



ANALYSE ET OPTIMISATION DE LA PRODUCTION D'ENERGIE RENOUVELABLE D'ORIGINE BIOMASSE

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER D'INGENIERIE EN EAU ET ENVIRONNEMENT
OPTION : Energétique et Electrique

Présenté et soutenu publiquement le 29/10/2014 par

Papa Antoine Lademba FAYE

Travaux dirigés par : Dr François PINTA

Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburants (LBEB)

Jury d'évaluation du stage :

Présidente : **Dr. Sylvie MOURAS**

Membres et correcteurs : **Dr. Bachir OUEDRAOGO**

Dr. François PINTA

Promotion [2013/2014]

Remerciements

Le présent travail a été fait au niveau du Service Energie de la Compagnie Sucrière Sénégalaise (CSS). Nous n'aurions pu réaliser ce travail sans l'aide de personnes diverses que nous tenons à remercier. Il nous est agréable de nous acquitter d'une dette de reconnaissance auprès de toutes les personnes, dont l'intervention au cours de ce projet a favorisé son aboutissement.

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 superviseurs d'IJT et à toute l'équipe d'IJT, à l'ensemble des opérateurs de chaudière, de turbine, mais aussi à tous les mécaniciens et aide mécanique.

Nous envoyons aussi nos sincères remerciements à :

M. François PINTA pour ses orientations et remarques successives dans la réalisation de ce mémoire

M. Fansou Diedhiou pour son aide inestimable dans l'obtention de ce stage

M. Cyril Barroso pour m'avoir accueillie dans son service et m'avoir mis dans les meilleures conditions de travail

A l'ensemble du Service Régulation, de la Chaufferie et du Service électrique pour m'avoir fait profiter de leur expérience

A tout le corps professoral de l'Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

DEDICACES

A mon père et à ma mère pour leurs soutiens inconditionnels et toute l'attention dont j'ai pu bénéficier de leur part.

A mes frères et sœurs pour m'avoir encouragé et tendus mains fortes.

A toute la famille Faye de Khouma Santhie qui m'a hébergé pendant mon séjour à Richard-TOLL.

A tous mes camarades de promotion Mater en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement/option Energie avec lesquels nous avons formé pendant deux ans une équipe solide, efficace et particulièrement liée par une amitié confiante.

A toute l'équipe du KT150 pour avoir relevé le défi de la production énergétique et aider à battre toutes les records de la CSS en terme de production industrielle.

Table des matières

1. INTRODUCTION	9
1.1. Contexte et positionnement de l'étude	9
1.2. Objectif de l'étude	9
1.3. Méthodologie	10
1.4. Présentation de la compagnie sucrière sénégalaise	11
1.4.1. Historique	11
1.4.2. De nos jours	11
1.4.3. Organigramme	13
1.4.4. Responsabilité sociétale	14
2. GENERALITES SUR LE PROJET (MATERIELS ET METHODES)	15
2.1. Présentation du projet KT 150	15
2.2. Description générale des installations	16
2.2.1. La chaudière	16
2.2.2. Le Groupe Turbo Alternateur	18
2.2.3. Les aérocondenseurs	18
2.2.4. Circuit d'eau et de vapeur d'eau	19
2.2.5. Circuit de l'air et de la fumée	19
2.2.6. Circuit des eaux usées	20
2.2.7. La bagasse	20
2.3. Méthodologies	20
2.3.1. Etudes Energétiques	20
2.3.2. Etudes Exergétiques	24
3. RESULTATS ET DISCUSSIONS	25
3.1. Bilans Energétiques	25
3.1.1. Propriétés de la bagasse	25
3.1.2. Rendement et Ratio de consommation	27
3.2. Bilan exergétique	27
3.3. Analyse de la production de vapeur et d'électricité	28
3.4. PROBLEMES OBSERVES ET SOLUTIONS TECHNIQUES ENVISAGES	31
3.4.1. Qualité de la bagasse	32
3.4.2. Séchage de la bagasse	32
3.4.3. Ajustage des Paramètres des Régulateurs PID et Reconfiguration des Boucles de Contrôle de l'alimentation en bagasse et du niveau du ballon supérieur	37
3.4.4. Modification du circuit d'alimentation de l'air secondaire	41

3.5. REMPLACEMENT DES BRULEURS A FUEL DES CHAUDIERES BR PAR DES BRULEURS POUR LIQUIDE A FAIBLE POUVOIR CALORIFIQUE	43
3.5.1. Sur le plan technique.....	45
3.5.2. Sur le plan économique.....	46
3.5.3. Sur le plan environnemental	47
3.5.4. Eligibilité du projet au programme MDP (Mécanisme de Développement Propre).....	48
4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	50
Bibliographie	51

Liste des Tableaux

Tableau 1: Données Générales de la chaudière de la CSS	17
Tableau 2: Analyse Elémentaire du combustible par masse pour le dimensionnement de la chaudière	22
Tableau 3: Déperdition calorifique et rendement thermique	23
Tableau 4: Récapitulatif tonne de cannes traitées et de la bagasse produite	26
Tableau 5: Caractéristiques de la production de vapeur	28
Tableau 6: Production de vapeur	29
Tableau 7 : Tendence d'utilisation de la bagasse	35
Tableau 8 : Temps de Retour sur Investissement avec l'installation d'un sécheur à bagasse... 36	
Tableau 9 : Détails techniques du brûleur Saacke pour Liquide à faible pouvoir calorifique . 46	
Tableau 10: Etude économique de l'installation de 4 nouveaux brûleurs pour Liquide à faible pouvoir calorifique	46
Tableau 11: Valeurs des émissions du brûleur SSB-LCG (Etude de cas d'une chaudière à Araucaria au Brésil)	47

Liste des Figures

Figure 1: Distillerie d'éthanol de la CSS	12
Figure 2 : Organigramme de la CSS	13
Figure 3: Vue générale de la chaudière ISGEC John Thompson.....	16
Figure 4: Diagramme e!Sankey de la production de vapeur	30
Figure 5: Classification des pertes d'une chaudière (J. Sudhakar and P.Vijay, 2013)	31
Figure 6: Le PCS en fonction de la teneur en humidité de la bagasse	33
Figure 7 : Détails techniques du Turbo Dryer	35
Figure 8 : Boucle de régulation actuelle de l'alimentation en bagasse et d'air primaire.....	39
Figure 9 : Boucle de régulation d'origine d'Alimentation	40
Figure 10 : Vue générale d'une Boucle de régulation "Boucle fermée"	41
Figure 11: Boucle de régulation du niveau du ballon supérieur	41
Figure 12 : Circuit d'alimentation de l'air secondaire.....	42
Figure 13 : Fonctionnement et anatomie d'un brûleur de chaudière à fuel	44
Figure 14 : Aperçu d'un brûleur Saacke SSB-LCL	45

