5309,028</b>
10/09/2006	TRIP FINGER REP 196	1	29,58
10/09/2006	VERROU DE DECLENCH	1	1112,81
10/09/2006	JEUX DE JOINTS POUR	1	35,441
14/09/2006	GOUPILLE ELASTIQUE	10	133
14/09/2006	GOUPILLE ELASTIQUE	10	140
24/09/2006	VIS TH ACIER CLASS	20	1,118
24/09/2006	ECROU H, ACIER CLASS	20	232
09/10/2006	JOINT DE BRIDE 1MM	14	182,804
11/10/2006	VIS TH ACIER CLASS	10	197
<b>SOOME</b>			<b>2063,753</b>
20/03/2007	JOINT DE BRIDE 1MM	14	182,804
13/06/2007	KLINGERIT 1500X1000	1	62,649
13/06/2007	KLINGERIT 1500X1001	1	76,53
13/06/2007	VIS TH INOX	16	1,712
13/06/2007	ECROU H, INOX	16	963
20/06/2007	JOINT SPITRAL PN64 V	14	19,034
25/06/2007	BANDE LATTYGRAF E2	1	15,516
18/09/2007	CARBONE ADMISSION	5	186,127
18/09/2007	CARBONE ECHP	5	135,487
21/09/2007	HUILE SUPER ROUTE	10	13,75
23/09/2007	TRESSE LATTYGRAPH69	1	60
23/09/2007	TRESSE LATTYGRAPH69	1	40
20/10/2007	VIS TH ACIER CLASSE	20	734
<b>SOMME</b>			<b>2490,609</b>
<b>TOTAL</b>			<b>10853,02</b>
<b>moyenne</b>			<b>1808,836667</b>

## Annexe 5 : Coût moyen pièces de rechange de la turbine Shredder

JEU DE JOINT POUR	41,5
VIS 6 PANS CREUX TE	29,375
RONDELLE GROWER, ACI	4
COUSSINET D'ECHAPPEMENT	1156
GARNITURE D'ARRET	1965,573
RESSORT ANNEAU CARBONE	52,6119
RESSORT DE CARBONE ECHAPPEMENT	8,9865
CARBONE DIAPHRAGME1	42,6875
TETON D'ARRET ECHAPPEMENT	7,5
CARBONE D'ECHAPPEMENT	20,32175
ANNEAU D'ETENCHEITE	39,60166667
CARBONE DIAPHRAGME	41,056
BLOC TIGE DE CLAPET	821,341
AXE LEVIER REGULATEUR PN	21,35
ACCOUPEMENT FLEXIBLE	137,137
RONDELLE PLATE, ACIER	6
CLAVETTE VIS SANS FIN	55,333
VIS CARREE HEXAGONALE	44,7
DEGRIFOIL	3,5915
PATE A RODER FINE	5,899
TUBE COLLE CYANOACR	7,964
HUILE DTE HEAVY MEDIUM	197,184
POCHETTE DE RECHANG	35,736
ROULEAU DE TOILE VO	6,6485
TOLE STRIEE 3000X15	58,551
TUBE NOIR S/SDURE L	1,66 ou 0,85216
RECHARGE BOUTEILLE	15,287
RECHARGE BOUTELLE AC	21,157
CIRCLIPS	4
ACCOUPEMENT TSCHAN C	46,533
TRESSES LATTYGRAF 6	77,178
TRESSES LATTYGRAF 61	102,119
BTE TRESSE LAT DIAM	121,255
TUBE DE PATE SILVER	41,817
JOINT KLINGERITE AR	3,6801
RUBAN ADHESIF PEINT	1,07
CARBONE ADMISSION	66,022
BANDE LATTYGRAF E2	18,17
CONNECTING OD REP9	138,93
PATTE DE LIAISON	359,761
VIS TH INOX	0,400766667
VIS TH ACIER CLASSE	0,053866667
ECROU H, INOX	0,1004
ECROU H, ACIER CLASS	11,6
JOINT SPIRALE PNG4	2,327325581
JOINT SPIRALE VTF 3	10,17336
KLINGERIT 1500X1000	46,813
TIGE DE SOUPAPE/PLA	348,478
PISTON REP, 08	1050,766
TIGE FILETEE, ACIER	1,082
COUDE 90 FF 1"	397
RACCORD UNION FF 1"	1,208
ROULEAU TEFLON	138,3333333
COUDE MF 90° 1"	0,517666667
JEU DE JOINT TORIQUE	62,527
COUSSINET BUTEE GV	2066,2645

