

**Amélioration du fonctionnement par une revue de l'exploitation des
chaudières de la SN-SOSUCO**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN
INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT- INGENIEUR
2IE
OPTION : ENERGIE ET GENIE DES PROCEDES INDUSTRIELS**

Présenté et soutenu publiquement le juin 2012 par

Razack MOUSSA

Travaux dirigés par : Pr. Yézouma COULIBALY, Chef UTER-GEI-Fondation 2IE

Mr : Maixent Roch BASSOLET, Directeur d'Usine SN-SOSUCO

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr. Yézouma COULIBALY

Membres et correcteurs : Maixent Roch BASSOLET

Gildas TAPSOBA

Promotion [2011/2012]

REMERCIEMENTS

Nous tenons au terme de notre formation de Master d'ingénierie option énergie à prouver notre gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à cette formation.

Pour ce faire, nous saisissons l'opportunité que nous offre la rédaction du présent mémoire pour adresser du fond du cœur toute notre reconnaissance aux responsables de l'UTER GEI, et à tout le corps professoral de la Fondation 2IE.

En l'occurrence au Pr. COULIBALY Yezouma, pour son encadrement tout au long de ce mémoire, à ing. Gildas TAPSOBA

Nous remercions également :

M. Maixent Roche BASSOLET Directeur de l'usine SN-SOSUCO, notre maître de stage, pour son encadrement et ses conseils fructueux

M. YARO, et toute l'équipe de la chaufferie de l'usine

M. NABOLÉ Ulrich, pour son aide inestimable dans la réalisation de ce mémoire

M. POUSGA Kaboré, pour ses corrections et orientations constructives

MM. KONE, secrétaire direction générale SN-SOSUCO pour toute l'attention dont elle a fait preuve à notre égard dans l'entreprise.

Je ne saurais terminer sans mentionner tout le personnel de l'usine et mes amis de classe

Que le tout puissant les en rétribue !

DEDICACES

Je dédie ce mémoire

- *A Maixent Roche BASSOLET*
- *A tout le personnel de la BID*

➤ *A mes parents :*

Mon père MAMA D. Moussa et ma mère HASSANE Hawa, pour l'encadrement et toute l'attention dont j'ai pu bénéficier de leur part.

➤ *A toute la famille Bakò*

➤ *A tous mes frères & amis*

RESUME

Le présent rapport porte sur l'évaluation de l'efficacité des chaudières à tube d'eau sur base du pouvoir calorifique supérieur PCS. Cette méthode d'évaluation est basée sur une étude complète de la combustion suivie d'un bilan énergétique des chaudières. Ce bilan énergétique a permis de révéler l'influence de l'excès d'air, de l'humidité de la bagasse, de la température de l'eau alimentaire sur l'efficacité des chaudières.

Ensuite, le calcul du rendement exergetique des chaudières et des turbines a été effectué pour analyser la performance de ces deux équipements principaux du circuit de vapeur.

Enfin, nous avons proposé le dessiccateur à bagasse et l'automate de régulation de pression pour améliorer l'efficacité des chaudières et optimiser la production de vapeur. La mise en œuvre simultanée de ces deux solutions permettra à l'entreprise d'être entièrement autonome vis-à-vis du réseau SONABEL. Les coûts de ce projet sont résumés dans le tableau suivant :

	Situation de référence 1 172T/J	solution Dessiccateur + automate 1 500T/J
Débit bagasse (Tonne/h)	17	24
Humidité bagasse (%)	49,8	30
TOTAL VAPEUR DISPONIBLE (en T/h)	54	55
Turboalternateurs	33	33
Turbo-moulins	15	15
Détendeur	9	9
Dessiccateur rotatoire	0	1
Totale consommation réelle		
Gain en vapeur (T/an)	-	31 968
Surplus Energie en kWh	-	2 459 076
Gain financier du surplus énergie vapeur pour (6 mois) (en FCFA)	-	300 000 000
Gain sur fuel pour 6 mois	-	31 000 000
Gain sur le temps d'arrêts moulin	-	65 000 000
Gains en efficacité		
Gain en efficacité chaudière N°1 (%)	65,4	81
Gain en efficacité chaudière N°2 (%)	64,6	81
Gain en efficacité chaudière N°3 (%)	67,8	81,5
Gain financier pour une campagne du projet:	-	396 000 000
Coût d'investissement en FCFA TTC	-	166 000 000
Temps de retour sur investissement (TRI en mois)	-	5

Mots clés: efficacité, Chaudière, PCS, bagass

ABSTRACT

This master thesis is relative to the evaluation of the efficiency of the water-tube boilers on the basis of higher calorific value HCV. This method of evaluation is based on a complete study of combustion followed by an energy balance of the boilers. This energy balance made it possible to reveal the influence of the excess of air, of the moisture of bagass, the temperature of the feeding water on the efficiency of the boilers.

Then, the calculation of the output exergetic of the boilers and the turbines was carried out to analyze the performance of these two principal pieces of equipment of the vapor circuit.

Lastly, we proposed the desiccator with bagass and the automat of regulation of pressure to improve efficiency of the boilers and to optimize the production of vapor. The simultaneous implementation of these two solutions will make it possible for the company to be entirely autonomous from the electricity of SONABEL.

Key words: efficiency, boiler, HCV, bagass

LISTE DES ABREVIATIONS

SONABEL : Société Nationale d'Electricité du Burkina

SN-SOSUCO : Nouvelle Société Sucrière de la Comoé

NOMENCLATURE :

Nomenclature	Désignation	Unité
e	excès d'air	%
V°F	pouvoir fumigène sec en combustion stœchiométrique	Nm3
V°A	pouvoir comburivore en combustion stœchiométrique	Nm3
VA	pouvoir comburivore avec un excès d'air	Nm3
VF	pouvoir fumigène sec	Nm3
VFH	pouvoir fumigène humide	Nm3
Nm3	Normal mètre cube	
W	teneur en oxygène	%
τ O2	taux d'oxygène dans l'air	%
P	taux de purge	%
R	Pourcentage de vapeur condensée retournant à la bêche alimentaire	%
C	facteur de concentration dans l'eau de chaudière du constituant de l'eau	%

	d'appoint	
E	humidité	%
Vap	vapeur	
Pol	teneur en sucre	%
Fibre	teneur en fibre bagasse	%
Cendre	teneur en cendre bagasse	%
%eau alimentaire	pourcentage d'eau alimentaire	%
Coeff combustion	coefficient de combustion	
Pc	pertes par chaleur sensible	Kj/kg
Qu	Chaleur utile	Kj/kg
PCI	pouvoir calorifique inférieur	Kj/kg
PCS	pouvoir calorifique supérieur	Kj/kg
T°cFumées après éco	Température des fumées après économiseur	°C
T°vap sortie surch	Température de vapeur en sortie du surchauffeur	°C
To	Température du milieu ambiant	
T°eau avant éco	Température de l'eau avant économiseur	°C
h vap sat	Enthalpie vapeur saturante	
Rc	ratio de combustion	Kg vapeur/Kg bagasse
Eff	Efficiencie des chaudières	%
h	Enthalpie	Kj/kg
S	entropie	KJ/kg°K
M	débit de vapeur en sortie	kg/h
Mi	débit de bagasse	kg/h
Ex	exergie	Kj/kg
ηex	rendement exergetique	

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION GENERALE	10
A.	Contexte	10
B.	Présentation de la structure d'accueil : SN- SOSUCO	10
C.	Problématique.....	12
D.	Méthodologie de travail.....	12
II.	OBJECTIFS DU TRAVAIL.....	13
III.	MATERIELS ET METHODES	13
A.	MATERIELS.....	13
1.	Définition.....	13
2.	Description de la chaudière.....	14
3.	Principe de production de vapeur et de transfert de chaleur au sein des chaudières BR1..	14
4.	Le pupitre de commande	16
5.	Le détecteur du taux d'oxygène.....	17
B.	METHODES	17
1.	Etudes énergétiques.....	17
2.	Etudes exergetiques	20
IV.	RESULTATS.....	21
A.	Etude énergétique.....	21
1.	Bilans énergétiques des équipements du process (de la bagasse à la production de l'électricité).....	21
B.	Analyse de l'utilisation de la vapeur.....	25
1.	La distribution de la vapeur surchauffée.....	25
2.	Consommation de vapeur dans les turboalternateurs et production d'électricité	26
3.	Répartition de la consommation moyenne journalière de vapeur.....	29
4.	Influence des moulins sur le fonctionnement des chaudières.....	29
C.	Remise à niveau du réseau de vapeur et de condensat.....	30
1.	Evaluation des pertes d'énergie.....	30
2.	Optimisation de la production de vapeur : solution 1	32
3.	Optimisation de la production de vapeur : solution 2	34
4.	Optimisation de la production de vapeur : solution 3	35

D.	Evaluation de la performance des chaudières et des turbines	37
1.	Bilan exergétique des chaudières :(source de production de vapeur)	37
2.	Bilan exergétique des turbines :(principale source de consommation de vapeur)	37
E.	Réévaluation de l'efficacité des chaudières	38
V.	ANALYSES DES RESULTATS ET PARAMETRES INFLUENTS.....	38
A.	Analyses des résultats	38
1.	Analyse des résultats de l'étude énergétique	38
B.	Analyses des paramètres influents	39
1.	Paramètres perceptibles à travers le bilan énergétique	39
2.	Paramètres perceptibles à travers le bilan exergétique	41
C.	Analyses de remise à niveau du réseau de vapeur et de condensat	42
1.	Optimisation de la production de vapeur : solution 1	42
2.	Optimisation de la production de vapeur : solution 2	43
3.	Optimisation de la production de vapeur : solution 3	43
VI.	RECOMMANDATIONS.....	44
VII.	CONCLUSION et PERSPECTIVES.....	45
VIII.	BIBLIOGRAPHIE.....	46
IX.	ANNEXES.....	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : récapitulatif du tonnage de cannes broyées et de bagasse produite	21
Tableau 2 : Eléments caractéristiques de la combustion	22
Tableau 3 : Composition élémentaire des fumées de combustion.....	23
Tableau 4 : Variables caractéristiques de la combustion	23
Tableau 5 : Pertes et chaleur utile.....	23
Tableau 6 : Caractéristiques de la bagasse et PCS	23
Tableau 7 : Enthalpies de la vapeur d'eau et grandeurs physiques caractéristiques	23
Tableau 8 : Ratio et Efficience	24
Tableau 9 : Enthalpies des points du cycle de Hirn	31
Tableau 10 : Etude technico-économique de l'installation d'un dessiccateur à bagasse.....	34
Tableau 11: Gains attendus.....	35
Tableau 12: Etude technico-économique de l'installation d'un dessiccateur +automate.....	35
Tableau 13: Aide à décision.....	36
Tableau 14: Rendement énergétique et exergetique	37
Tableau 15: Rendement exergetique des turbines	37
Tableau 16: Réévaluation de l'efficience.....	38

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Organigramme de la SN-SOSUCO de Banfora	11
Figure 2: Situation géographique de la SN-SOSUCO au BURKINA Faso	11
Figure 3: Organisation du mémoire	12
Figure 4: Principe de circulation des gaz dans les chaudières à tube d'eau	15
Figure 5: Schéma descriptif des chaudières BR1.....	16
Figure 6: Bilan exergétique chaudière.....	20
Figure 7: Bilan exergétique Turbine	20
Figure 8: Bilan massique du ballon de distribution de la vapeur surchauffée.....	25
Figure 9: Bilans de consommation de vapeur et production d'électricité	26
Figure 10: Bilan de consommation globale par tonne de canne broyée	28
Figure 11: répartition de la consommation de vapeur dans le procédé.....	29
Figure 12: Effet de la vapeur consommée par les turbo-moulins sur la pression de vapeur produite. 29	
Figure 13: Cycle de Hirn utilisant la turbine CEM.....	30
Figure 14: bilan massique pour l'installation du dessiccateur	33
Figure 15: Influence de l'excès d'air sur l'efficacité des chaudières.....	39
Figure 16: Effet de l'humidité sur l'efficacité des chaudières	40
Figure 17: Effet de la température de l'eau alimentaire sur l'efficacité des chaudières	40
Figure 18: Tube encrassé et tube entartré.....	42

I. INTRODUCTION GENERALE

A. Contexte

L'industrie sucrière nécessite une énorme quantité d'énergie pour l'extraction et la transformation du jus de la canne à sucre. Cette énergie est sous forme d'électricité (pour les moteurs électriques) ou sous forme de vapeur (utilisée dans des turboalternateurs, des turbo-moulins et autres accessoires de la préparation du jus de la canne).

La concentration du jus de la canne ainsi que sa transformation en sucre commercial est une opération qui demande beaucoup de chaleur. Cette chaleur est fournie par la condensation de vapeur à basse pression plus connue comme vapeur d'échappement provenant des turboalternateurs et des turbo-moulins. Ainsi, la vapeur se révèle comme étant le seul fluide caloporteur qui fait fonctionner tous les équipements du procédé de transformation. Dès lors, on comprend l'importance de la production de vapeur pour l'industrie sucrière. Il s'avère donc indispensable d'effectuer un contrôle rigoureux sur la maîtrise du fonctionnement des générateurs de vapeur (chaudières) à travers un bilan des quantités d'énergie intervenant à différents stades de la conversion.

B. Présentation de la structure d'accueil : SN- SOSUCO

La SN-SOSUCO, est une société anonyme d'économie mixte dont le siège social est situé à Banfora dans la province de la Comoé au Sud-Ouest du BURKINA FASO.

Elle a essentiellement pour objet :

- ✓ la culture de la canne à sucre,
- ✓ la fabrication du sucre blond ou raffiné en granulé et en morceaux,
- ✓ le conditionnement et la vente de sucre sur le marché national et à l'exportation,
- ✓ l'expérimentation de nouvelles cultures,
- ✓ la valorisation et la vente des sous-produits du sucre.

Avec un effectif de plus de 3000 salariés, dont 800 permanents, 400 saisonniers et plus de 1800 journaliers, la SN-SOSUCO est le premier employeur privé du Burkina Faso.

L'organigramme de la SN-SOSUCO est représenté ci-dessous :

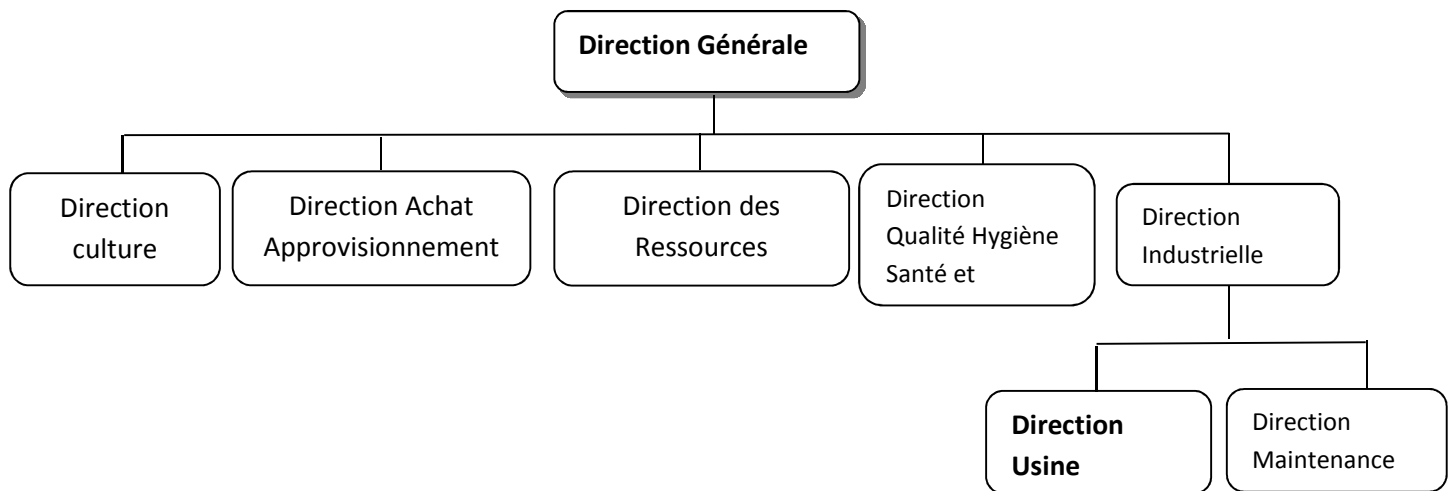


Figure 1: Organigramme de la SN-SOSUCO de Banfora

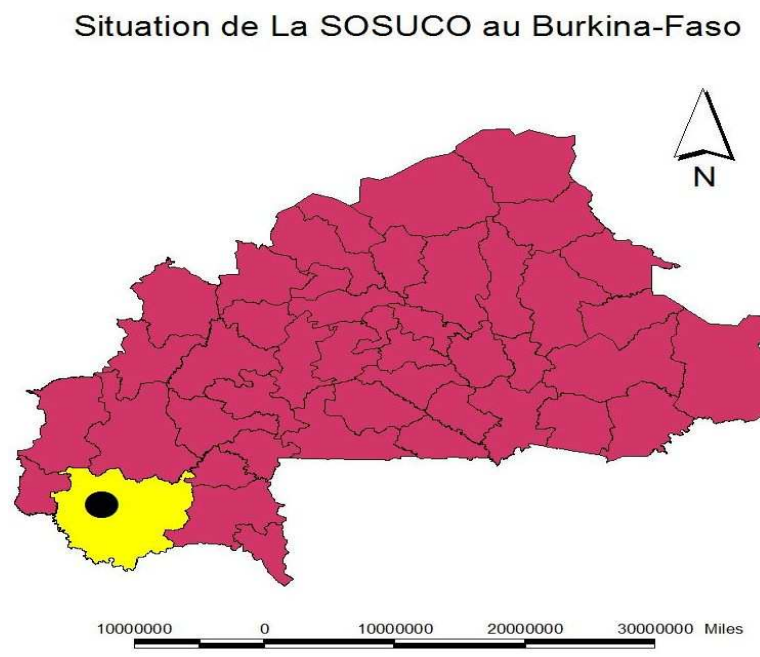


Figure 2: Situation géographique de la SN-SOSUCO au BURKINA Faso

C. Problématique

L'ambition de la SN-SOSUCO est d'améliorer sa productivité. Cependant, cette entreprise est confrontée à certains problèmes de maîtrise du fonctionnement des chaudières. Ces problèmes influencent les procédés de transformation par l'approvisionnement en vapeur.