Abréviations

APIX : Agence de Promotion des Investissements et Grands Travaux

BR : Babcock

BP : Basse Pression

CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques

CO₂ : Dioxyde de carbone

CSS : Compagnie Sucrière Sénégalaise

FABER : Fonds Africain des Biocarburants et des Energies Renouvelables

GES : Gaz à effet de serre

GOANA : Grande Offensive Agricole pour la Nourriture et l'Abondance

GTA : Groupe Turbo Alternateur

HP : Haute Pression

IJT : ISGEC John Thompson

KWh : Kilowatt-heure

MDP : Mécanisme de Développement Propre

MWh : Mégawatt heure

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur

PID : Proportionnel Intégral Dérivée

IRAT : Institut de recherche agronomique tropicale

SENELEC : Société Nationale d'Electricité

SDRS : Société de Développement Rizicole du Sénégal

SSB-LCG/LCL: SAACKE Swirl Burner for Low Calorific Gas/Low Calorific Liquids

tCO₂e : Emissions en tonne équivalent de dioxyde de carbone

TRI : Temps de Retour sur Investissement

RESUME

En Aout 2009, la Compagnie Sucrière Sénégalaise avait initié le projet KT150 pour augmenter sa production sucrière et atteindre les 150 000 tonnes de sucre correspondant à la consommation nationale de sucre d'ici l'année 2014.

Cette augmentation de cette production qui entrainera une augmentation de la production de bagasse a été l'occasion pour la CSS de lancer un projet MDP pour le financement d'une nouvelle centrale avec l'acquisition d'une chaudière de 150 t/h à 100 % bagasse et d'un nouveau turbo-alternateur de 25 MW. Ainsi avec ce projet la CSS avait comme objectif de fonctionner avec la bagasse pendant la campagne et l'inter-campagne et de vendre le surplus énergétique à la SENELEC.

Mais il s'est posé un réel problème d'optimisation, ce qui fait que les attentes du projet n'ont pas été atteintes. L'étude que nous avons faite a été l'analyse de la production énergétique pour pouvoir déceler les dysfonctionnements, trouver des solutions pour l'optimisation et améliorer le rendement de la chaudière.

Cette étude nous a montré un manque à gagner de 10 % pour le rendement énergétique au niveau de la chaudière. De ce fait nous avons proposés des solutions en vue d'optimiser la production de vapeur et d'électricité, pour finir avec le remplacement des brûleurs à fuel de l'ancienne centrale par des brûleurs pour liquide à faible pouvoir calorifique utilisant la mélasse issue du procédé de fabrication du sucre comme combustible principal.

Mots Clés

- 1- Optimisation Energétique
- 2- Bagasse
- 3- Chaudière
- 4- Energie Renouvelable
- 5- Mélasse

ABSTRACT

In August 2009, the Senegalese Sugar Company (CSS) has planned a Project KT150 to increase progressively the sugar production up to 150,000 tons of sugar for 2013/2014 season.

The increase of sugar production which will train an increase of the bagasse production has been the occasion for the CSS to initiate a MDP Project in order to install a new boiler of 150 TPH and a new turbo generator of 25 MW. It will result in a factory with the necessary thermal efficiency to provide sufficient excess bagasse at end of the season to satisfy the full energy requirements of CSS during the off-crop period and to export electrical surplus power to the national grid.

In fact, the objectives of the CSS has not reached as a result of low efficiency of electricity generation in the case of project. This document which is the report of my final project study has like objective to analyze and optimize of production renewable energy, a diagnosis of the plant to find the dysfunction and improve the efficiency of the boiler.

This way showed us à lack of 10 % for the efficiency of the boiler. We have proposed a solution in order to improve the steam production system in thermal power plant and electricity, in finish with the substitution of oil burners of mixte boilers bagasse with burners at low heating values using the molasses like main fuel.

Keywords

- 1- Energy Optimization
- 2- Bagasse
- 3- Boiler
- 4- Renewable Energy
- 5- Molasse

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte et positionnement de l'étude

Avec l'augmentation des coûts de l'énergie et des préoccupations croissantes de l'environnement, l'efficacité énergétique est devenue le souci majeur de tous les procédés industriels énergivores. Et c'est pourquoi la CSS (Compagnie Sucrière Sénégalaise) s'est lancé dans un Projet de Mécanisme de Développement Propre pour augmenter son efficacité thermique afin de fournir suffisamment de bagasse à la fin de la saison et satisfaire ses besoins énergétiques complets durant la période hors récolte. Cependant ceci tarde à être réaliser du fait qu'on remarque une baisse de performance dans le fonctionnement de la chaudière principale, entraînant la non maîtrise de la production d'utilités (eau chaude, vapeur, électricité). Il nécessite de faire une analyse de la production énergétique d'origine bagasse pour déceler les dysfonctionnements et trouver des solutions afin d'atteindre le but du projet initial qui était de vendre le surplus de production d'électricité à la SENELEC (Société Nationale d'Electricité).

1.2. Objectif de l'étude

Pour la production d'énergie renouvelable à partir de la bagasse, les technologies de combustion de biomasse peuvent être adaptées à la gamme de puissance généralement nécessaire. Ainsi l'objectif général du stage sera de développer et de représenter un modèle énergétique en tenant compte les aspects techniques, économiques, et environnementaux pour obtenir un rendement du système de production d'énergie. Il s'agira, limiter les pertes :

- **en exploitation** : extraire le maximum d'énergie disponible dans le combustible pour la production d'utilités (eau chaude, vapeur, électricité) en fonction des besoins, des coûts et des contraintes, réagir rapidement face à la défaillance d'un équipement ou à une variation de la demande, évaluer puis minimiser les pertes (réduction de la vapeur mise en l'air, utilisation des différents combustibles), sensibiliser les conducteurs sur certains aspects de l'exploitation...
- **en gestion** : suivre la performance des différents équipements pour planifier les opérations de maintenance ou anticiper les problèmes, déterminer l'opportunité de revendre de l'électricité en connaissant le coût exact d'investissement, gérer ses quotas de CO₂, analyser les coûts sur une longue période en fonction des variations de charge et du prix des ressources utilisées...
- **en conception et planification d'investissement** : évaluer rapidement différentes options et déterminer les investissements les plus rentables, pré-dimensionner de nouveaux équipements, envisager des modifications sur les équipements en place, imaginer et tester de nouvelles configurations de production...