ANNEE	DEPENSE
2002	6394,596
2003	1175,124
2004	1324,338
2005	2200,137
2006	1792,285
2007	2277,109
2008	5818,025

moyenne	2997,373429
---------	-------------

en moyenne on dépense chaque année sur la turbine

en pièces de rechanges une somme de 2997,373429 euros



## Annexe 6 : COÛT de maintenance spécialisée au niveau du service moulin.

DA	PRESTATAIRE	MONTANT	DATE	prestation
101672	Alain merveille	1033132,28	30/09/2007	révision et entretien turbine Shredder moulin
101996	Alain merveille	12053209,9	30/09/2007	révision et entretien turbine Shredder moulin
101672	fcbl	6461176,45	20/07/2007	prestation spécialiste moulin
101485	fcbl	5842609	20/03/2007	prestation d'un spécialiste pour l'expertise batterie des moulins
101218	fcbl	7329007,56	31/01/2007	prestation d'un spécialiste moulins pour la supervision du démarrage de la campagne 2006/2007
100951	fcbl	6612046	10/11/2006	prestation d'un spécialiste moulin pour la supervision du démarrage de la campagne
100764	fcbl	4972154,06	10/09/2006	prestation évolution de batterie de moulins fcbl
100477	gemco	19678710	10/07/2006	travaux effectués sur les turbos t38 et Worthington s6
96563	fcbl	21121815	10/08/2003	prestation d'un spécialiste entretien préventif et audit
96246	fcbl	3737642,99	10/05/2003	réparation ensemble servo moteur
96155	fcbl	3323734,12	10/03/2003	mission préventif audit externe de la batterie moulins
95927	fcbl	4257160,93	20/02/2003	ensemble servo moteur à réparer
95926	fcbl	1849798,74	10/01/2003	boite étanche à réparer
94515	fcbl	15510103,3	31/05/2002	mission d'assistance technique et de supervision de travaux de réhabilitation de moulins BW
94402	fcbl	145048904	20/01/2002	rechem de 07 arbres moulin bw, jeu de 3 rechemis fcbl, rechemis d'un bourreur P/moulins, rechea
94523	fcbl	1630053,15	10/12/2001	montage roue ailetée s/arbre pignon
93842	fcbl	26590500	30/06/2001	mission d'assistance technique de mr.joel Legrand
93798	fcbl	5796000	10/06/2001	recha pour turbo reduc t38 demi cyl sup ref.15708-25 demont des redres existants
92833	dresser rand	7851805,29	10/04/2001	remise en état worthington type s6-s/n us - 29567ctu-17525
93151	fcbl	2397000	10/02/2001	prestat de service M.Legrand spécialiste pour expertise et mise au point de la batterie de moulins
93152	fcbl	34260000	20/01/2001	enchemisage de 3 cylindres de moulin bw
93080	fcbl	88000000	31/12/2000	rechem s/arbres comprenant l'expertise de l'arbre fourn et emmanchement d'une che en fon
92316	fcbl	2098000	20/12/2000	rep roue turb fcbl t38 roue double ailetée endom 1° r confect et mont. De ailettes neuves equil dyn
92441	dresser rand	1710000	30/09/2000	remise en état d'un redresseur pour turbine type t2ra ref, r630773
92526	fcbl	32108000	30/06/2000	prestation de service atelier de broyage+formation personnel d'encadrement et celui de l'alimen
	somme	461272563		
	moyenne	65896080,4		

**Annexe 7 : Répartition des coûts de maintenance spécialisée.**

turbo réducteur Shredder	8	%		5 271 686,43
turbos réducteurs moulins (5)	42	%		27 676 353,76
turbo réducteur fcb	5	%		3 294 804,02
batterie moulin	35	%		23 063 628,14
autres	10	%		6 589 608,04
				-
somme	100	%		65 896 080,39