C'est dans cette perspective que les responsables de la SN-SOSUCO ont recommandé une étude d'évaluation de l'efficacité des chaudières suivie d'une proposition de solutions exploitables pour améliorer le fonctionnement des chaudières et l'utilisation adéquate de la vapeur.

Pour mener à bien cette étude, nous avons suivi les étapes ci-dessous :

- ✓ Effectuer les bilans énergétiques sur les chaudières
- ✓ Evaluer l'efficacité des chaudières
- ✓ Analyser l'utilisation de la vapeur dans les procédés de transformation
- ✓ Evaluer la performance des chaudières à travers un bilan exergétique
- ✓ Proposer des solutions exploitables
- ✓ Réévaluer l'efficacité après application des solutions.

D. Méthodologie de travail

Pour bien développer ce thème, le document présent sera structuré en quatre grandes parties dont le schéma descriptif est le suivant :

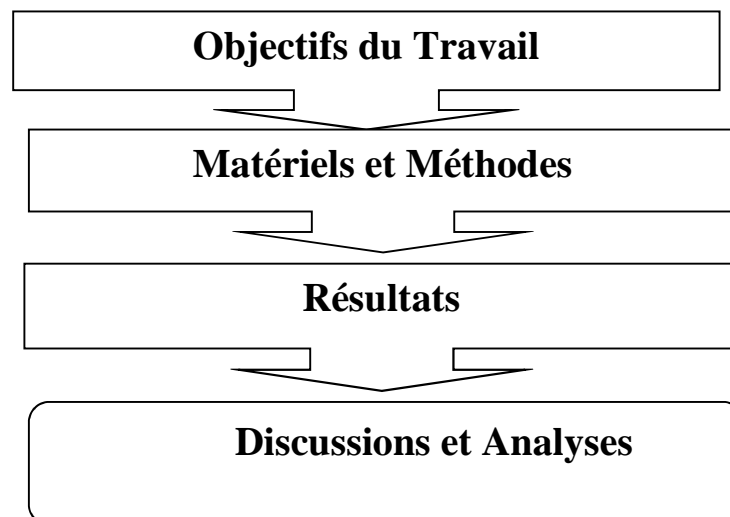


Figure 3: Organisation du mémoire

II. OBJECTIFS DU TRAVAIL

Cette étude a pour objectif d'améliorer l'efficacité des chaudières de la SN-SOSUCO, et proposer des solutions exploitables à moyen terme pour optimiser la production de vapeur et son utilisation adéquate dans les procédés de transformation.

Pour y parvenir, les étapes suivantes seront suivies :

- ✓ Une étude bibliographique sur : les chaudières à tube d'eau, les cycles à vapeur, les turbo-alternateurs et les turbo-moulins
- ✓ Une analyse du mode de fonctionnement du processus de fabrication dans sa globalité
- ✓ Une étude approfondie sur le fonctionnement des chaudières
- ✓ Une analyse du pupitre de commande et du détecteur de taux d'oxygène des fumées
- ✓ Une prise de valeurs du taux d'oxygène des fumées, du débit de vapeur, des pressions, des températures
- ✓ Des échanges avec les ingénieurs de l'usine sur la compréhension et l'utilisation des grandeurs issues du fonctionnement des équipements du procédé de transformation

III. MATERIELS ET METHODES

A. MATERIELS

1. Définition

Une chaudière est un appareil qui permet de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur, (l'eau en général). Du point de vue historique, On en distingue deux types, à savoir : les chaudières à tube de fumées et celles à tube d'eau.

Une chaudière à tube de fumées est constituée d'un grand réservoir d'eau traversé par des tubes dans lesquels circulent les fumées. Tandis que dans le cas d'une chaudière à tube d'eau, c'est l'eau qui circule dans des tubes et les gaz chauds circulent à l'extérieur de ceux-ci.

C'est ce dernier type de chaudière qui constitue l'objet de l'étude actuelle.

2. Description de la chaudière

a) La chambre de combustion ou foyer spreader stoker

C'est dans cette chambre que l'on brûle le mélange « air/ bagasse » en libérant une certaine quantité de chaleur.

L'équipement qui introduit la bagasse comprend un spreader - stoker RILEY- FAMA à projection pneumatique avec des alimentateurs à chaîne équipés de variateurs de vitesse de réglage du débit et d'un plan de grille à barreaux basculants en fonte spéciale. Le basculement se fait par vérins pneumatiques.

b) Réservoir supérieur

L'eau de la bêche alimentaire passe dans un échangeur de chaleur contre-courant (économiseur) et arrive au réservoir supérieur par une ou plusieurs tuyauteries de liaison reliant le collecteur de sortie de l'économiseur au réservoir. Ce réservoir constitue une enceinte de mélange où la phase liquide et la phase vapeur d'eau du générateur se trouvent réunies. Le réservoir supérieur comprend des équipements externes tels que : Event, capteurs de niveaux d'eau, Soupapes de sûreté, Tuyauterie de purge.

c) Réservoir inférieur

Le réservoir inférieur est alimenté à partir du réservoir supérieur au moyen de tubes d'alimentation. Ce sont des tubes du faisceau vaporisateur situés dans la zone de fumées la plus froide. Les deux corps cylindriques sont en tôle d'acier A 52 C 1 de construction soudée, avec fond emboutis comportant chacun un trou d'homme.

d) Equipements accessoires secondaires

L'obtention de la vapeur à une température et une pression requises nécessite la présence de certains équipements secondaires qui sont : économiseur, bêche alimentaire ; pompes alimentaires ; ventilateur de tirage ; ventilateurs d'air de distribution, d'air primaire et d'air de turbulence ; collecteur de vapeur en sortie de surchauffeur ; poste de conditionnement des eaux de chaudières.

3. Principe de production de vapeur et de transfert de chaleur au sein des chaudières BR1

La combustion de la bagasse libère de la chaleur sous forme de gaz très chauds (environ 1100°C). Ces gaz chauds passent à travers les tubes dans lesquels circule l'eau. Ce fluide caloporteur est chauffé jusqu'à son point d'ébullition puis monte dans la partie haute du ballon supérieur. On obtient ainsi un mélange eau/vapeur qui est moins dense et représente

une force motrice naturelle pour créer la circulation de l'eau à travers la chaudière. La vapeur saturée contenue dans le ballon supérieur passe à travers le surchauffeur qui élève sa température et on obtient de la vapeur surchauffée en sortie.

La circulation des gaz est illustrée par le schéma ci-dessous :

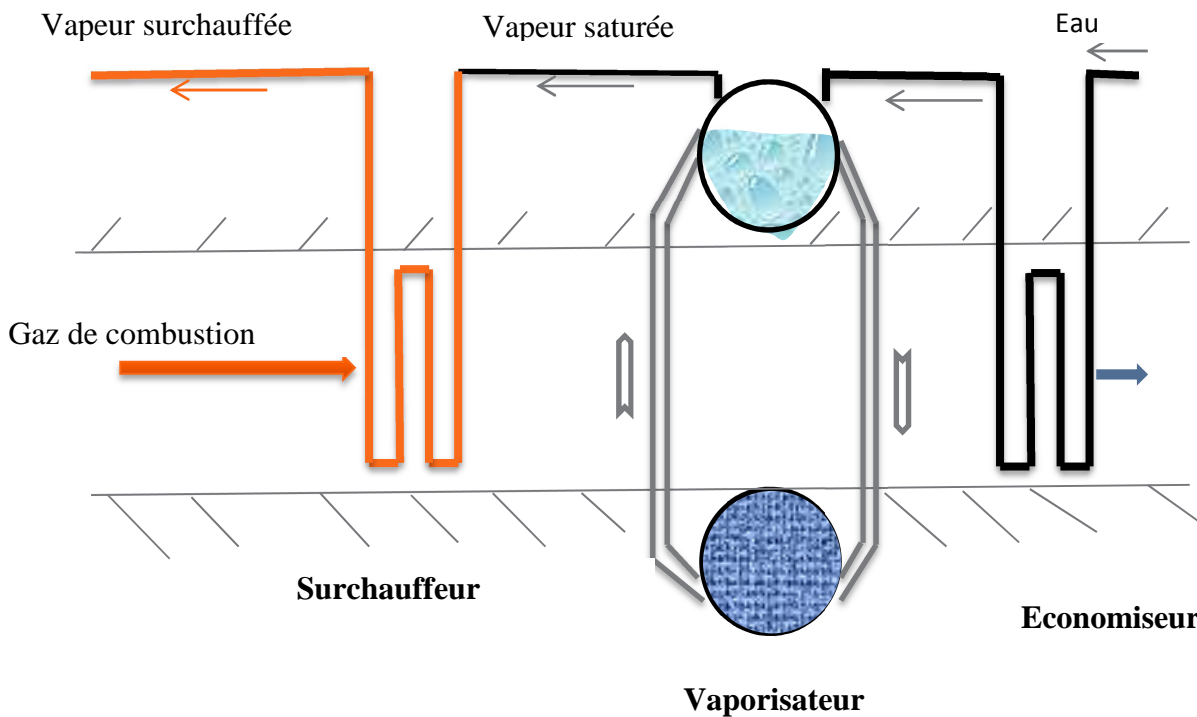


Figure 4: Principe de circulation des gaz dans les chaudières à tube d'eau

Le schéma d'ensemble des chaudières BR1 est représenté ci-dessous :

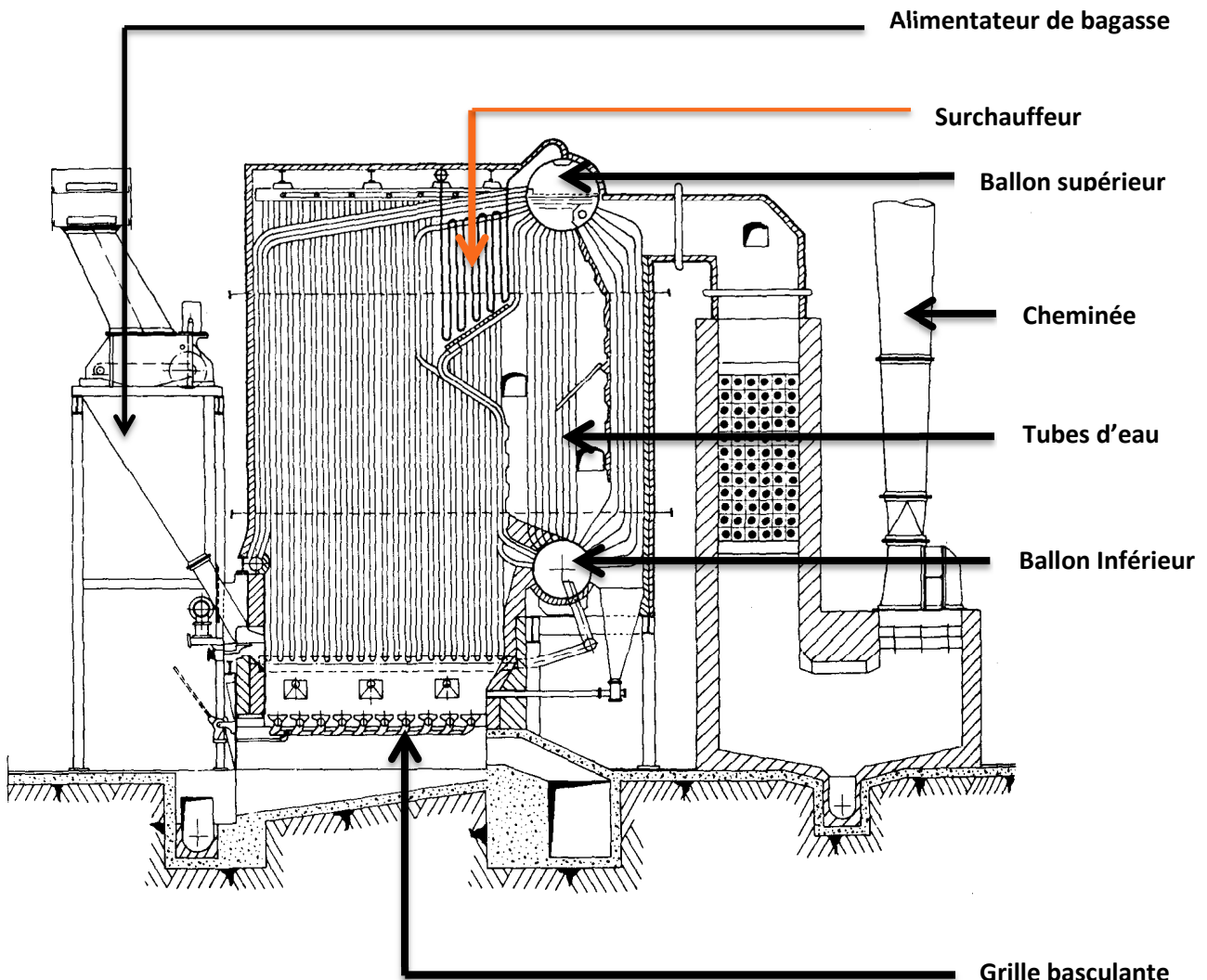


Figure 5: Schéma descriptif des chaudièresBR1

(Source : E.HUGO « la sucrerie de cannes » ; p 948)

4. Le pupitre de commande

Les chaudières sont munies d'un pupitre de commande qui à travers les différentes sondes nous a permis de relever les températures, pressions et débit de vapeur.

Toutes nos mesures ont été faites sur la base des valeurs que les sondes ont permis de lire sur le pupitre. Vue la complexité du procédé, nous n'avons pas pu utiliser d'autres appareils pour vérifier les grandeurs lues sur le pupitre. Nous signalons que la précision des grandeurs lues sur le pupitre est très importante car toutes les décisions seront prises en fonction des résultats

fournis par ces grandeurs. Ainsi, il est nécessaire d'effectuer un entretien de ces différentes sondes.

5. Le détecteur du taux d'oxygène

Les cheminées sont munies de sondes qui permettent d'obtenir le taux d'oxygène contenu dans les fumées lors de la combustion. Nous avons vérifié les valeurs de ce détecteur par les moments d'arrêts où il indique 21% ce qui correspond au taux d'oxygène dans l'air. C'est-à-dire qu'en absence de combustion, l'air qui entre dans la chambre de combustion en ressort inutilisé.