Ces résultats permettront de garantir la maîtrise des coûts avec une réduction ou augmentation de la production des utilités (eau chaude, vapeur, électricité), la valorisation et la performance énergétique de notre système par :

- Une augmentation de la biomasse disponible par un accroissement du rendement énergétique
- Une meilleure utilisation de la biomasse de process
- Une optimisation des processus de production d'énergie

1.3. Méthodologie

L'objectif du projet à travers ce titre est d'analyser la production énergétique à travers le bilan énergétique qui est basée sur le PCS du combustible qui est ici la bagasse. Pour cela le travail s'appuiera sur une analyse des performances de la centrale énergétique (chaudière et turboalternateurs, et leurs auxiliaires) via le bilan complet, avec une identification des contre-performances tel que les différentes pertes liées à l'humidité de la bagasse, à sa qualité et des pertes de vapeur avec l'ouverture des vannes de mise à l'air.

Dans un premier temps, on fera un diagnostic de l'existant c'est-à-dire une analyse du système de production de la vapeur et de l'électricité à travers le bilan énergétique de la chaudière, de la production de bagasse jusqu'à sa consommation dans la chaudière, mais aussi du bilan exergétique qui nous permettra de savoir les flux de chaleur perdus en échange avec le milieu extérieur.

Dans un deuxième temps, ce travail va se focaliser sur la détermination de la marche opératoire optimale de la chaudière qui fonctionne en cycle à vapeur de Hirn avec resurchauffe afin d'optimiser la production d'énergie (eau chaude, vapeur, électricité), réduire les pertes en vapeur et les émissions de Gaz à Effet de Serre. En déduire des solutions dont la réalisation aboutirait à l'amélioration de la production énergétique.

Ces calculs se feront à l'aide des données qui proviennent des enregistrements des différents manomètres, capteurs disposés partout dans l'installation et qui donnent en temps réel les informations dont nous avons besoin. Elles sont collectées quotidiennement grâce à des logiciels incorporés dans le programme d'exploitation d'IJT.

Les travaux permettront de produire des recommandations pour un fonctionnement optimum du point de vue énergétique, économique et environnemental sur la durée retenue pour l'évaluation financière ou de l'estimation du retour sur investissement de l'introduction d'un nouvel équipement sur l'impact de la production énergétique en fonction :

- de la production optimale de la chaudière à vapeur.
- du régime de marche optimale du turbo-alternateur
- des émissions de gaz à Effet de Serre (en tonne équivalent de carbone CO₂) et du contrôle efficace des émissions toxiques

1.4. Présentation de la compagnie sucrière sénégalaise

1.4.1. Historique

Situé au nord du Sénégal, dans la province de Saint-Louis, le complexe agro- industriel de la CSS (Compagnie Sucrière Sénégalaise) de Richard-Toll a été créé en 1970. Mais toute une histoire a précédé sa création.

L'idée est venue de l'état Sénégalais suite à la liquidation de la SDRS (Société de Développement Rizicole du Sénégal) en 1972 qui s'était heurté à des problèmes de gestion : déficit budgétaire, baisse de la production, dégradation des planages et des matériaux. La décision a été prise après des études d'essai de canne à sucre menées en 1966, par l'Institut de recherche agronomique tropicale (IRAT) (*Karalan Sy, 2005*). Ces études de l'IRAT à l'époque avaient convaincu le promoteur de la faisabilité de la canne à sucre taxé jadis, de **canne à sel** par ses détracteurs sur l'ancien casier rizicole. L'histoire de la Compagnie Sucrière Sénégalaise est née ainsi.

L'objectif du gouvernement sénégalais était double en pensant à cette idée : d'abord réduire le déficit alimentaire en sucre du Sénégal et délocaliser les activités économiques, essentiellement concentrées à Dakar (*Mahamadou Maïga, 1995*).

Pour la réalisation du complexe sucrier à Richard Toll, l'Etat du Sénégal avait sollicité le Groupe français Mimran. L'existence d'infrastructures (champs, canaux, eaux, etc.) et de ressources humaines (personnel du SDRS) a beaucoup contribué à convaincre d'exploiter la canne à Richard Toll (*Mbaye K., 1986*).

1.4.2. De nos jours

Ce n'est qu'entre 1972-1973 qu'elle a commencé à produire du sucre. Le complexe agro-industriel s'étend sur 12 000 ha de terres irriguées affectées à une plantation de canne à sucre, avec une production annuelle de plus de 1 million de tonnes de canne et une production supérieure à 100.000 tonnes de sucre par an.

C'est une société anonyme Sénégalaise au capital de 14.6 milliards Francs CFA avec environ 6000 employés et près de 70 milliards de F CFA en termes de chiffres d'affaires ; ce qui fait de la Compagnie Sucrière Sénégalaise, le premier employeur privé du pays après l'Etat.

Disposant d'un Service Médical, d'une cité résidentielle pour les cadres, d'une cité de 400 logements et d'une école dispensant un programme d'enseignement en français, la CSS est à l'origine de l'expansion démographique exponentielle de la ville de Richard-Toll qui, de 2000 habitants dans les années 1970, compte à présent plus de 100 000 habitants et devient ainsi la deuxième ville la plus peuplée de la Vallée du fleuve Sénégal après Saint-Louis, la capitale régionale.

En termes d'outil industriel, la CSS possède actuellement

- d'une distillerie avec une capacité annuelle de 20.000 m³ d'alcool pur qui est en exploitation depuis 2008. Le sucre contenu dans la mélasse est transformé par fermentation en alcool et est séparé dans des colonnes à distiller



Figure 1: Distillerie d'éthanol de la CSS

Ainsi donc La CSS approvisionne le marché Sénégalais en biocarburant (Ethanol), et une partie du marché de la sous-région (Burkina Faso, Mali...) en alcool pour la pharmacie et les parfums.