B. METHODES

1. Etudes énergétiques

Toutes les informations utilisées dans le cadre de notre étude seront prises dans les bulletins de suivi de la production et de l'utilisation de vapeur. Les valeurs prises seront obtenues à partir d'une moyenne de la production et de la consommation de la vapeur au cours de la campagne 2011-2012.

a) Bilan énergétique des installations (chaudières, turbo alternateurs, turbo-moulins et détendeur de vapeur)

Cette partie de notre étude vise à établir le bilan de production et de consommation de vapeur. Pour y parvenir, des bilans seront effectués de l'obtention de la bagasse jusqu'à l'utilisation de la vapeur :

- Préparation et extraction du jus

Au niveau de l'unité de broyage, les informations recueillies auprès du laboratoire de suivi de la production, ont permis de réaliser le tableau 1 donnant le tonnage moyen de cannes broyées pour la campagne 2011-2012. Le mois d'Avril 2012 a été choisi comme référence de la prise des données. Notons que, le secteur « préparation et extraction du jus » est composé des sous unités suivantes :

- Coupe-cannes
- Moulins
- La combustion
 - Les chaudières

- Procédure d'évaluation de l'efficacité des chaudières

L'évaluation de l'efficacité des chaudières BR1 peut être faite suivant deux méthodes. La méthode sur base PCS et celle sur base PCI. Cette dernière nécessite l'utilisation d'un analyseur de fumées. L'absence de cet appareil nous a conduit à **la méthode sur base PCS**. Les étapes de cette méthode sont indiquées par les formules suivantes :

- i. Détermination de l'excès d'air e (%)

$$e(\%) = 100 (V^{\circ}F / V^{\circ}A) (w / (\tau O_2 - w))$$

(Source : cours combustion et chaudières 2011 A. Bensakhria)

- ii. Détermination du taux de purge (P en % d'eau d'alimentation)

$$P = (100 - R) / (C - 1)$$

(Document constructeur BABCOCK ATLANTIQUE)

- iii. Détermination des pertes par chaleur sensible dans les gaz de la cheminée : P_c (Kj/kg)

$$P_c = 4,18 \left[(1 - E(\%)/100) \left[(e(\%)/(100+1) \cdot 1,4) - 0,13 \right] + 0,5 \right] \cdot T^{\circ}c_{\text{Fumées après Eco}}$$

(Source : document constructeur BABCOCK ATLANTIQUE)

- iv. Détermination de la chaleur utile : Q_u (Kj/kg)

$$Q_u = 2,326 \left[(7650 - (Pol/100) \cdot 2160) - ((E(\%)/100) \cdot 8730) - P_c \right] \cdot \text{coeff combustion}$$

(Source : document constructeur BABCOCK ATLANTIQUE)

- v. calcul du pouvoir calorifique supérieur de la bagasse : **PCS** (Kj/kg)

$$PCS = 2,326 \cdot [8350 \cdot (\text{Fibre}(\%) - \text{Cendres}(\%)) + Pol \cdot 7110] / 100$$

(Source : document constructeur BABCOCK ATLANTIQUE)

vi. Détermination du ratio de combustion : R_c

La vapeur produite par unité de bagasse se définit comme suit :

$$R_c = \frac{Q_u}{h_{vap\ sat} - 4.18 * \frac{100 * T^{\circ}eau\ av\ Eco}{100 - \%eau\ alim} + 4.18 * \%eau\ alim * \frac{(T^{\circ}vapsortie\ surch - T^{\circ}eau\ av\ Eco)}{100 - \%eau\ alim}}$$

(Source : document constructeur BABCOCK ATLANTIQUE)

vii. Evaluation de l'efficacité

$$Eff = \left[h_{vap\ sat} - 4.18 * \frac{100 * T^{\circ}eau\ av\ Eco}{100 - \%eau\ alim} + 4.18 * \%eau\ alim * \frac{(T^{\circ}vapsortie\ surch - T^{\circ}eau\ av\ Eco)}{100 - \%eau\ alim} \right] * \left(\frac{R_c}{PCS} \right) * 100$$

(Source : document constructeur BABCOCK ATLANTIQUE)

b) Analyse de l'utilisation de la vapeur

Cette partie de l'étude sera consacrée à l'évaluation des quantités de vapeur consommée ainsi que des pertes de vapeur.

- Distribution de la vapeur surchauffée
- Consommation de vapeur par les turbo-alternateurs
- Influence de vapeur consommée par les turbo-moulins sur la pression de vapeur produite

NB : Partant des résultats numériques obtenus, nous présenterons la synthèse du bilan énergétique sous forme de schéma synoptique (allant de la bagasse à la vapeur)

c) Remise à niveau du réseau de vapeur et de condensat

L'objectif sera d'évaluer les pertes dans le cycle à vapeur d'eau, puis de proposer des solutions de réduction de ces pertes. Deux étapes seront suivies pour atteindre cet objectif :

- Evaluation des pertes d'énergie

Dans cette partie, nous déterminerons les pertes d'énergies au niveau des différents points du cycle thermodynamique de la vapeur d'eau. Cette détermination se fera à partir du tracé et de l'analyse du cycle thermodynamique de Hirn.

- Optimisation de la production de vapeur

Nous proposerons une solution technico-économique pour améliorer la qualité du combustible et la régulation du système de fonctionnement, en vue d'optimiser la production de vapeur.

2. Etudes exergetiques

a) Evaluation de la performance des chaudières

Le but est de faire un bilan exergetique sur les chaudières afin d'évaluer leur performance.

- Système considéré : chaudière

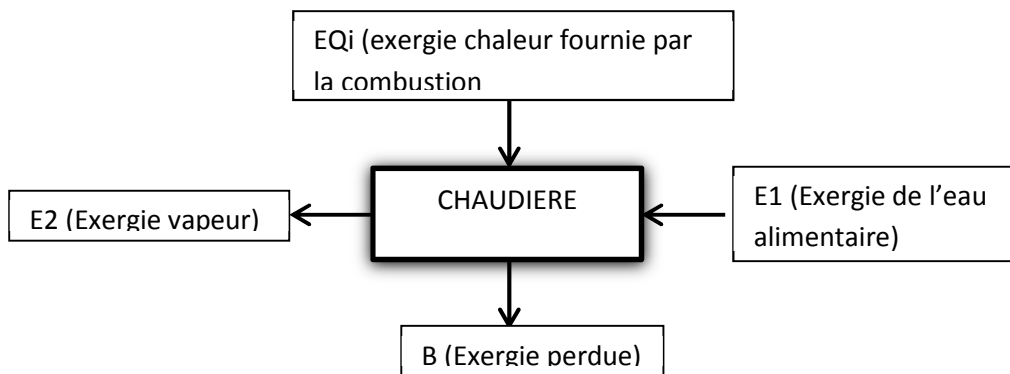


Figure 6: Bilan exergetique chaudière

- Définition des paramètres :

$E_1 = h_1 - T_0 S_1$	$E_2 = h_2 - T_0 S_2$	$EQ_i = PCS * (1 - T_0/T)$	$\eta_{ex} = M (E - E_i) / M_i * EQ_i$
-----------------------	-----------------------	----------------------------	--

(Source : cours Pierre Neveu 2011)

b) Evaluation de la performance des Turbo-alternateurs

- Système considéré : Turbo-alternateur

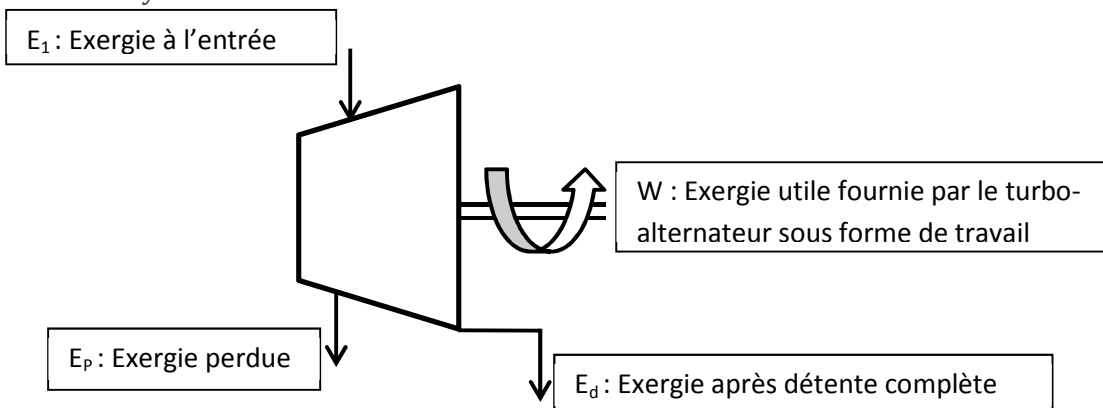


Figure 7: Bilan exergetique Turbine

$$E_s = h_s - T_0 S_d$$

$$\eta_{ex} = W / (E_1 - E_d)$$

(Source : cours Pierre Neveu 2011)

IV. RESULTATS

A. Etude énergétique

1. Bilans énergétiques des équipements du process (de la bagasse à la production de l'électricité)

a) Préparation et extraction du jus

Cette étape a pour objectif d'extraire le jus. Elle est composée de deux sous unités, à savoir : les coupe-cannes (au nombre de 3) dont le rôle est de défibrer la canne et ensuite les moulins (au nombre de 6) permettent de recueillir le jus de canne et la bagasse.

Les résultats obtenus lors de nos investigations au niveau de l'unité de broyage sont résumés dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1 : récapitulatif du tonnage de cannes broyées et de bagasse produite

semaines	Paramètres	Jours						
		jour 1	jour 2	jour 3	jour 4	jour 5	jour 6	jour 7
semaine 1	Cannes broyées (T)	615,14	1871,49	1882,94	1996,84	1604,9	2221,48	1894,07
	Bagasse produite (T)	223,3	885,68	728,44	824,617	659,353	1002,308	837,64
	Humidité bagasse (%)	48,98	49,66	50,67	49,63	50,13	49,72	51,36
	Taux sucre bagasse (%)	3,5	3,43	3,49	3,25	3,64	3,33	3,11
semaine 2	Cannes broyées (T)	1968,59	1875,76	1195,51	1473,18	1479,71	1225,85	0
	Bagasse produite (T)	815,01	820,03	513,65	667,119	645,732	494,72	0
	Humidité bagasse (%)	48,99	49,97	47,8	49,55	50,99	48,28	0
	Taux sucre bagasse (%)	3,07	3,49	3,59	3,15	3,51	2,97	0
semaine 3	Cannes broyées (T)	886,86	754,89	1177,41	207,07	341,51	1536,62	1684,78
	Bagasse produite (T)	291,56	298,69	594,8	126	178,876	696,555	724,35
	Humidité bagasse (%)	49,44	51,71	48	48	49,08	48,28	49,43
	Taux sucre bagasse (%)	3,07	2,53	3,22	3,98	4,04	3,58	3,35
semaine 4	Cannes broyées (T)	1158,42	2076,62	1760,21	1431,7	1060,71	879,11	71,78
	Bagasse produite (T)	595,24	840,35	684,41	646,58	488,302	434,536	28,55
	Humidité bagasse (%)	51,24	50,65	50,11	49,01	50,52	50,3	50,13
	Taux sucre bagasse (%)	3,58	3,28	3	3,38	3,22	3,09	3,36
							Moyenne canne broyée (T)	1 172
							Bagasse produite (T)	507,9
							Taux sucre bagasse:Pol (%)	2,8
							Humidité bagasse E(%)	49,8

La moyenne de canne broyée est de **1 172 T/J** pour une capacité nominale **2400 T/J**. soit un manque à gagner de **1228 T/J**.

b) La combustion

- **Calcul du PCI**

Cette grandeur se calcul à l'aide de la formule ci-dessous :

$$\text{PCI} = 4250 - 4850 \cdot \% \text{Humidité} - 12 \cdot \% \text{Taux sucre}$$

(Source : E.HUGO « la sucrerie de cannes » 2^{ème} Edition)

La bagasse obtenue possède un taux d'humidité de **49,8 %** et une teneur en sucre de **2,8 %** (résultats des données du tableau ci-dessus). Ainsi, on obtient : **PCI = 1 834,36 kcal/Kg, soit PCI = 7,680 MJ/Kg**

Ce pouvoir calorifique inférieur indique le potentiel énergétique de la bagasse qui représente le principal combustible de l'usine de la SN-SOSUCO

- **Caractéristiques de la combustion**

Les résultats qui figurent dans le tableau 2 sont obtenus en utilisant des formules^[1] sur la base de la composition massique élémentaire (en %) de la bagasse^[2] :

%C= 53,1 %H= 6,03 %O= 38,7 %N= 1,25 %MM = 9,3

Tableau 2 : Eléments caractéristiques de la combustion

combustion stœchiométrique VA°	5,040081
Pouvoir comburivore VA (Nm3 air/kg combustible)	7,5601215
volume fumées humides en condition stœchiométrique VFH°	6,272461
Pouvoir fumigène humide VFH (Nm3 fumées / kg combustible)	8,7925015
volume fumées sèches en condition stœchiométrique VF°	4,983301
Pouvoir fumigène sec VF (Nm3 fumées /kg combustible)	7,5033415
Volume H2O dans fumées (Nm3 eau/ kg combustible)	1,28916
Volume oxygène dans les fumées VO2 (Nm3 O2/kg combustible)	0,52920851
Volume CO2 dans les fumées VCO2 (Nm3 CO2/kg combustible)	0,99297
Volume N2 dans les fumées VN2 (Nm3 N2/kg combustible)	5,98249599

- **Constitution élémentaire des fumées de la combustion :**

L'excès d'air admis par le fabricant pour l'alimentation en comburant des chaudières est : e(%) = 36. Ce paramètre très important dans la pratique industrielle permet d'obtenir la composition des fumées ci-dessous :

Tableau 3 : Composition élémentaire des fumées de combustion

% CO ₂	13,2337039
% O ₂	5,60525438
% H ₂ O	1,354075
% N ₂	79,80693
TOTAL	100

Les résultats du tableau 3 indiquent la composition des fumées émises dans l'atmosphère dans le cas où les opérateurs arrivaient à respecter cette instruction du constructeur.

- **Excès d'air e(%)**

Tableau 4 : Variables caractéristiques de la combustion

	Chaudière N°1	Chaudière N°2	Chaudière N°3
Taux d'oxygène dans les fumées(%)	8,2	9,3	6,1
Taux de CO ₂ (%)	12,2	11,1	14,1
Excès d'air utilisé : e(%)	63	78,5	40,5

- **Pertes par chaleur sensible (P_c) et la Chaleur utile (Q_u)**

Tableau 5 : Pertes et chaleur utile

	Chaudière N°1	Chaudière N°2	Chaudière N°3
Pertes P_c (Kj/Kg)	1 234,62	1 307,7	1 161,69
Chaleur utile : Q_u (kj/kg)	5 171,1	5 111,14	5 358,48

- **Pouvoir calorifique supérieur PCS**

Tableau 6 : Caractéristiques de la bagasse et PCS

	Humidité E(%)	Pol : taux en sucre (%)	Fibre (%)	Brix (%)	Cendres MM (%)
	49,8	2,8	46,94	3,56	9,3
PCS (KJ/Kg)	7 773,54				

- **Enthalpies réelles mises en jeu**

L'évaluation du ratio de combustion ainsi que de l'efficacité des chaudières passent par l'utilisation des paramètres de mesure résumés dans le tableau ci-après :

Tableau 7 : Enthalpies de la vapeur d'eau et grandeurs physiques caractéristiques

	Chaudière N°1	Chaudière N°2	Chaudière N°3
Température vapeur saturante sortie surchauffeur (°C)	345	348	334
Pression vapeur saturante surchauffée sortie surchauffeur (bar)	30	30	30
enthalpies réelles KJ/kg	3100	3130	3070
Grandeur physiques caractéristiques			
Température de l'eau avant Economiseur (°C)	92	92	92
Température des Fumées après Economiseur (°C)	186,6	184,9	195,1
Coefficient de combustion	0,82	0,82	0,84
Taux de purge en % d'eau d'alimentation : P(%)	5	5	5

- **Le ratio de combustion et l'efficacité des chaudières**

Tableau 8 : Ratio et Efficience

	Chaudière N°1	Chaudière N°2	chaudière N°3
Ratio (Kg vapeur/Kg bagasse)	1,87	1,83	1,97
Efficience (%)	65,4	64,6	67,8

Le constructeur évalue l'efficacité nominale des chaudières à $\eta_{ch} = 82 \%$ sur base PCI. (Source : document constructeur Fives Cail Babcock). Cette référence ne pourra pas nous servir d'outil de comparaison car la méthode d'évaluation sur base PCI diffère de celle sur base PCS.