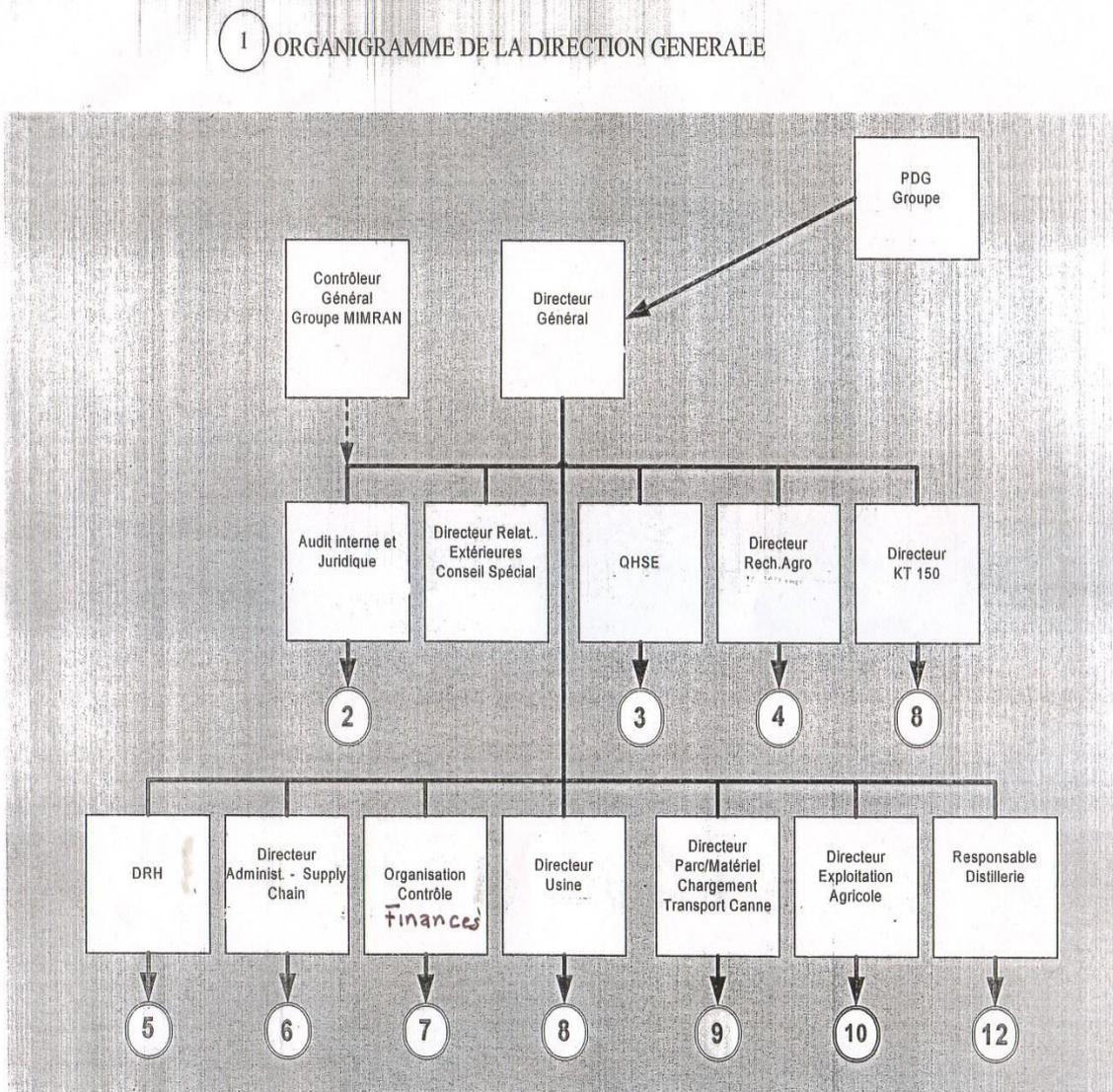
- d'une usine de sucrerie-raffinerie d'une capacité de 6000 Tonnes de cannes par jour
- une usine de tuyauterie en plastique pour l'irrigation
- De deux centrale électrique l'un d'une capacité de 23,3 MW composé de quatre turboalternateurs et l'autre de 25 MW utilisant la bagasse dans les générateurs de vapeurs (chaudières)
- D'une ancienne chaufferie constituée de 4 chaudières mixtes BR (Bagasse, fuel lourd) d'une capacité de 200 t/h.
- De trois Groupes électrogènes dans le site industriel d'une capacité de 5,6 MW

Elle possède aussi un parc automobile de 600 véhicules et engins spécialisés et un garage pour l'entretien mécanique de ses véhicules.

1.4.3. Organigramme

L'équipe de la Compagnie Sucrière Sénégalaise est composée à ce jour de plusieurs membres dirigés par le Directeur Général M. André FROISSARD. Pour s'assurer de ses missions, la CSS s'est dotée d'une organisation qui lui permet de prendre en charge le développement durable de l'industrie sucrière, les prestations de service en développement rural durable et la diversification agro-industrielle. La structuration est représentée dans le diagramme ci-dessous :

Figure 2 : Organigramme de la CSS



Validation : A. FROISSARD

19/11/08
novembre 2008

1.4.4. Responsabilité sociétale

La CSS dispose également d'un club de football qui porte son nom et qui évolue au plus haut niveau du championnat du Sénégal de football.

La CSS assure l'approvisionnement en eau potable des populations environnantes. Ce sont 21400 litres d'eau potable qui sont quotidiennement distribués par camion-citerne aux populations des 22 villages environnants. Des abreuvoirs ont également été créés à la périphérie de l'exploitation agricole, pour l'alimentation en eau du bétail (plus de 100 000 têtes). En plus la CSS a financé la construction d'un réseau de forage dans le département de Dagana.

Près de 4500 hectares, exploités par plus de 12000 agriculteurs et jardiniers, sous forme de maraîchage ou de riziculture, sont également irrigués gratuitement à partir du réseau d'eau de la CSS. Cette dernière tolère l'utilisation de l'eau du canal, que cela soit à des fins agricoles ou domestiques

Du côté de l'éducation, la CSS possède une école « l'école Jacques Mimran » logé au sein de la Cité des Cadres de la Compagnie Sucrière Sénégalaise pouvant accueillir une centaine d'élèves de la petite section de maternelle jusqu'à la classe de troisième. La majorité des enfants du personnel de la société étant scolarisée dans des établissements scolaires publics de la ville, la CSS contribue par un soutien financier et matériel récurrent, au développement de ces structures.

2. GENERALITES SUR LE PROJET

2.1. Présentation du projet KT 150

Au début de l'année 2008, le gouvernement sénégalais à travers son président Abdoulaye Wade avait initié la Grande Offensive Agricole pour la Nourriture et l'Abondance (GOANA) afin d'amener le pays vers l'autosuffisance alimentaire. La CSS fleuron de l'industrie agro-alimentaire s'est immédiatement engagé dans ce mouvement et a mis en place le projet KT 150, qui signifie 150 000 tonnes de sucre correspondant à la consommation nationale à l'horizon 2013/2014 (*Journal de la CSS, Aout 2009*).

KT 150 est un vaste programme d'investissement de plus de 50 milliards de F CFA dont les principales étapes sont :

- De 2008/10 : Energie avec la construction d'une chaudière de 150 tonnes/heures de vapeur, l'installation d'un nouveau turbo-alternateur de 25 000 kW, la transformation du circuit de la bagasse
- De 2010/11 : Changement de la batterie de moulin pour pouvoir broyer 450 tonnes de cannes à l'heure et de l'atelier d'évaporation pour concentrer le jus produit
- De 2011/12 : Travaux sur l'atelier d'épuration de la refonte du sucre A, sur la cristallisation et la raffinerie pour atteindre 8000 t cannes/jour en améliorant la qualité
- De 2012/13 : Suite des travaux d'extension en cristallisation et raffinerie, et renforcement de l'alimentation des moulins en cannes. Passage de 9000 T cannes/jour
- De 2013/14 : Etape finale avec les ateliers de décantation du jus et du séchage du sucre pour atteindre les 10 000 T cannes/jour

L'installation d'une nouvelle chaudière de 150 tonnes/heure et d'un nouveau turbo-alternateur de 25 MW permettra à l'usine d'avoir une bonne efficacité thermique nécessaire pour fournir suffisamment de bagasse à la fin de la saison enfin de satisfaire les besoins énergétiques complets de la CSS durant la période hors récolte.



Figure 3: Vue générale de la chaudière ISGEC John Thompson

Avec ce projet, la CSS s'est fixée un objectif de consommation nulle de carburant acheté, à l'avenir, à la fois pendant la saison de campagne et hors saison. En outre, la société va exploiter la première centrale de cogénération de la République du Sénégal pour exporter de l'énergie électrique excédentaire au réseau électrique national. La production annuelle totale d'électricité devrait être d'environ 101 GWh par an dans laquelle 28 GWh par an sera vendue au réseau électrique nationale (CDM-PDD, 2006).

En améliorant l'efficacité énergétique de l'usine de cogénération, le projet contribuera à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), car il produira de l'électricité à partir d'une source renouvelable. En conséquence, il est prévu de fournir des réductions d'émissions sur une moyenne annuelle de 37 386 t CO₂e et 261 702 t de CO₂e au cours de la première période de sept ans (CDM-PDD, 2006).

2.2. Description générale des installations

2.2.1. La chaudière

La chaudière installée dans les locaux de la Compagnie Sucrière Sénégalaise est une chaudière à tube d'eau conçue et fabriquée par ISGEC John Thompson (IJT). Elle comporte un ballon supérieur, un ballon inférieur, bi-tambour, un tube d'eau, un foyer mécanique équipé d'une grille mobile, avec un système de circulation naturelle et alimentée à 100 %

bagasse. Cette chaudière est équipée de composants sous pressions fiables et de facture traditionnelle, d'un ballon de vapeur, d'un bac à boue, de murs d'eau à membrane et de tuyaux interconnectés. Afin d'attendre la température de vapeur nominale, il existe des surchauffeurs à deux étapes, équipés d'un refroidisseur à orifice fixe. Cette chaudière fournit **150 t/h de vapeur surchauffée à 440 °C et à une pression de 43 bars**.

Tableau 1: Données Générales de la chaudière de la CSS

Détails de la chaudière	1*150 TPH Chaudière à grille
Capacité d'étuvage MCR	150 TPH
Pression de vapeur à MSSV	43 Bar(a)
Température de Vapeur Principale	440°C
Pression de conception de la chaudière	52,96 Bar(g)
Température de conception de la chaudière	445°C
Nb de tambours	Bi-Tambour
Support de chaudière	Support de périphérie
Système de conditionnement des gaz de combustion	Epurateur humide installé
Pression de tarage de la soupape de sureté du surchauffeur	45,21 Bar(g)
Soupape de Sureté du Tambour Supérieur # 1 Pression de tarage	52,47 Bar(g)
Soupape de Sureté du Tambour Supérieur # 2 Pression de tarage	52,96 Bar(g)

Cette chaudière est également munie d'un économiseur dans le but d'augmenter la température de l'eau d'alimentation qui provient du dégazeur à l'aide de la récupération d'une partie de calories restantes dans les gaz de combustion et d'un réchauffeur d'air tubulaire constituant la dernière étape du système de récupération de chaleur afin de la rendre extrêmement efficace. D'après les documents du constructeur, si la chaudière est alimenté à 100 % bagasse et le niveau d'humidité est de 50 %, le rendement thermique au service nominal continu maximal à la base du PCS doit être égale à 70 % (*Manuel d'emploi et d'entretien chaudière à grille roulante volume I*).

Afin de lutter contre la pollution atmosphérique, la chaudière est dotée de deux laveurs efficaces en vue de limiter le dégagement particulaire à 120 mg/Nm³.

2.2.2. Le Groupe Turbo Alternateur

Le Groupe Turbo Alternateur est une installation du groupe GE Oil Gas & Company d'une puissance de 25 MW. Il est composé d'une turbine à huit étages, d'un réducteur, d'un alternateur fourni par JEUMONT Electric, d'un condenseur et d'un groupe de mise sous vide. La vapeur provenant du ballon supérieur arrive au barillet HP pour entrer dans la turbine avec les conditions d'admission de 440 °C et à une pression de 42 bars et les conditions d'échappement sont de 44°C à une pression 0.1 bar abs.

La turbine est une turbine 8MCE8 avec :

- le premier 8 étant le diamètre de l'axe de la turbine.
- M pour Multi soupape
- C pour la condensation
- E pour le soutirage réglé
- Et le dernier 8 étant le nombre d'étages de la turbine

Elle produit en continu un maximum d'électricité, la vapeur à la sortie étant condensée sous vide pour accroître le rendement du cycle et à extraction réglée qui régule la pression du soutirage en réglant le débit admis dans la partie basse pression de la turbine pour la production de vapeur vers la fabrication permettant d'optimiser conjointement la production de chaleur et d'électricité en fonction des besoins. Le soutirage est effectué entre le 4^{ème} et le 5^{ème} étage. Sa vitesse nominale est de 5250 tr/min, tandis que la fréquence nominale de l'alternateur est de 52,5 Hz.

Pour obtenir un meilleur rendement, l'extraction est réglée à l'aide d'un obturateur à grille, adapté aux débits volumiques importants admis dans la section basse pression de la turbine. Le soutirage est à une pression de 1,5 bar maximal et à une température de 105°C qui est envoyée directement vers le barillet BP pour alimenter les évaporateurs de la sucrerie.

2.2.3. Les aérocondenseurs

La turbine est reliée à un aérocondenseur composé de 5 tours identiques équipés de ventilateurs de fréquence pouvant évacuer une puissance thermique totale de 32,5 MW qui sont disposés en rangées parallèles. Chaque module fonctionne en réalisant un échange entre un flux d'air à contre-courant et un débit d'eau à l'intérieur des tours de refroidissement. Les ventilateurs permettent de créer un courant ascensionnel à l'intérieur des tours. Le refroidissement est rendu possible par l'évaporation d'une partie de l'eau et par transfert de chaleur.