Le constructeur n'a pas précisé de valeur nominale sur base PCS. Cependant, il existe des valeurs nominales (annexe 7) prévues par le constructeur qui peuvent être appliquées sur une autre méthode d'évaluation de l'efficacité. Ainsi, nous appliqués ces valeurs nominales sur la méthode PCS décrite ci-dessus pour avoir une valeur d'efficacité qui pourra nous permettre de comparer avec les efficacités obtenues. Cette application a donné une efficacité de **80,03 % sur base PCS**. Cette valeur (80,03%) est un indicateur de comparaison et non une référence du constructeur.

Il convient donc, de souligner qu'il y a d'énormes manques à gagner qui sont de 14,6%, 15,4%, 12,2% respectivement pour la chaudière N°1, N°2, N°3. Ces manques à gagner s'expliquent par des pertes thermiques élevées et le fort taux d'humidité de la bagasse. Pour y

remédier, nous proposons dans la seconde partie de cette étude une solution technique pour optimiser la production de vapeur.

Les chaudières, malgré leur faible efficacité pourraient être aidées si on faisait une bonne utilisation de la vapeur. Ainsi, on effectue les bilans ci-dessous pour analyser l'utilisation de la vapeur.

B. Analyse de l'utilisation de la vapeur

1. La distribution de la vapeur surchauffée

Lors du fonctionnement des chaudières, il y a production de la vapeur surchauffée à 30 bars, 360°C environ. Cette vapeur passe dans le séparateur. Ce passage permet de séparer la vapeur surchauffée des fines gouttelettes d'eau pour obtenir de la vapeur surchauffée sèche. Cette vapeur arrive dans le barillet pour être distribuée. La distribution de cette vapeur s'effectue à travers un réseau de conduites munies de purgeurs. Ainsi, on alimente les Turbo-alternateurs, Turbo-moulins et le Détendeur de vapeur.

Le bilan de vapeur mensuel indique **778,58 T/j** de vapeur produite par les chaudières suite à la combustion de **409 T/j** de bagasse. Cette valeur a été obtenue grâce aux ratios de consommation des chaudières ($R_1= 1,87$; $R_2=1,83$; $R_3=1,97$ Kg vapeur/Kg bagasse). Enfin, le même bilan révèle une consommation totale de **717,61 T/j** de vapeur. On résume le bilan massique au niveau du barillet par le schéma ci-dessous :

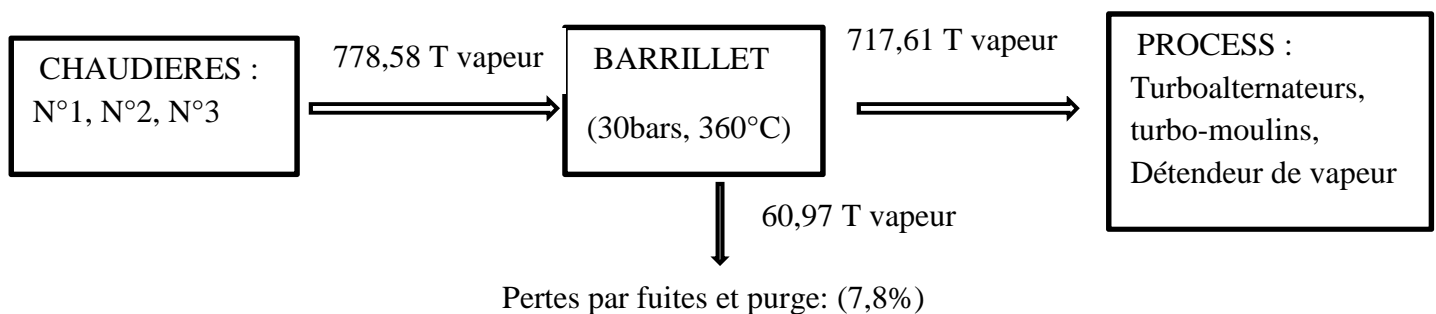


Figure 8: Bilan massique du ballon de distribution de la vapeur surchauffée

2. Consommation de vapeur dans les turboalternateurs et production d'électricité

L'énergie électrique est fournie par les turbines couplées à des alternateurs. L'usine possède trois turboalternateurs de 1,7 MW chacun dont deux sont fonctionnelles.

Par ailleurs, les relevés de consommation de vapeur indiquent qu'une quantité **527,27 T** de vapeur surchauffée arrivent au niveau des turboalternateurs. En utilisant les quantités d'énergie électrique produite par chaque alternateur, on obtient les ratios de consommations des turbines résumés ci-dessous :

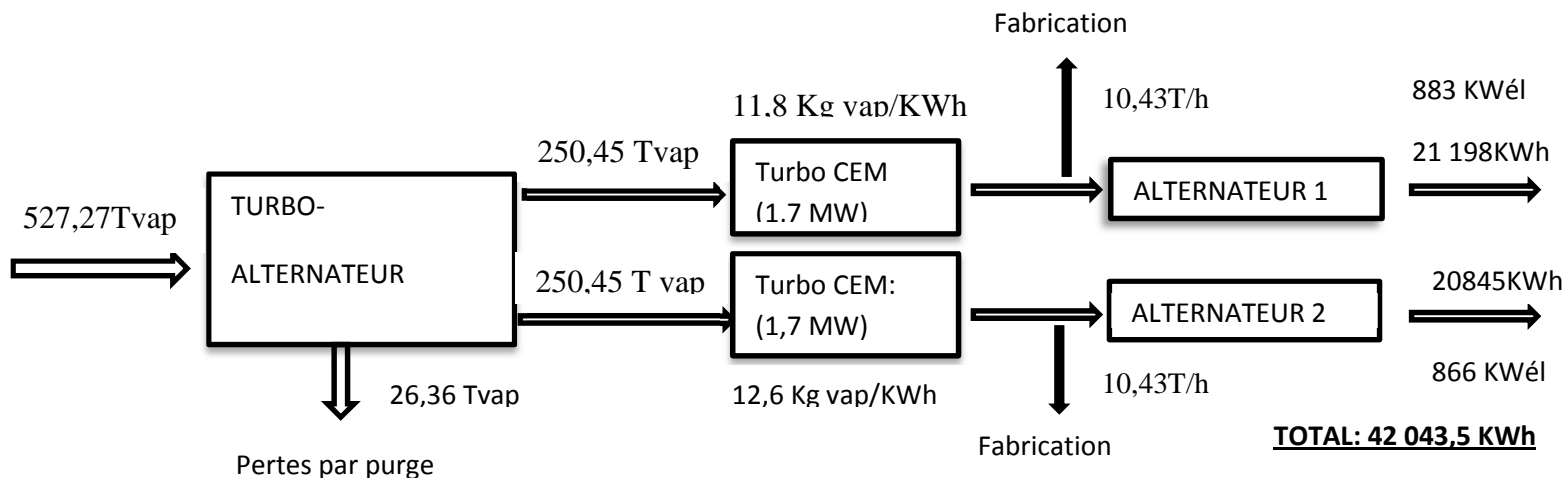
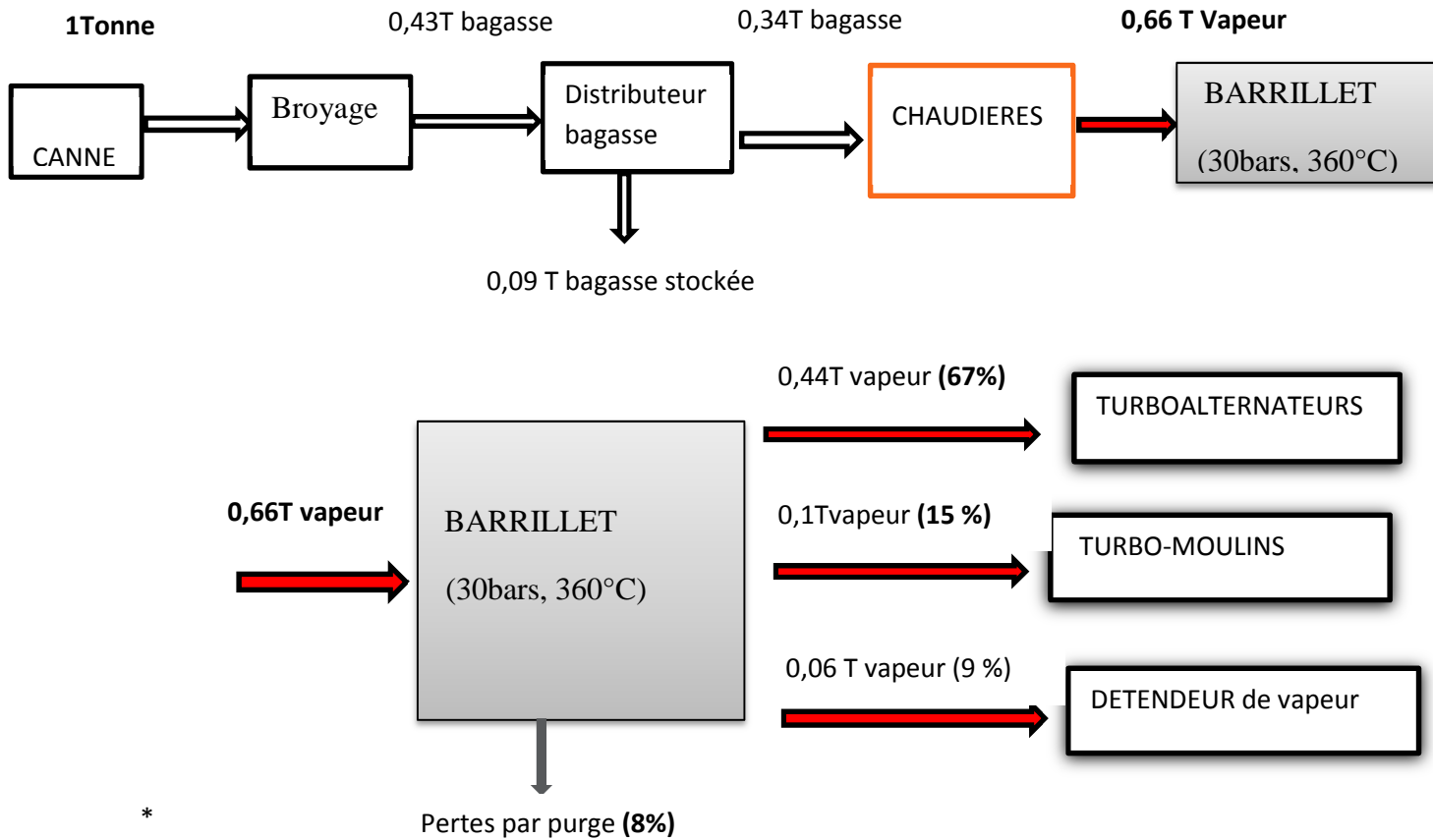


Figure 9: Bilans de consommation de vapeur et production d'électricité

Pour une tonne de canne broyée, la synthèse de consommation de vapeur se résume comme suit :



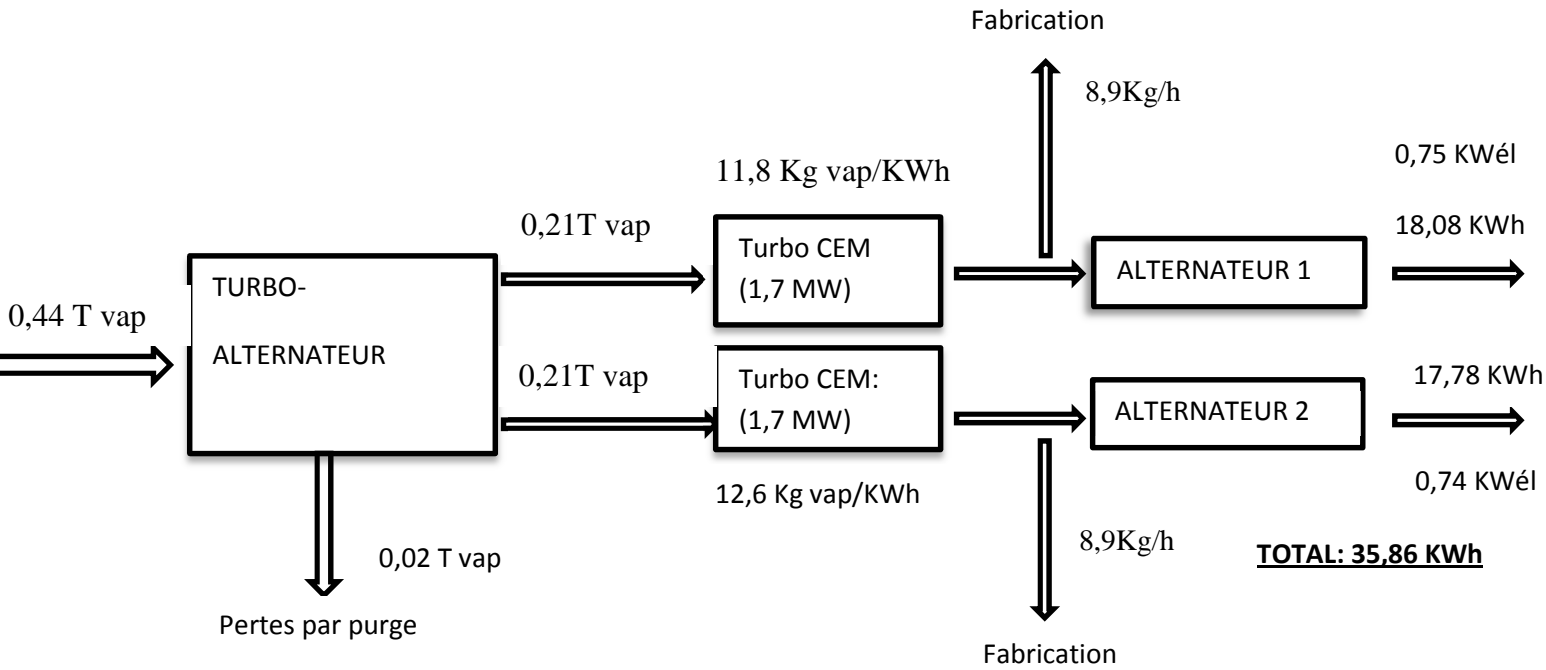


Figure 10: Bilan de consommation globale par tonne de canne broyée

3. Répartition de la consommation moyenne journalière de vapeur

Au cours du fonctionnement de l'usine, la consommation de vapeur est répartie comme suit :

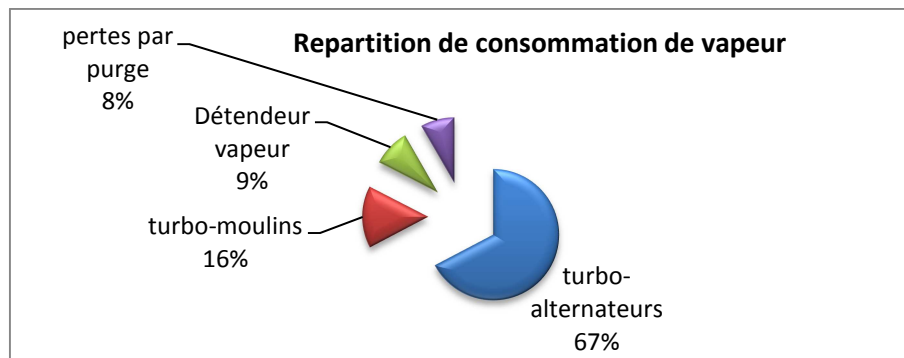


Figure 11: répartition de la consommation de vapeur dans le procédé

4. Influence des moulins sur le fonctionnement des chaudières

Les chaudières sont approvisionnées en bagasse provenant du fonctionnement des moulins. Il arrive des moments où ces moulins font une demande irrégulière de vapeur au cours de leur fonctionnement. Le manque de réactivité des conducteurs de chaudières face à cette situation engendre d'énormes fluctuations de pression de la vapeur produite. Ces fluctuations perturbent le fonctionnement des turboalternateurs, des turbo-moulins et peuvent conduire à leur arrêt définitif. Cet arrêt cause d'énormes manques à gagner pour l'entreprise.