Les aérocondenseurs sont dimensionnés pour évacuer toute la puissance thermique correspondant à la condensation de la vapeur de l'échappement turbine, des autres échangeurs du GTA (Huile HP, Huile BP,...) et le besoin en eau de refroidissement de la chaudière IJT. Les variateurs appliquent la même vitesse aux ventilateurs, ce qui permet d'ajuster le débit d'air en fonction de la puissance calorifique à dissiper. L'eau refroidie est ensuite pompée par deux des trois pompes vers le condenseur GTA.

2.2.4. Circuit d'eau et de vapeur d'eau

L'eau telle quelle existe dans la nature ne peut être utilisée à des fins industrielles. Pour toute utilisation des eaux, il est souhaitable d'en enlever la dureté et d'autres éléments similaires tels que la silice qui risque de former des dépôts de boues. Toutes les impuretés de l'eau doivent être enlevées pour les chaudières à haute pression tel que IJT. Elles sont conçues pour être hautement compactes et économes et ne peuvent donc supporter que très peu de corrosion et de dépôts de boues. De plus les turbines à vapeur moderne ont besoin d'une grande pureté de vapeur pour un fonctionnement optimal.

L'eau venant de la bêche alimentaire s'échauffe avant son introduction dans le ballon supérieur par son passage dans l'économiseur. Ce qui permet d'augmenter sa température en mélange avec la vapeur. Après, l'eau passe à travers des tubes appelés tubes écrans qui sont exposés directement aux flammes pour ensuite remonter au ballon supérieur en parcourant les tubes de dégagement, ainsi complétant le circuit de circulation naturelle.

Le rôle fondamental du ballon supérieur, au niveau duquel se fait l'alimentation en eau de la chaudière sera d'assurer une bonne séparation du mélange eau-vapeur par l'intermédiaire des chicanes canalisant le mélange vers les cyclones séparateurs et les débrumiseurs. La vapeur doit être exempte de gouttelettes d'eau pouvant perturber la bonne marche de l'installation (GTA). C'est pourquoi la vapeur saturée passe au surchauffeur primaire où sa température est élevée à pression constante en parcourant les connexions saturées. Du surchauffeur primaire, la vapeur entre dans le surchauffeur secondaire en passant par le refroidisseur qui règle la température de la vapeur surchauffée à la température nominale et la quitte à un paramètre nominal.

2.2.5. Circuit de l'air et de la fumée

Cette chaudière utilise trois systèmes d'air pour satisfaire le processus de combustion et maintenir le rendement de combustion. L'un est le système de tirage forcé ou air primaire (FD) pour la combustion, en deux le système d'air secondaire (SA) pour disperser le combustible et fournir de l'air secondaire au foyer et en dernier le système de tirage d'air "Induced Draft" (ID) pour déverser les fumées dans la cheminée. L'air total requis pour la combustion passe d'abord par le réchauffeur d'air qui aide à récupérer la chaleur des fumées sortant de la chaudière, et ainsi aide à atteindre un rendement supérieur.

40 % de l'air de combustion sortant du réchauffeur est de l'air secondaire qui est alimenté à 3 niveaux sur le panneau du mur d'eau à l'avant et à 4 niveaux sur le panneau du mur d'eau à l'arrière ; et 60 % de l'air sortant du réchauffeur est de l'air primaire fourni au foyer par l'intermédiaire des petites ouvertures situé sous la grille mobile. Après la combustion la fumée du foyer est aspirée par les 2 ventilateurs de tirage (ID). Ces ventilateurs produisent une dépression suffisante pour permettre la circulation de l'air dans la chaudière, décharger les produits de combustion dans l'atmosphère et d'éviter la fuite de gaz chaud du foyer.

Avant de partir dans l'atmosphère, les fumées passent à travers les laveurs. Elles sont alors filtrées et les résidus sont évacués par les trémiers situés sous ceux-ci avant de passer par les caniveaux, pour rejoindre le centre de traitement des eaux usées.

2.2.6. Circuit des eaux usées

Le circuit des eaux usées est un circuit fermé. Son recyclage remplit un double objectif d'économie et de protection de la ressource : en amont, il permet de l'économiser en fournissant une eau pour évacuer les cendres, tandis qu'à l'autre bout de la chaîne, il diminue le volume des rejets d'eaux usées dans l'environnement.

Sous la chaudière, les résidus de cendres issues de la combustion passent à travers les trémiers situés sous la chaudière et la chaufferie. Une injection d'eau provenant de l'écluse permet d'évacuer les cendres qui partent au niveau de la fosse. Arrivée là-bas, une pompe amène les eaux usées des fosses au clarificateur permettant aux particules solides de se déposer dans le fond et aux particules plus légères de remonter à la surface. Une autre pompe située sous le clarificateur permet de récupérer les particules solides pour les envoyer au niveau du transporteur à cendres où elles seront récupérées par des camions disposés sous le silo et acheminés vers les champs de cannes de sucre pour l'utiliser comme fertilisant tandis que l'eau repasse dans un ballon de stockage où il sera décanté et renvoyé sous les laveurs.

2.2.7. La bagasse

La bagasse est un sous-produit / déchets de la canne à sucre dans l'industrie du sucre. Elle est un carburant de composition variable. Ces caractéristiques dépendent du climat, du type de sol sur lequel la canne est cultivée, de la variété de la canne, de la méthode de récolte, et du rendement de l'installation de broyage (*Sankalp Shrivastav et Ibrahim Hussain, 2013*). Au niveau de la CSS, nous avons différentes qualités de cannes à sucres sont cultivées dans les champs et ainsi chaque canne diffère de l'autre de par sa teneur en sucre, en fibres. Normalement, la bagasse alimente directement la chaudière pour générer de la vapeur et la bagasse excédentaire est stockée dans la cour à bagasse.

2.3. Méthodologies

2.3.1. Etudes Energétiques

a) Calcul du PCS

Deux types de pouvoir calorifique sont présents dans la littérature :

- (a) le Pouvoir Calorifique Supérieur ou PCS qui est la chaleur libérée par 1 kg de combustible pris à 0°C et sous une pression de 760 mm de mercure

- (b) le Pouvoir Calorifique Inférieur ou PCI qui suppose que la vapeur d'eau présente dans les fumées ne se condense pas et quitte le milieu réactionnel non condensée.

Le PCS donne une bonne mesure de la chaleur théoriquement disponible dans le combustible mais le PCI donne une mesure plus juste de la chaleur pratiquement disponible. En dépit de la différence considérable en apparence entre les différentes variétés de cannes, le PCS de la bagasse sèche est quasiment constant dans tous les pays et pour toutes les variétés de cannes (Hugot, 1986). Le constructeur a évalué son rendement en se basant sur le PCS (Hugot, 1986) ce qui nous pousse à choisir le PCS avec la formule :

$$PCS \text{ (kcal kg)} = 4600 - 12s - 46w$$

Avec $s = \% \text{ taux saccharose de la bagasse}$

$w = \% \text{ humidité de la bagasse}$

Dans cette formule, les différentes pertes de chaleur suivantes ont été prises en compte du point de vue de la production de vapeur dans le milieu industriel

- la chaleur latente de vaporisation de l'eau formée par la combustion de l'hydrogène contenu dans la bagasse qui est perdu dans les fumées de gaz
- la chaleur latente de vaporisation de l'eau contenue dans la bagasse qui de la même manière est perdue dans les gaz de combustion

b) Calcul du Rendement de la chaudière

La formule utilisée pour le rendement de la chaudière est une formule spécifique de l'industrie sucrière et a été développée par E. Hugot dans la 3^{ème} édition du livre référence de la Sucrerie Hand Book of Cane Sugar Engineering publié par Elsevier Sciences. Cet ouvrage est le fruit d'une collaboration de :

- ISSCT International Society of Sugar Cane Technologists
- QSSCT Queensland Society of Sugar Cane Technologists
- SASFPI South African Sugar Factory Plant Installations
- SASTA South African Sugar Technologists' Association
- SMRI Sugar Milling Research Institute
- TSJ The Sugar Journal

Des études scientifiques faites par Anjum Munir and al., 2004 du département d'énergie et des procédés industriels de University of Agriculture Faisalabad - Pakistan sur le rendement énergétique d'une chaudière à bagasse en se basant et en comparant le rendement avec la température des fumées de gaz à l'extraction et celui avec la valeur totale d'énergie de la vapeur ont montré une différence de +/- 0,52 %. Ce qui nous conforte dans le choix de cette formule.

Le calcul du rendement de la chaudière s'est fait en deux parties :

- (a) la première étant le rendement de la chaudière sur la base de la température des gaz de combustion

Cette méthode se base sur la température des gaz de combustion sortant de la chaudière tout juste après l'économiseur et le réchauffeur d'air. Il est en général appelé le rendement global (Hugot, 1986) et sa formule s'écrit :

$$\eta = \frac{M_v}{N_s} = \frac{\text{Quantité de chaleur transférée à la vapeur}}{\text{PCS de la bagasse}}$$

Malgré la quantité de chaleur disponible par unité de poids de la bagasse, nous avons des pertes de chaleur. Parmi ces pertes qui méritent d'être pris en compte,

- on a la chaleur sensible perdue dans les gaz de combustion et qui est donné par la formule :

$$q = 1 - w \quad 1,4m - 0,13 \quad + 0,5 t$$

Où q = Chaleur sensible perdue dans les gaz de combustion en (kcal kg)

t = température des gaz de combustion sortie réchauffeur en (°C)

w = humidité par unité de bagasse

m = rapport entre le poids de l'air utilisée à celui théoriquement nécessaire

- les pertes prenant en compte les imbrulés solides données par un coefficient α
- les pertes de radiation dans le foyer et plus précisément de la chaudière β
- les pertes dues à la combustion incomplète de la bagasse γ

Ce qui fait que la quantité de chaleur finalement transférée à la vapeur sera donnée par l'expression :

$$M_v = 4250 - 12s - 48,5w - q * \alpha * \beta * \gamma$$

Pourquoi nous avons opté pour le calcul du rendement de la chaudière en se basant sur le Pouvoir Calorifique Supérieur, tout simplement car le constructeur ISGEC John Thompson INDIA évalue le rendement de la chaudière à 70 % sur base du PCS et avec une bagasse à 50 % d'humidité. Avec une analyse élémentaire de la bagasse suivante :

Tableau 2: Analyse Élémentaire du combustible par masse pour le dimensionnement de la chaudière

Analyse Élémentaire	Bagasse
Humidité (%)	50
Cendre (%)	1,5
Carbone (%)	23,5
Hydrogène (%)	3,25
Nitrogène (%)	0
Soufre (%)	0
Oxygène (%)	21,75
PCS (à l'allumage) kcal/kg	2272

Ces paramètres ont été calculés à partir d'un contexte où la température ambiante est de 30 °C, l'humidité relative de 60 %, la température de l'admission d'eau jusqu'à l'économiseur 105 °C et la température de gaz au réchauffeur d'air 150 °C (*Manuel d'emploi et d'entretien chaudière à grille roulante volume I, Chapitre IV Présentation et Description de la chaudière*)

Les différentes pertes thermiques de la chaudière évaluées par le constructeur en négligeant les pertes dans les fumées dues à l'humidité du combustible et les pertes dues à l'eau formée par la combustion de l'hydrogène sont inscrites dans le tableau suivant :

Tableau 3: Déperdition calorifique et rendement thermique

Les différentes pertes	Unités (%)
Pertes d'imbrulés solides	1,1
Pertes de gaz sec	4,96
Pertes d'eau du combustible	13,96
Pertes par rayonnement	0,38
Pertes non comptabilisés	0,2
Marge du fabricant	1,08

Ce qui nous donne un coefficient de perte totale égale à 0,85.

c) Ratio de combustion et Evaluation des différentes pertes

➤ Ratio de combustion

On peut évaluer le ratio de combustion de la chaudière et de même la consommation à partir de la température des fumées à l'extraction sortie surchauffeur (*Hugot, 1986*). Ce qui peut permettre de connaître pour une chaudière comme IJT, la quantité de bagasse consommée. La formule qui sera utilisée sera basée sur la quantité de chaleur transférée au vapeur et va s'écrire :

$$r = \frac{\text{Quantité de chaleur transférée à la vapeur}}{\text{Enthalpie vapeur surchauffée} - \text{Enthalpie eau alimentaire}}$$

Etant donné qu'on connaît la production de vapeur et le ratio de combustion, on peut calculer la consommation moyenne en bagasse de la chaudière avec la formule :

$$\text{Consommation bagasse (t h)} = \frac{\text{Production moyenne de vapeur (t h)}}{\text{Ratio de combustion}}$$

➤ Evaluation des différentes pertes

Les différentes pertes ont été recensées. Ainsi le taux de perte par purges au niveau de la chaudière a été évalué à 2 % sur référence du document constructeur, car la chaudière dispose d'une purge continue et d'une purge discontinue. La première permettant de faire circuler à

nouveau ces pertes et la deuxième de les évacuer au niveau des caniveaux en fonction du taux de **pH** qui doit être maintenue entre **9,5 et 10,5** et de la **conductimétrie** dont la valeur maximale est 250 ppm soit **390,625 $\mu\text{S/cm}$** .