Les données de consommation de vapeur des turbo-moulins ont permis d'illustrer ces fluctuations de pression à travers le graphe ci-après :

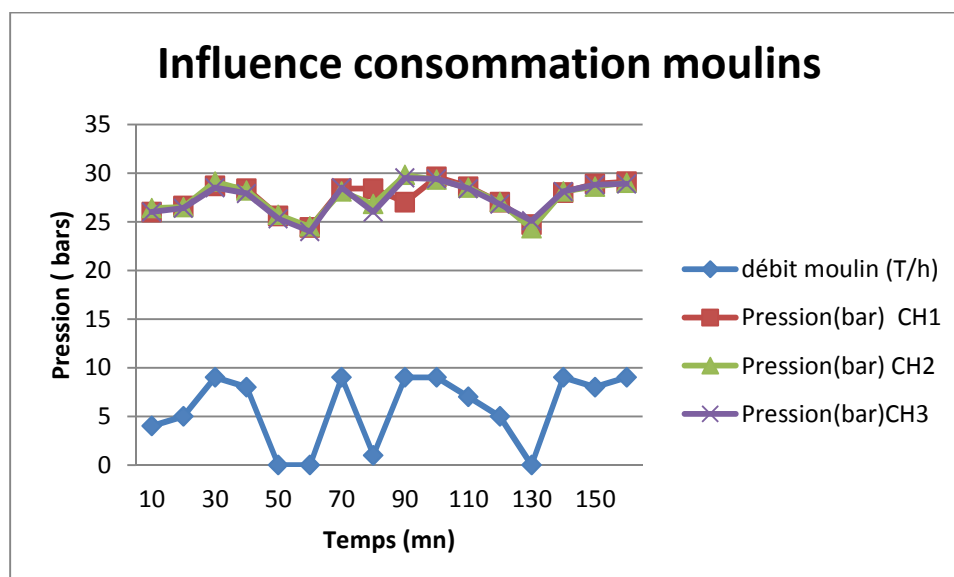


Figure 12: Effet de la vapeur consommée par les turbo-moulins sur la pression de vapeur produite

C. Remise à niveau du réseau de vapeur et de condensat

Le réseau de vapeur et de condensat est le circuit qui rassemble la source de production et la distribution de vapeur. On illustre le circuit de circulation de la vapeur par le schéma qui figure en annexe 2

1. Evaluation des pertes d'énergie

Les turboalternateurs représentent le secteur le plus énergétivore du réseau de vapeur (voir figure 7). Nous présenterons dans cette partie de l'étude les pertes liées au cycle à vapeur.

la Turbine CEM : 1,7 MW

- Le cycle à vapeur d'eau

Le cycle thermodynamique à vapeur d'eau de notre cas d'étude est représenté par le diagramme H-S ci-dessous :

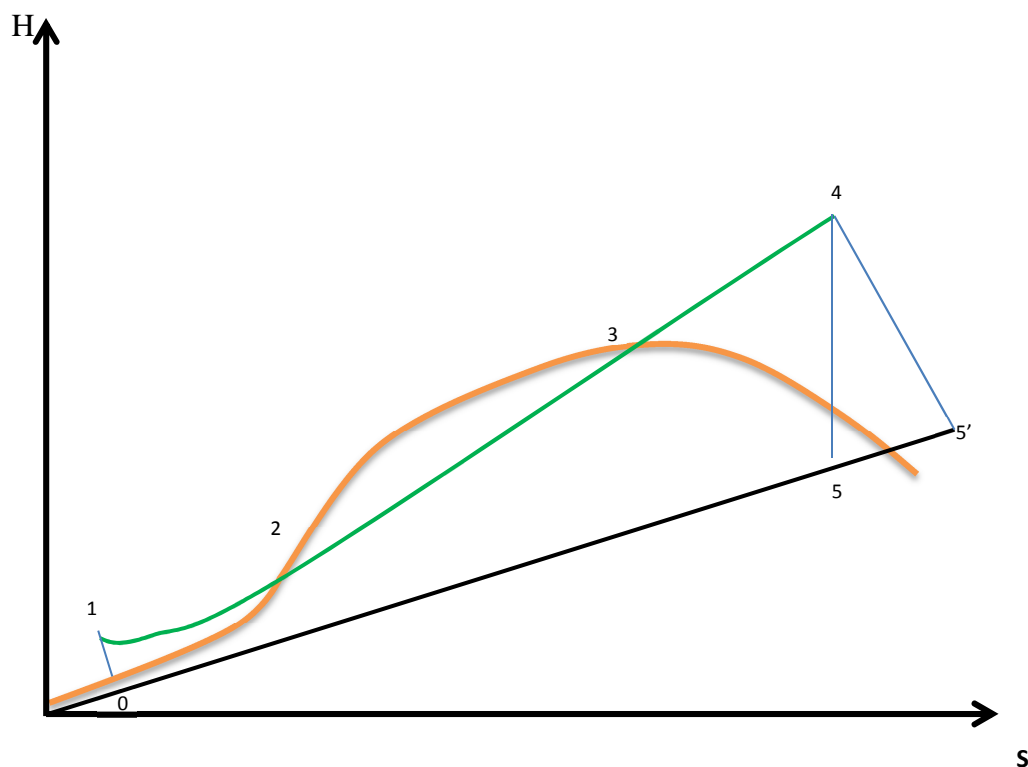


Figure 13: Cycle de Hirn utilisant la turbine CEM

Le tableau ci-dessous donne les valeurs d'enthalpies du cycle.

Tableau 9 : Enthalpies des points du cycle de Hirn

points du cycle	enthalpies (kJ/kg)	Température (°C)	Pression (bar)	Correspondance des différents points du cycle
0	466,9	92	1,5	Entrée pompe alimentaire
1	763,1	180,7	40	Entrée économiseur
2	2805,5	-	30	Entrée ballon supérieur
3	3070	330	30	Sortie ballon supérieur
4	3100	345	30	Sortie surchauffeur
5	2491,37	-	1,5	Détente idéale
5'	2673,95	-	1,5	Détente réelle

Etapas du cycle :	0 à 1	pompage
	1 à 3	vaporisation
	3 à 4	surchauffe
	4 à 5	détente théorique
	4 à 5'	détente réelle

- Evaluation des rendements globaux et pertes

Les Applications numériques nous donnent les résultats ci-dessous :

Rendement thermodynamique du cycle : $\eta_{th} = 25,88 \%$

Rendement interne de la turbine CEM : $\eta_i = 70\%$

Pertes d'énergie dues à l'accroissement d'entropie : Pertes = 100 - $\eta_i = 30 \%$

Le rendement mécanique de la turbine est considéré à : $\eta_m = 85 \%$

Le rendement global est obtenu par le produit des trois rendements η_{th} , η_i , η_m précédemment calculés; on a :

$$\eta_{g \text{ réel}} = 15,39\% \quad ;$$

$$\eta_{g \text{ théorique}} = 30\%$$

2. Optimisation de la production de vapeur : solution 1

La production de vapeur en quantité et en qualité requise nécessite l'utilisation d'une bagasse de qualité pour une bonne combustion. Le taux d'humidité de la bagasse (ici 49,8%) a diminué considérablement l'efficacité des chaudières (tableau 8). Ainsi, nous proposons l'utilisation d'un sécheur de bagasse (dessiccateur à bagasse) d'une capacité de **24T/h**. Le dessiccateur est un appareil destiné à sécher la bagasse provenant des moulins. Il peut augmenter l'efficacité de 54% à 69%, aussi, il permet d'économiser en combustible tout en réduisant la pollution atmosphérique des chaudières. (Source : [9]). Ceci se confirme par le fait qu'une machine à meilleure efficacité pollue moins l'atmosphère qu'une machine à efficacité mauvaise. L'installation de ce sécheur de bagasse conduit les chaudières à produire plus de vapeur à l'aide de peu de bagasse séchée (humidité 30%) que si la bagasse était humide (50% d'humidité). Les charges des ventilateurs seront réduites et on économise ainsi en consommation d'électricité. Ainsi, Les chaudières de par leur fonctionnement réduisent la demande en vapeur tout en améliorant leur efficacité grâce à l'utilisation du sécheur à bagasse.

Le coût d'investissement de ce dessiccateur à bagasse est de **6 000 000 FCFA**. Les marges de gain obtenues par installation du dessiccateur rotatif sont consignées dans le tableau 10

Caractéristiques de l'équipement :

Dessiccateur à bagasse: puissance installée (44 KW)

Capacité du dessiccateur rotatoire : 24 **T/h**

Gain en vapeur : 13 968 T/campagne ; soit **77,6 T/j** ; (une campagne correspond à 6 mois)

Gain en combustible :(bagasse) 6 984 T/campagne ; **soit 38,8 T/j**

Caractéristique de la vapeur : 30 bars ; 345°C (h=3100 KJ/Kg)

Dimensionnement du dessiccateur rotatoire :

Ce dimensionnement est effectué sur une capacité de broyage journalier de **1500 T/j** de cannes. De plus, on a pris comme référence une bagasse d'humidité **50%** qui sera séchée jusqu'à **30%** d'humidité par le dessiccateur.

L'installation de cet équipement nécessite un bilan massique qui se résume comme suit :

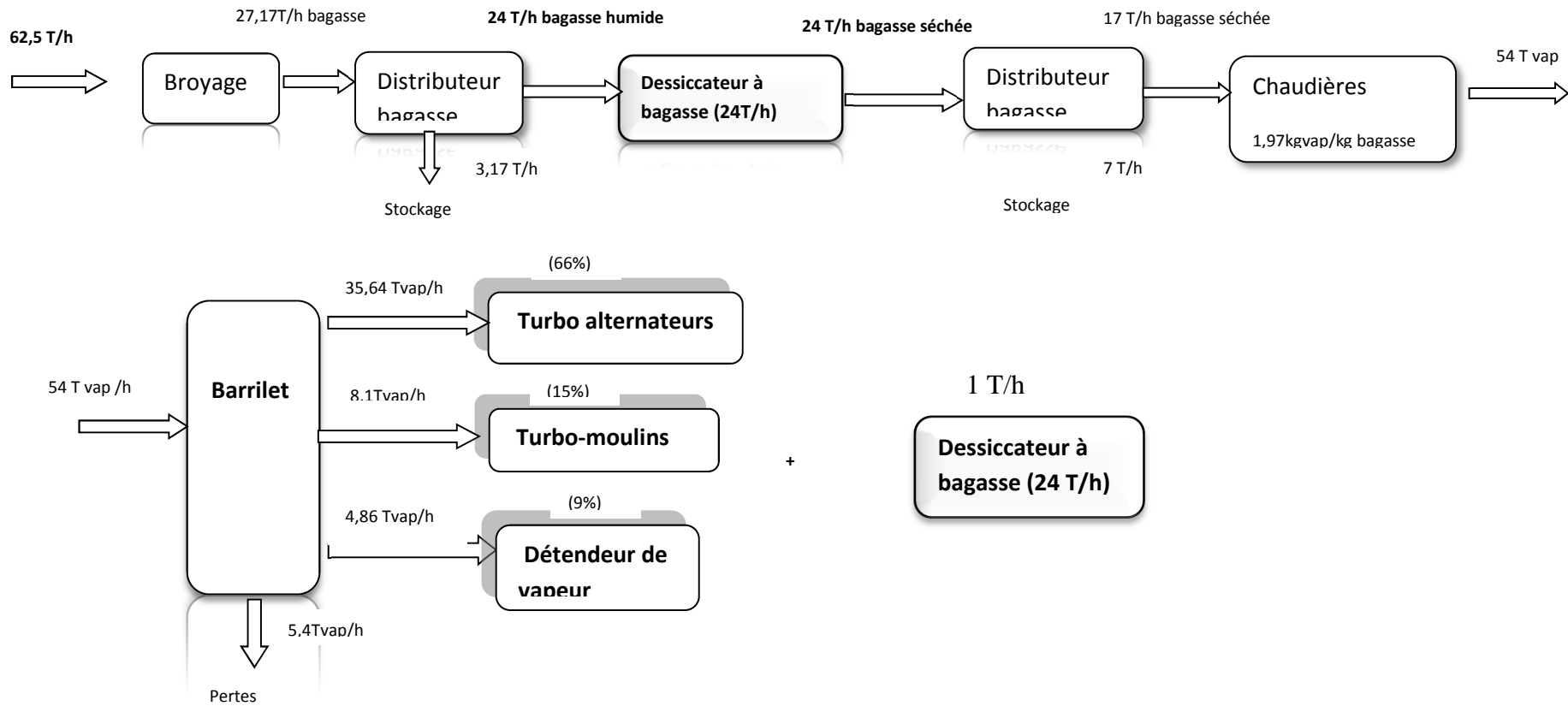


Figure 14: bilan massique pour l'installation du dessiccateur

L'étude technico-économique de cette solution nous a permis d'évaluer d'une part le gain en efficacité, et par la suite, le gain financier annuel de l'installation d'un dessiccateur à bagasse. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 10 : Etude technico-économique de l'installation d'un dessiccateur à bagasse

Débit bagasse (Tonne/h)	17	24
Humidité bagasse (%)	49,8	30
TOTAL VAPEUR DISPONIBLE (en T/h)	54	55
Turboalternateurs	33	33
Turbo-moulins	15	15
Détendeur	9	9
Dessiccateur à bagasse	0	1
Totale consommation réelle		
Gain en vapeur (T/an)	-	13 968
Surplus Energie en kWh	-	1 074 461
Gain financier du surplus énergie vapeur pour (6mois) (en FCFA)	-	131 000 000
Gain pour réduction de 95% de fuel (30531 L en moyenne pour 6mois)	-	13 000 000
Gain pour réduction de 80% du temps d'arrêts moulin (48h) dû à l'humidité bagasse	-	40 000 000
Gains en efficacité		
Gain en efficacité chaudière N°1 (%)	65,4	81
Gain en efficacité chaudière N°2 (%)	64,6	81
Gain en efficacité chaudière N°3 (%)	67,8	81,5
Gain financier pour une campagne du projet:	-	184 000 000
Coût d'investissement en FCFA TTC	-	6 000 000
Temps de retour sur investissement (TRI en jours)		11

NB : les calculs de TRI ont été faits sans actualisation

3. Optimisation de la production de vapeur : solution 2

Il arrive des moments où les turbo-moulins fassent une demande irrégulière de vapeur. Le manque de réactivité des conducteurs face à ce phénomène engendre d'énormes fluctuations de pression (voir figure 7). Ces fluctuations peuvent causer un arrêt des turbo-moulins ainsi que de l'usine. On enregistre dans ce cas d'énormes manques à gagner pour l'entreprise.

Par ailleurs, la combustion nécessite une quantité précise de l'excès d'air dans le foyer. Cette précision ne peut pas être apportée par la conduite manuelle (voir figure 11).

Pour résoudre ces deux problèmes, Il est nécessaire de penser à un équipement précis et qui réagirait mieux que les humains. Ainsi, un automate pourrait réguler la pression et assurer en même temps l'apport d'un excès d'air convenable. Pour mieux appréhender le mode de fonctionnement de cet automate, nous proposons le grafctet fonctionnel de niveau 1 et 2 dans la suite.

Caractéristiques fonctionnelles :

Pour mieux identifier la fonction de régulation que l'automate exécutera, nous avons réalisé le grafctet de régulation de pression. Les grafctet de niveau 1 et 2 se trouvent en annexe N°3 et N°4 respectivement).

Etude technico-économique :

Nous présentons un résumé des gains attendus pour le projet d'automatisation des chaudières. Les études approfondies déjà effectuées nous indiquent le coût d'investissement de ce projet. Cela nous permet d'évaluer le temps de retour sur investissement présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11: Gains attendus

	Réduction de	Quantités (pour une campagne)	Gains (FCFA)
Arrêts moulins pour baisse de pression vapeur	25%	80 heures	25 000 000
Economies de Combustible: fuel et bagasse			
Fuel	20%	200 000 Litres	18 000 000
Bagasse	10%	9 000 Tonnes	169 000 000
Gain total en une campagne			212 000 000
Coût d'investissement en FCFA TTC			160 000 000
Temps de retour sur investissement (TRI en mois)			9

4. Optimisation de la production de vapeur : solution 3

Une troisième solution, consisterait à installer un dessiccateur suivie d'un automate de régulation de pression. Les marges de gain sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 12: Etude technico-économique de l'installation d'un dessiccateur +automate

	Situation de référence 1 172T/J	solution Dessiccateur + automate 1 500T/J
Débit bagasse (Tonne/h)	17	24
Humidité bagasse (%)	49,8	30
TOTAL VAPEUR DISPONIBLE (en T/h)	54	55
Turboalternateurs	33	33
Turbo-moulins	15	15
Détendeur	9	9
Dessiccateur rotatoire	0	1
Totale consommation réelle		
Gain en vapeur (T/an)	-	31 968
Surplus Energie en kWh	-	2 459 076
Gain financier du surplus énergie vapeur pour (6 mois) (en FCFA)	-	300 000 000
Gain sur fuel pour 6 mois	-	31 000 000
Gain sur le temps d'arrêts moulin	-	65 000 000
Gains en efficience		
Gain en efficience chaudière N°1 (%)	65,4	81
Gain en efficience chaudière N°2 (%)	64,6	81
Gain en efficience chaudière N°3 (%)	67,8	81,5
Gain financier pour une campagne du projet:	-	396 000 000
Coût d'investissement en FCFA TTC	-	166 000 000
Temps de retour sur investissement (TRI en mois)	-	5

- Synthèse des solutions :

Une étude comparative des trois solutions permet de réaliser le tableau d'aide à décision suivante :

Tableau 13: Aide à décision

solutions retenues/Aspects	Energie	Mise en œuvre	Sécurité	CO2	Coûts	Efficience	Classement
Automate	+	++	+	-	+	+	3
Dessiccateur Rotatif	++	+	-	--	-	++	2
automate et Dessiccateur	+++	+++	+	---	+	+++	1

NB : + correspond à un (1) point et – correspond à zéro (0) point

Il ressort du tableau d'aide à décision que l'association de l'automate et du dessiccateur rotatif est la solution la plus efficiente et la plus rentable. Aussi, nous choisissons d'améliorer la combustion par l'installation d'un sécheur avant l'utilisation de l'automate.

D. Evaluation de la performance des chaudières et des turbines

Le bilan énergétique est basé sur le premier principe de la thermodynamique. Ce bilan bien que correct est incomplet. Car toute la quantité de chaleur ne peut pas être entièrement transformée en travail. C'est pour cette raison que le bilan exergétique est utilisé en complément au bilan énergétique afin d'évaluer la performance des turbines ainsi que des chaudières. L'exergie se définit comme étant le travail maximal que l'on peut tirer d'un courant de matière ou d'énergie lorsque celui-ci est porté à l'équilibre avec l'environnement pris comme état de référence.

1. Bilan exergétique des chaudières :(source de production de vapeur)

Le bilan exergétique permet de faire une évaluation quantitative de la dégradation énergétique, c'est-à-dire de calculer les conséquences des irréversibilités thermodynamiques. L'exergie des fluides sera calculé en considérant $T_0 = 30^\circ\text{C}$ comme température du milieu ambiant. Aussi, on a négligé l'exergie de l'environnement. Ainsi les valeurs trouvées figurent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 14: Rendement énergétique et exergétique

	Rendement énergétique (Efficiéce %)	Rendement exergétique (%)
Chaudière N°1	65,4	25,9
Chaudière N°2	64,6	25,7
Chaudière N°3	67,8	27

2. Bilan exergétique des turbines :(principale source de consommation de vapeur)

Le calcul exergétique effectué à partir des données du fonctionnement réel des turbines permet d'obtenir les rendements exergétiques résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 15: Rendement exergétique des turbines

	Rendement exergétique (%)
Turbine N°1	59,9
Turbine N°2	58,9

NB : les détails de calculs exergétiques figurent en annexes 2

E. Réévaluation de l'efficacité des chaudières

Nous avons appliqué deux améliorations possibles qui sont les suivantes :

- Le ramonage qui a permis de diminuer l'encrassement des ailettes de l'économiseur et des tubes d'eau
- Le fonctionnement des chaudières avec un taux de 36% d'excès d'air qui est la valeur recommandée par le constructeur ; soit un taux de 5,6% d'oxygène dans les fumées. (source document constructeur Fives Cail)

Les résultats de cette réévaluation de l'efficacité sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 16: Réévaluation de l'efficacité

	Chaudière N°1	Chaudière N°2	Chaudière N°3
Ratio	1,93	1,87	2,01
Efficacité	67,27	65,16	68,16

V. ANALYSES DES RESULTATS ET PARAMETRES INFLUENTS

A. Analyses des résultats

1. Analyse des résultats de l'étude énergétique

a) Analyse des bilans énergétiques des équipements du process

Les résultats antérieurs obtenus indiquent qu'il y a d'énormes pertes au niveau des chaudières, du réseau de distribution, des turbines et des conduites du réseau de vapeur. Nous analyserons ces pertes de vapeur sur chaque équipement en indiquant leurs principales causes.

- Au niveau des chaudières

L'écart de valeur de l'efficacité obtenu ci-dessus (14,6% ; 15,4% ; 12,2%) respectivement pour les chaudières N°1, N°2, N°3, est dû à l'effet de plusieurs paramètres qui sont: l'excès d'air, l'humidité de la bagasse, la température de l'eau avant économiseur, l'encrassement des tubes et ailettes de l'économiseur, l'air parasite dans la chambre de combustion, l'étanchéité des portières des cendriers.

- Au niveau du réseau de distribution

Les fuites au niveau du circuit de distribution sont évaluées à **112 Kg** vapeur pour **une tonne** de vapeur produite, soit **11,2% de pertes**. Ces dernières sont dues à un mauvais fonctionnement des purgeurs.

- Au niveau des turbines CEM

Les turbines à contre pression représentent le secteur le plus énergétivore du réseau de vapeur (figure7). On obtient 4,54% de pertes de vapeur par Tonne de canne broyée. Ces pertes diminuent les rendements globaux du cycle à vapeur :

Ainsi, pour chacune des turbines à contre pression, on a un rendement global $\eta_{g \text{ réel}} = 13,69 \%$ contre $\eta_{g \text{ théorique}} = 30\%$, soit 16,31 % de manque à gagner. L'amélioration des rendements globaux est indispensable pour optimiser la consommation de vapeur dans les turbines. C'est dans cette perspective que des solutions exploitables à moyen terme seront recommandées pour optimiser la production de vapeur.

B. Analyses des paramètres influents

1. Paramètres perceptibles à travers le bilan énergétique

Nous allons vérifier dans ce présent rapport, l'influence de l'excès d'air, de l'humidité et de la température de l'eau alimentaire tout en précisant que les autres paramètres possèdent aussi un impact non négligeable sur l'efficacité.

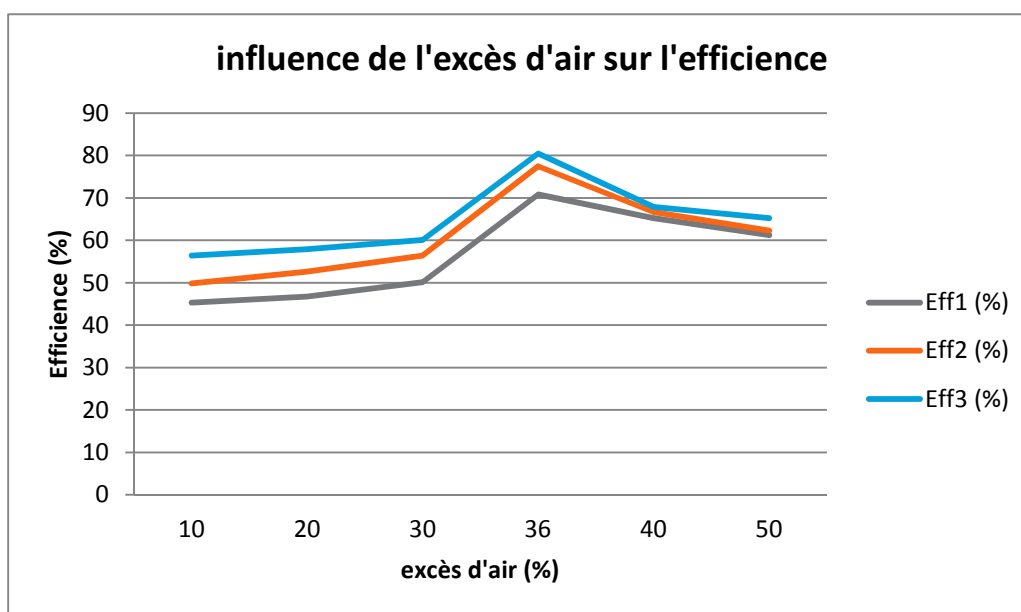


Figure 15: Influence de l'excès d'air sur l'efficacité des chaudières

L'efficacité des trois chaudières diminue lorsque le taux d'excès d'air augmente. Cela s'explique par l'augmentation des pertes de chaleur dans les cheminées.

Par ailleurs, en comparant les valeurs d'excès d'air obtenues (63% ; 78.5% ; 40%) par rapport à la valeur prévue par le constructeur (36%), on constate qu'il y a d'énormes quantités de chaleur perdue. Ces pertes s'expliquent par un fort taux d'excès d'air. Ainsi, la maîtrise de ce paramètre est indispensable pour l'amélioration de l'efficacité.

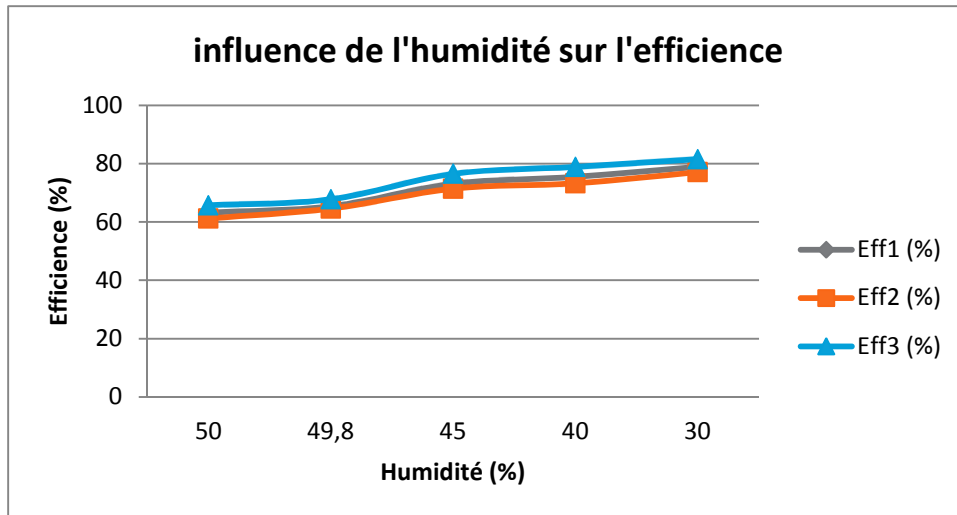


Figure 16: Effet de l'humidité sur l'efficacité des chaudières

Pour une humidité de 30%, le fonctionnement des chaudières avec la bagasse est proche de leur fonctionnement nominal car on obtient (81,2%) qui tend vers (82%) que le constructeur a prévue (Source : document constructeur ; Fives cail Babcock).

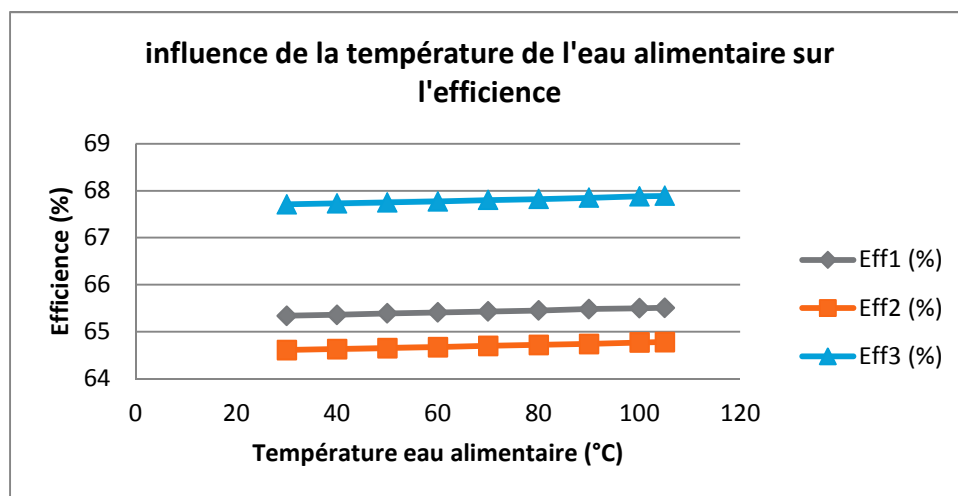


Figure 17: Effet de la température de l'eau alimentaire sur l'efficacité des chaudières

En cas de coup de sucre dans les eaux de retour chaudières, il est possible de faire fonctionner les chaudières avec l'eau adoucie à 30°C conditionnée. On a dans ce cas la plus faible des efficacités des chaudières. On obtient de meilleures efficacités avec de l'eau alimentaire prise à des températures proches de 100°C. Le bon fonctionnement du ballon de détente des eaux de purge permet d'élever la température de l'eau alimentaire vers 100°C. Cette précaution permettrait d'obtenir les premiers bulbes de vapeur au passage par l'économiseur. Ainsi, on utiliserait très peu de bagasse pour obtenir une grande quantité de vapeur.

2. Paramètres perceptibles à travers le bilan exergétique

L'identification de ces paramètres passe par l'analyse de la performance des chaudières :

a) Analyse de la performance des chaudières

- Analyse exergétique des chaudières

Les résultats du tableau 10 nous donnent un aperçu sur la dégradation de l'énergie dans les générateurs de vapeur. Ainsi, si l'écart maximal entre rendements énergétiques et exergétiques est utilisé comme base de comparaison de la performance des chaudières ; la chaudière N°2 se présente comme celle qui engendre le plus de perte suivie respectivement par la chaudière N°1 et N°3. Ce classement est acceptable car les trois chaudières jouent des rôles similaires vis à vis du fluide caloporteur.

Dès lors, nous pouvons considérer le rendement exergétique comme acceptable et voir les raisons de la baisse du rendement énergétique à 60% en moyenne alors qu'il devait être à 82%.(Source : document constructeur Fives cail Babcock).

La formule du rendement exergétique (annexe 2) montre que l'amélioration de l'efficacité peut passer par l'augmentation de la quantité de chaleur réellement transmise. Cette quantité de chaleur dépend pour un échangeur donné de son coefficient global de transmission de chaleur. Ce dernier dépend :

- de la résistance à la transmission de chaleur de la paroi séparant les deux fluides. (Phénomène d'encrassement et d'entartrage des tubes)
- Du coefficient de convection entre le fluide froid et la paroi de séparation
- Et du coefficient de convection entre le fluide chaud et la paroi de séparation.

L'écart des rendements énergétiques et exergétiques très élevé des chaudières est dû aux pertes d'exergie dans le processus de transformation de l'eau alimentaire. Ces pertes sont imputables :

- aux irréversibilités du transfert de chaleur au fluide caloporteur dues à l'écart de température entre le foyer et le fluide caloporteur
- aux pertes d'énergie dues au transfert de chaleur avec le milieu ambiant
- à la qualité de combustion.

Cette étude ressort le phénomène d'encrassement et d'entartrage des tubes. Ce résultat théorique est confirmé par l'état actuel des tubes :

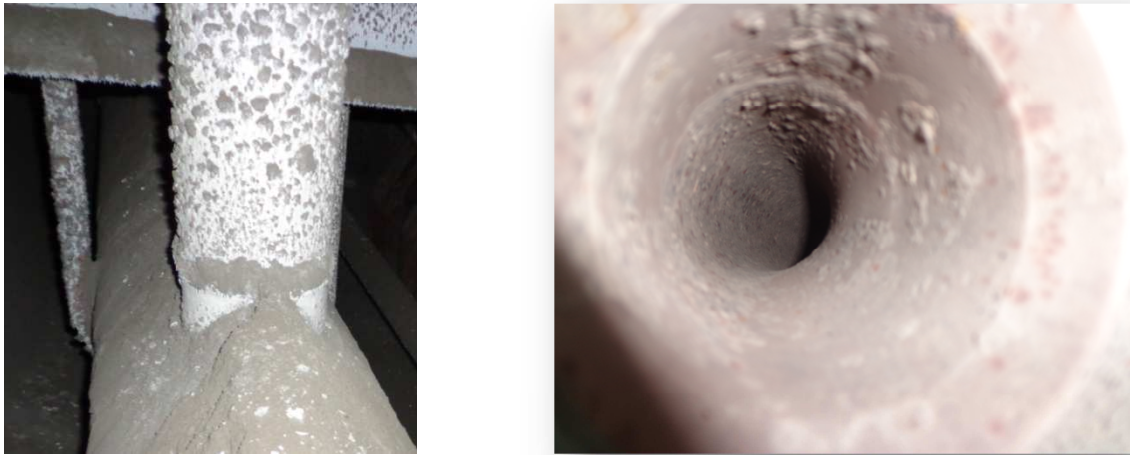


Figure 18: Tube encrassé et tube entartré

C. Analyses de remise à niveau du réseau de vapeur et de condensat

1. Optimisation de la production de vapeur : solution 1

Le coût d'investissement de l'installation d'un dessiccateur est de **6 millions FCFA**.

Les gains en vapeur s'élèvent à environ **13 968 T de vapeur** pour 6 mois de campagne. Ce qui correspond à une production énergétique de soit **1 074 461 KWh** pour 6 mois de campagne. L'équivalent financier de ce gain énergétique se fait par rapport au coût moyen de l'énergie produite par la SONABEL, qui est d'environ 122 FCFA/kWh, on a un gain sur énergie de **131 millions FCFA pour 6mois**.

Le gain pour réduction de 95% de fuel (30 531 L pour une campagne) est de **13 millions FCFA**.

Le gain pour réduction de 80% du temps d'arrêt des moulins (48h en moyenne pour une campagne) dû à l'humidité de la bagasse est de **40 millions FCFA**.

Le total des gains obtenus pour ce projet revient à **184 millions FCFA**.

Ainsi, on a un **temps de retour sur investissement \approx 5 mois**. L'équipement a une durée de vie de 20 à 25 ans.

2. Optimisation de la production de vapeur : solution 2

L'installation d'un automate de régulation de pression améliore l'efficacité des chaudières et un gain de **212 millions FCFA** qui sont répartis de la manière suivante :

Le gain obtenu par réduction à 25% des arrêts moulins pour baisse de pression s'élève à **25 millions F CFA**. L'économie réalisée pour 20% de réduction de consommation annuelle de **fuel est de 18 millions**. Tandis que la réduction de 10% de consommation de bagasse correspond à 18 000 Tonne de vapeur, soit 1 385 000 KWh. l'équivalent financier de ce gain a été fait par rapport au coût moyen de l'énergie produite par la SONABEL, qui est d'environ 122 FCFA/KWh, on obtient un gain sur énergie de **169 millions FCFA**.

3. Optimisation de la production de vapeur : solution 3

Les résultats du tableau indiquent un surplus de 3 245 901 KWh soit **396 millions FCFA**. Cette somme permet de couvrir **120 millions FCFA** de dépenses liées à la consommation électrique de la SONABEL pendant la période d'inter-campagne (6mois). Il y aura un reste de **276 millions FCFA** soit **2 262 295 KWh** qui pourront permettre de commercialiser l'énergie électrique au réseau national. Ainsi, il n'y aura plus de dépendance énergétique de l'entreprise.

Par ailleurs, la mise en œuvre simultanée des deux solutions est de loin la plus rentable et la plus efficace. Les résultats du tableau d'aide à décision permettent d'apprécier l'amélioration de l'efficacité qu'on pourrait obtenir par l'association du sécheur et de l'automate. L'automatisation à elle seule ne permet pas d'économiser assez de bagasse. Tandis que le sécheur permettra d'avoir une grande réserve en bagasse.

Le niveau de développement actuel de la technologie permet de voir la bagasse comme un vecteur énergétique capital et non un simple déchet industriel dont il faut s'en débarrasser.

VI. RECOMMANDATIONS

Le bilan énergétique global effectué pour une tonne de canne broyée (figure 10) permet de constater une faible efficacité du procédé de transformation. En effet, pour une tonne de canne broyée, l'usine produit **35,86 KWh** au lieu de **55 KWh** dans le cas d'un procédé efficace. (Source : [4]). Il y apparaît donc un manque à gagner de **19,14 KWh** par tonne de canne broyée. Dans l'optique d'améliorer l'efficacité des chaudières et de faire d'énormes économies d'énergie, il serait judicieux d'appliquer le séchage de bagasse qui constitue l'une des solutions proposées dans le cadre de cette étude. Cette étude a prouvé l'influence de l'humidité de la bagasse sur l'efficacité des chaudières (figure 16). La réduction du taux d'humidité de la bagasse permettra d'améliorer l'efficacité des générateurs de vapeur et de réaliser d'énormes économies d'énergie en combustion. En effet, E. HUGOT dans « la sucrerie de la canne » PP 825 décrit : «Il n'y a pas d'intérêt à sécher au-dessous de 10% d'humidité, car la bagasse risquerait de remonter par elle-même à 10% en absorbant l'humidité ambiante. On peut par exemple s'arrêter à 10, 15 ou 20% et utiliser la chaleur restant disponible dans les gaz dans un autre échangeur, par exemple un petit économiseur ». Ces indications montrent les limites de fonctionnement du sécheur pour optimiser la production de vapeur.

Par ailleurs, il serait nécessaire d'effectuer une révision des turbo-alternateurs en vue d'utiliser judicieusement la vapeur et optimiser la production d'électricité. Aussi, il serait bénéfique d'effectuer une étude énergétique sur les corps évaporateurs et appareils à cuire en partant de jus de canne jusqu'à la production de sucre cristallisé.

VII. CONCLUSION et PERSPECTIVES

Cette étude nous a permis de connaître l'efficacité actuelle des chaudières. En effet, pour les chaudières N°1, N°2, N°3 ; les efficacités obtenues sont respectivement 65,4 % ; 64,6 % et 67,8 %. Bien que ces valeurs soient faibles par rapport à (82%) qui est la valeur prévue par le fabricant, il y a encore d'énormes profits à tirer de ces générateurs de vapeur. Pour y parvenir, certaines améliorations proposées dans cette étude sont nécessaires. Parmi les suggestions faites, l'automatisation associée au sécheur de bagasse est celle qui permettra d'améliorer considérablement l'efficacité et de réaliser d'énormes économies d'énergie. En effet avec un investissement de **166 millions FCFA**, On a un gain sur énergie de **3245,9 MWh/j** équivalent à **396 millions FCFA** avec un temps de retour sur investissement de **5 mois**. Par suite, on change la conception selon laquelle la bagasse est un déchet industriel à s'en débarrasser. Car la technique de séchage de la bagasse permet de considérer ce combustible comme un vecteur énergétique qu'on peut économiser et non gaspiller. Ainsi la technologie du dessiccateur à bagasse permet d'économiser en énergie et donc rentable pour le business de l'entreprise.

Par ailleurs, le bilan énergétique que nous avons réalisé, nous montre la faible efficacité du procédé de production d'énergie pour les besoins de l'usine. On enregistre un manque à gagner d'environ **19,14 kWh** par Tonne de canne broyée. Pour remédier à cette insuffisance, nous proposons une révision des turbines. Cette suggestion permettra d'optimiser la consommation de vapeur ainsi que la production d'électricité.

Dans le but d'optimiser la consommation d'énergie, une étude peut être initiée sur les consommations d'énergie des corps évaporateurs, appareils à cuire, ...). Cette étude permettra de cerner la consommation d'énergie de l'usine afin d'augmenter l'efficacité énergétique du procédé de transformation.

VIII. BIBLIOGRAPHIE

PUBLICATIONS ET OUVRAGES GENERAUX

- [1] A. Bensakhria, .2011. Cours : Combustion et Chaudières
- [2] J. BLIN, .2005. La biomasse : ressource énergétique
- [3] Y. COULIBALY, .2010. Cours Thermodynamique Appliquée Master1 énergie
- [4] P. GIRARD, Conférence FOAD Biomasse & énergie Les agro-industries et le potentiel de production d'électricité en Afrique : Quels enjeux pour quelles technologies ?
- [5] Robert Antoine B.al, 2011. Cours Fabrication du Sucre de Canne
- [6] Claudio Joel Courteau, 2004. Cours Qualité et Traitement de l'Eau des Chaudières
- [7] E. HUGOT, 1970. La sucrerie de cannes, 2^{ème} EDITION. Techniques & Documentation-Lavoisier,
- [8] Juan H. Sosa-Arno, and al, 2004. SUGAR CANE BAGASSE DRYING
- [9] Boulet, and al, 1975. Techniques de séchage bagasse
- [10] Azhar, S. S, and al, 2005. Dye removal from aqueous solution by using adsorption on treated sugarcane bagasse. American Journal of Applied Sciences
- [11] R J M Mc Intyre, and al; 1981. Improved control for new turbo alternators. Proceedings Australian Society of Sugar Cane Technologists

Sites Internet

La production de vapeur

- [i] http://artic.ac-besancon.fr/reseau_stl/FTP_STL/La%20vapeur%20d%27eau.pdf
- [ii] <http://www.tlv.com/global/FR/steam-theory/types-of-steam.html> (consultés le 28 Mai 2012)

Taux de purge

- [iii] http://www.gcienergie.com/GCI_Flash_Energie/Volume_2/volume_2.html
- [iv] <http://oee.nrcan.gc.ca/node/5431> (consultés le 19 Avril 2012)

Les bonnes pratiques d'économies de la vapeur en industrie

- [v] <http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/steam.html> (consultés le 25 Avril 2012)

IX. ANNEXES

ANNEXES

Listes des annexes :

ANNEXE 1 : formulaire

ANNEXE 2 : calcul exergetique

ANNEXE 3 : réseau de vapeur

ANNEXE 4 : grafcet de régulation de pression (niveau 1)

ANNEXE 5 : grafcet de régulation de pression (niveau 2)

ANNEXE 6 : schéma synoptique du process de production de vapeur

ANNEXE 7 : valeurs nominales du constructeur Fives cail Babcock

ANNEXE 1 : formulaire

Formules de Calculs en combustion

COMBUSTION NEUTRE STOECHEIOMETRIQUE (AIR : 79% N2, 21% O2)		
<i>Composition massique élémentaire du déchet ou combustible</i>	Carbone : C (%) Chlore : Cl (%) Soufre : S (%) Humidité : E (%)	Hydrogène : H (%) Oxygène : O (%) Azote : N (%) Inertes : K (%)
<i>Pouvoir comburivore</i>	$V^{\circ}O_2$ (Nm ³ /kg) = 0,0187 C + 0,056 H + 0,007 (S - O) - 0,0016 Cl $V^{\circ}A$ (Nm ³ /kg) = 0,0889 C + 0,2667 H + 0,0333 (S - O) - 0,0075 Cl $P^{\circ}A$ (kg/kg) = 1,29 $V^{\circ}A$	
<i>Pouvoir fumigène</i>		
<i>Fumées humides</i>	$V^{\circ}FH$ (Nm ³ /kg) = 0,0889 C + 0,3227 H + 0,008 N + 0,0333 S - 0,0263 O - 0,0027 Cl + 0,0124 E $P^{\circ}FH$ (kg/kg) = $P^{\circ}A$ + (1 - K/100)	
<i>Fumées sèches</i>	$V^{\circ}F$ (Nm ³ /kg) = 0,0889 C + 0,2107 H + 0,008 N + 0,0333 S - 0,0263 O + 0,0004 Cl $P^{\circ}F$ (kg/kg) = $P^{\circ}FH$ - (E/100 + 9H/100)	
<i>CO2</i>	$V^{\circ}CO_2$ (Nm ³ /kg) = 0,0187 C α_0 (%) = 100 $V^{\circ}CO_2/V^{\circ}F$	
<i>H2O</i>	$V^{\circ}H_2O$ (Nm ³ /kg) = 0,112 H + 0,0124 E - 0,0031 Cl $V^{\circ}H_2O$ (Nm ³ /kg) = $V^{\circ}FH$ - $V^{\circ}F$	
<i>HCl</i>	$V^{\circ}HCl$ (Nm ³ /kg) = 0,0063 Cl	
<i>SO2</i>	$V^{\circ}SO_2$ (Nm ³ /kg) = 0,007 S	
<i>N2</i>	$V^{\circ}N_2$ (Nm ³ /kg) = 0,008 N + 0,79 $V^{\circ}A$ = $V^{\circ}FH$ - $V^{\circ}CO_2$ - $V^{\circ}SO_2$ - $V^{\circ}HCl$ - $V^{\circ}H_2O$	

COMBUSTION OXYDANTE COMPLETE excès d'air : e (%)		
<i>Volume d'air</i>	V_A (Nm ³ /kg) = na $V^{\circ}A$ = $V^{\circ}A$ (1 + (e/100))	
<i>Volume et masse de fumées</i>		
<i>Fumées humides</i>	V_{FH} (Nm ³ /kg) = $V^{\circ}FH$ + (e/100) $V^{\circ}A$ P_{FH} (kg/kg) = $P^{\circ}FH$ + (e/100) $P^{\circ}A$	
<i>Fumées sèches</i>	V_F (Nm ³ /kg) = $V^{\circ}F$ + (e/100) $V^{\circ}A$	
<i>Volume des constituants des fumées</i>	V_{CO_2} (Nm ³ /kg) = $V^{\circ}CO_2$ V_{SO_2} (Nm ³ /kg) = $V^{\circ}SO_2$ V_{H_2O} (Nm ³ /kg) = $V^{\circ}H_2O$ V_{HCl} (Nm ³ /kg) = $V^{\circ}HCl$ V_{O_2} (Nm ³ /kg) = (τ_{O_2} /100) (e / 100) $V^{\circ}A$ V_{N_2} (Nm ³ /kg) = 0,008 N + (τ_{N_2} /100) V_A = V_F H - V_{CO_2} - V_{SO_2} - V_{HCl} - V_{O_2} - V_{H_2O}	

ANNEXE 2 : calcul exergétique

Nous supposons que l'exergie de l'environnement ($h_0 - T_0S_0$) est nulle

La température des fumées à l'entrée du faisceau vaporisateur est de $T = 1100^\circ\text{C}$

La température de l'ambiance $T_0 = 30^\circ\text{C}$.

Débit de vapeur en sortie : M

Débit de bagasse brûlée : M_i

Le rendement exergétique des chaudières : $\eta = M (E_2 - E_1) / M_i * EQ_i$

L'exergie à l'entrée (E_1) et à la sortie (E_2). $E = h - T_0S$

$$EQ_i = PCS (1 - T_0/T)$$

- **Chaudière N°1 :**

$$E_1 = h_1 - T_0S_1 = 376,7 - 303 * 1,192 = 15,52 \text{ KJ/hg}$$

$$E_2 = h_2 - T_0S_2 = 3100 - 303 * 6,7235 = 1062,77 \text{ KJ/kg}$$

$$EQ_i = PCS (1 - T_0/T) = 7773,54(1 - 30/1100) = 7561,53 \text{ KJ /kg}$$

$$\eta = M(E_2 - E_1) / M_i * EQ_i = 10107,5 * (1062,77 - 15,52) / (5405 * 7561,53) = 0,2589$$

- **Chaudière N°2 :**

$$E_1 = h_1 - T_0S_1 = 376,7 - 303 * 1,192 = 15,52 \text{ KJ/hg}$$

$$E_2 = h_2 - T_0S_2 = 3130 - 303 * 6,7712 = 1078,32 \text{ KJ/kg}$$

$$EQ_i = PCS (1 - T_0/T) = 7773,54(1 - 30/1100) = 7561,53 \text{ KJ /kg}$$

$$\eta = M(E_1 - E_2) / M_i * EQ_i =$$

- **Chaudière N°3:**

$$E_1 = h_1 - T_0S_1 = 376,7 - 303 * 1,192 = 15,52 \text{ KJ/hg}$$

$$E_2 = h_2 - T_0S_2 = 3100 - 303 * 6,6561 = 1053,20 \text{ KJ/kg}$$

$$EQ_i = PCS (1 - T_0/T) = 7773,54(1 - 30/1100) = 7561,53 \text{ KJ /kg}$$

• Turbine

$$E_1 = h_1 - T_0 S_1 = 3100 - (303 \cdot 6,7235) = 1062,77 \text{ KJ/Kg}$$

$P_2 = 1,5$ bars (point de détente)

La table thermodynamique de la vapeur d'eau donne :

$$h_f = 466,9 \text{ KJ/Kg} ; S_f = 1,4331 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$$

$$h_g = 2691,6 \text{ KJ/Kg} ; S_g = 7,2177 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$$

Soit X le titre, on a:

$$X = (S_1 - S_f) / (S_g - S_f) = (6,7235 - 1,4331) / (7,2177 - 1,4331) = 0,91$$

$$h_{2s} = (1-X)h_f + Xh_g = (1-0,91) \cdot 466,9 + 0,91 \cdot 2691,6 = 2491,37 \text{ KJ/Kg}$$

$$h_2 = h_1 - \eta_{is}(h_1 - h_{2s}) = 3100 - 0,7 \cdot (3100 - 2491,37) = 2673,95 \text{ KJ/Kg}$$

Les valeurs de p_2 et h_2 permettent d'obtenir $S_2 = 7,2105 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$

$$E_2 = h_2 - T_0 S_2 = 2673,95 - (303 \cdot 7,2105) = 491,89 \text{ KJ/Kg}$$

$$\eta_{ex} = w / (E_1 - E_2)$$

Pour la turbine N°1

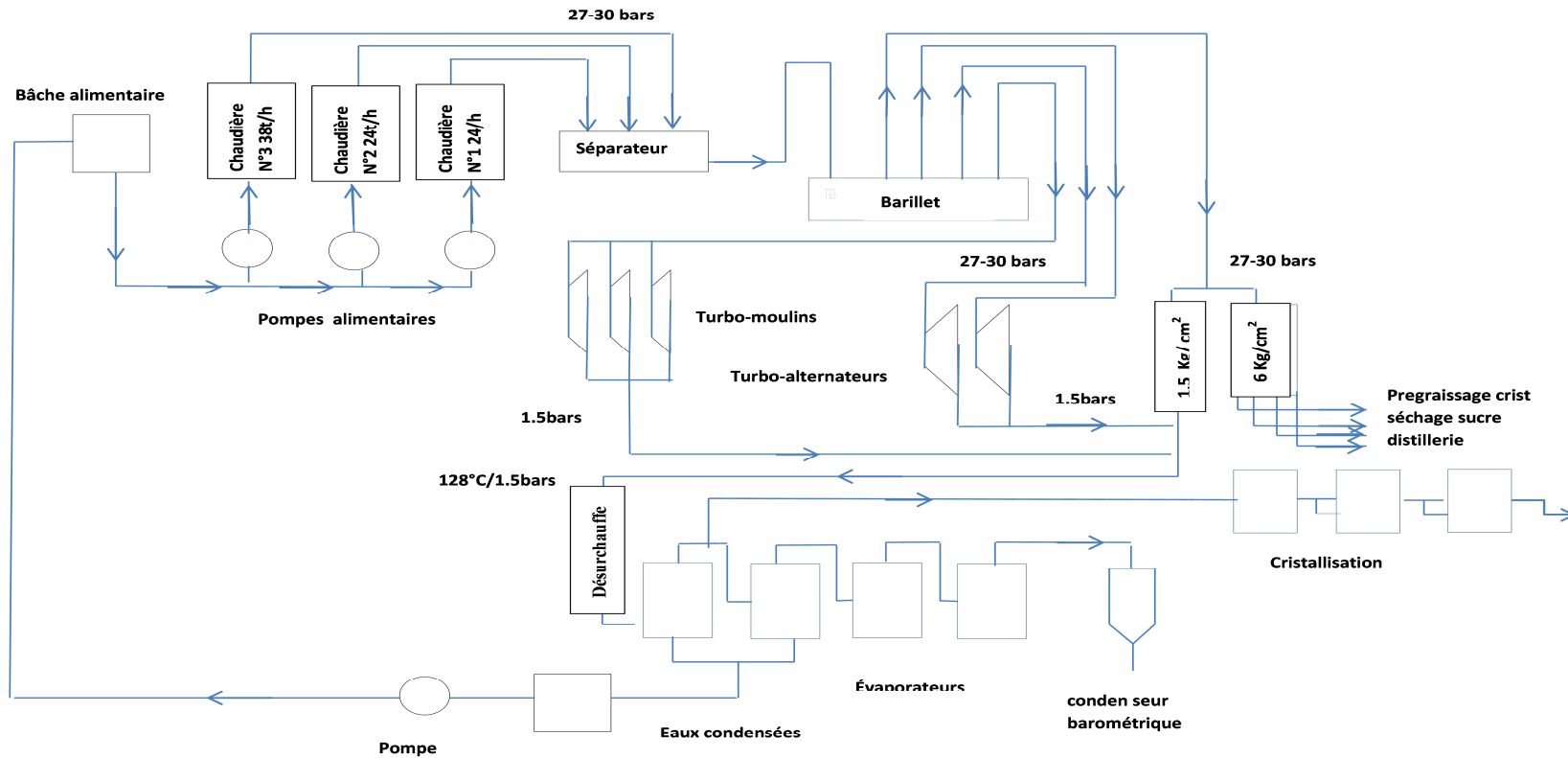
$$\eta_{ex} = w / (E_1 - E_2) = 304,7 / 507,87 = 0,599$$

Pour la turbine N°2

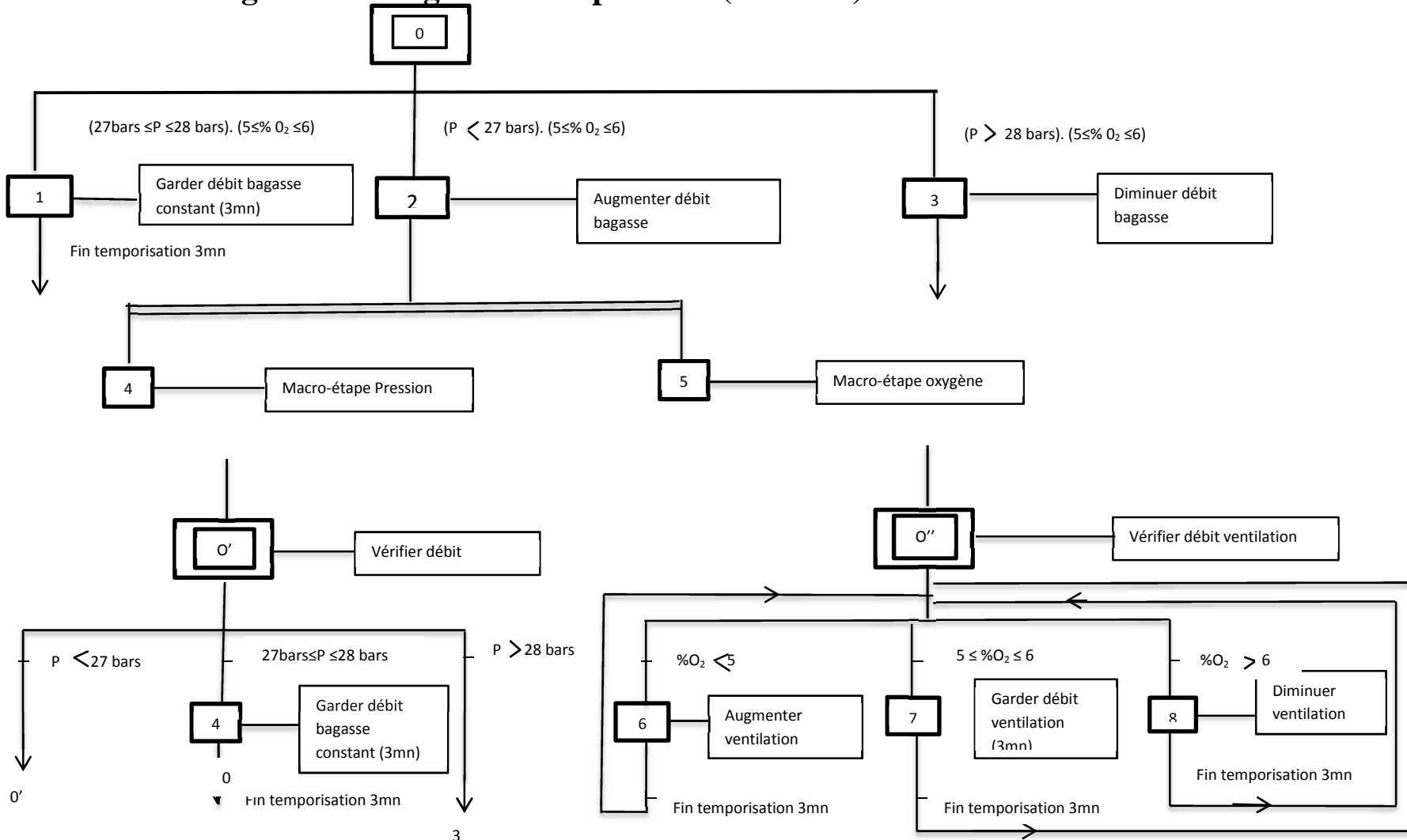
$$\eta_{ex} = w / (E_1 - E_2) = 299,62 / 507,82 = 0,589$$

ANNEXE 3 : réseau de vapeur

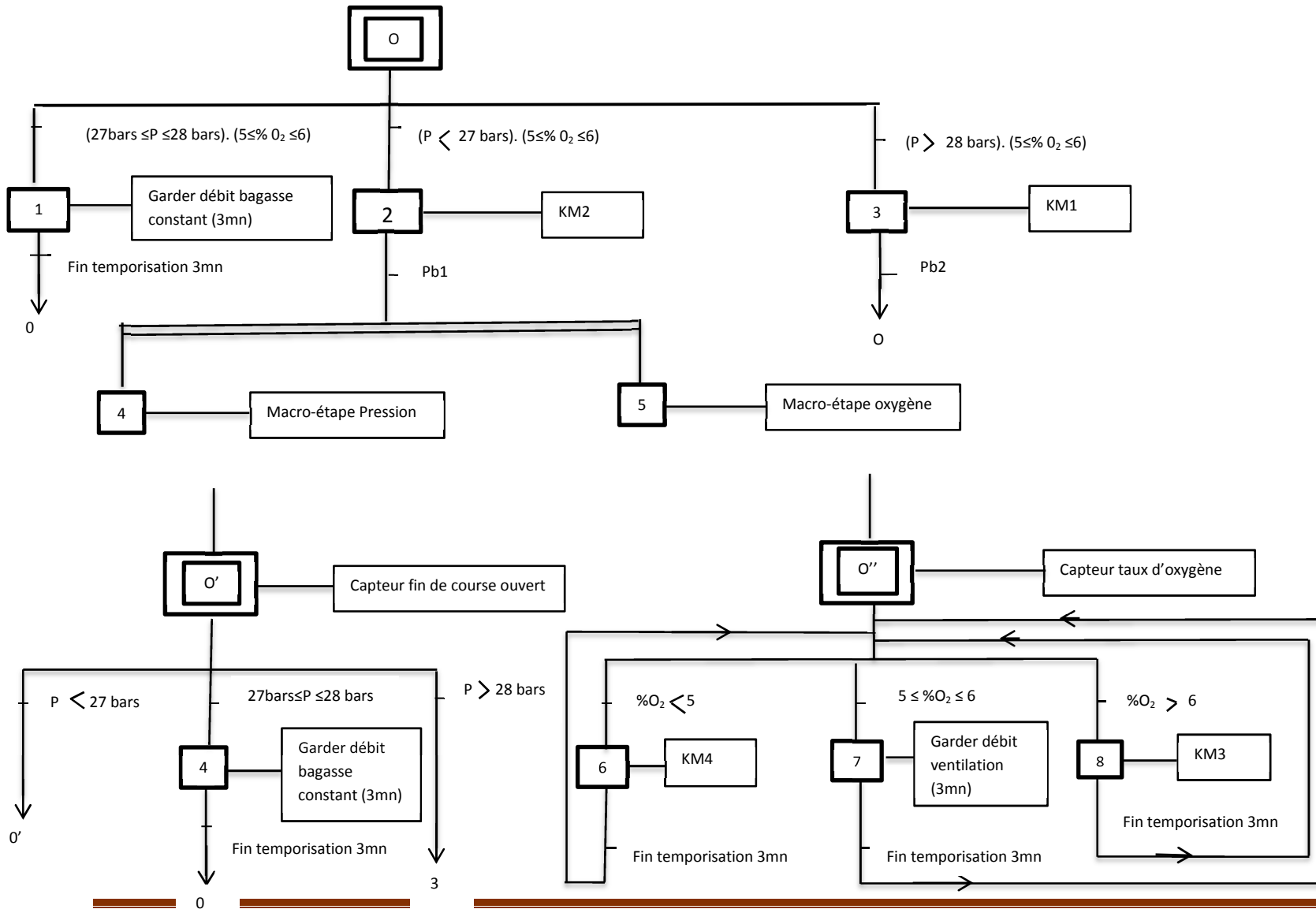
Le réseau de vapeur et de condensat de la SN-SOSUCO :



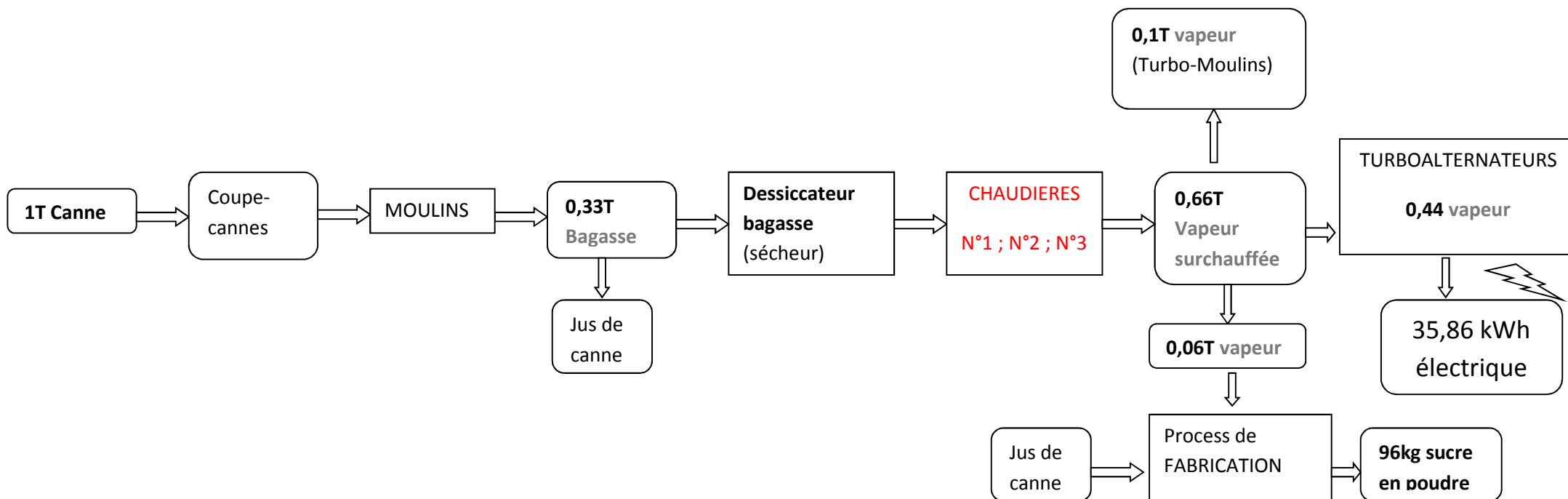
ANNEXE 4 : grafcet de régulation de pression (niveau 1)



ANNEXE 5: grafcet de régulation de pression (niveau 2)



ANNEXE 6 : schéma synoptique du process de production de vapeur



ANNEXE 7 : valeurs nominales du constructeur Fives cail Babcock

Humidité bagasse E(%)	50
Excès d'air e(%)	36
Coefficient combustion	0,9
Taux de purge(% eau alimentaire)	2,5
Température eau alimentaire (°C)	105
Température vapeur saturante sortie surchauffeur (°C)	360
Pression vapeur sortie surchauffeur (bar)	30