Au niveau de la turbine, les pertes seront données par une formule :

$$\text{Pertes} = 12 * \text{Pression Barillet HP} * C_{vmax} * \text{Pourcentage Ouverture Vanne}$$

Avec C_{vmax} étant le Coefficient maximal de débit de la vanne

2.3.2. Etudes Exergétiques

Dans un contexte de pression sur les ressources naturelles, notamment énergétiques, la réduction des consommations d'énergie est un enjeu crucial. La notion d'exergie offre un cadre global, standard et rigoureux à l'analyse des systèmes énergétiques, et à ce titre, participe à la compréhension et la gestion systémique du défi énergétique.

L'exergie mesure l'énergie « utile » qui peut être extraite d'un réservoir ou d'un flux énergétique. Il s'agit également de l'énergie minimale requise pour créer ce réservoir ou ce flux énergétique.

a) La chaudière

L'efficacité ou rendement exergétique se définit comme le rapport entre l'exergie utile et l'exergie investie dans une transformation ou conversion. La formule utilisée pour le rendement exergétique d'une installation motrice à vapeur tel que la chaudière sera :

$$\eta_{ex} = \frac{m_v[h_2 - h_1 - T_0(S_2 - S_1)]}{m_b[PCS(1 - T_0/T)]}$$

Avec h_1 et S_1 enthalpie et entropie d'entrée (Eau alimentaire)

h_2 et S_2 enthalpie et entropie de sortie (Vapeur HP)

m_v Débit de vapeur HP à la sortie

m_b Débit de bagasse brûlée

PCS Pouvoir Calorifique Supérieure de la bagasse

T température des fumées dans le foyer

b) La turbine

L'équation du rendement exergétique de la turbine est :

$$\eta_{\text{ex turbine}} = \frac{W}{E_1 - E_s - E_c}$$

Avec W exergie fournie par le turbine

$$E_1 = h_1 - T_0 S_1 \text{ exergie à l'entrée de la turbine}$$

$$E_s = h_s - T_0 S_s \text{ exergie soutirée}$$

$$E_c = h_c - T_0 S_c \text{ exergie après détente complète}$$

L'exergie fournie par la turbine est donnée par la relation $W = E_1 - (E_s + E_c + E_p)$ ou E_p est l'exergie perdue par la turbine. Bien que cela constitue la grandeur pertinente pour mesurer de façon standardisée consommations et productions d'énergie dans l'industrie, la notion d'exergie est encore très peu utilisée dans l'industrie. Ainsi les différents calculs seront faites avec l'exergie dans l'environnement supposé nulle et à une température ambiante égale à 35°C.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Bilans Energétiques

3.1.1. Propriétés de la bagasse

Les propriétés physiques de la bagasse ont été déterminées par le laboratoire qui est chargé de fournir les caractéristiques de la bagasse sortant du moulin équipé de cinq moulins MillMax de dernière génération, ainsi que d'un bourreur et d'un niveleur. Parmi ses propriétés les plus importantes, on peut citer la teneur en saccharose (Pol bagasse) et la teneur en humidité. Ce dernier constitue un des éléments essentiels comme le montre les études menées par J.Sudhakar and P.Vijay (*J.Sudhakar and P.Vijay, 2013*) qui disent que 90 % des pertes d'une chaudière à bagasse sont en général causés par la teneur en humidité.

Les caractéristiques de la bagasse sortant du moulin sont présentées dans le tableau suivant, il comporte le tonnage de cannes traitées par les moulins ainsi que la bagasse produite avec son taux en humidité et en saccharose. Il ne comporte pas ainsi le tonnage de bagasse consommée

car il nous est impossible de déterminer avec exactitude la quantité de bagasse consommée par IJT. Cette valeur sera calculée par la suite dans notre mémoire grâce à une formule trouvée dans Hand Book of Cane Sugar Engineering 3rd Edition d'un pionnier de l'industrie sucrière E. Hugot :

Tableau 4: Récapitulatif tonne de cannes traitées et de la bagasse produite

Semaine	Données	121 ^{ème} jour de campagne au 151 ^{ème} jour de campagne						
		1 ^{er} jour	2 ^e jour	3 ^e jour	4 ^e jour	5 ^e jour	6 ^e jour	7 ^e jour
1 ^{ère} Semaine	Cannes traitées (t)	6575,56	6706,98	6006,4	5774,3	5860,02	6527,3	6302,84
	Bagasse Produite (t)	1578,74	2861,12	2815,47	2260,7	2186,41	2191,55	2479
	Humidité (%)	49,79	53,59	53,24	50,69	50,45	50,5	50,51
	Pol bagasse (%)	2,9	2,87	2,8	2,61	2,52	2,63	2,67
2 ^{ème} Semaine	Cannes traitées (t)	6891,06	6259,22	6299,66	5210,42	6461,64	6419,68	6127
	Bagasse Produite (t)	2444,14	2426,67	2139,52	2129,06	1825,37	2218,29	2194,52
	Humidité (%)	49,44	49,64	50,57	48,1	50,38	49,76	50,13
	Pol bagasse (%)	2,8	2,77	2,55	2,52	2,7	2,55	2,5
3 ^{ème} Semaine	Cannes traitées (t)	5918,06	6051,14	2283,52	0	5248,54	3586,42	5077,12
	Bagasse Produite (t)	2115,1	2117,85	2189,35	0	865,38	2249,55	1271,18
	Humidité (%)	50,2	50,8	49,7	0	51	50,3	49,71
	Pol bagasse (%)	2,54	2,83	2,95	0	2,63	2,49	2,59
4 ^{ème} Semaine	Cannes traitées (t)	6639,08	6968,16	7130,52	6585,4	7101,46	6978,28	6625,52
	Bagasse Produite (t)	1952,88	2385,9	2381,69	2402,13	2310,17	2459,43	2396,87
	Humidité (%)	49,3	50,3	48,5	51	50,1	49,5	49,8
	Pol bagasse (%)	2,41	2,56	2,51	2,33	2,65	2,45	2,39
5 ^{ème} Semaine	Cannes traitées (t)	6800,9	6571,9	6404,88				
	Bagasse Produite (t)	2352,24	2566,28	2371,44				
	Humidité (%)	49,6	50,4	50,6				
	Pol bagasse (%)	2,3	2,45	2,39				

L'objectif de la campagne était d'arriver à une production de 1 108 400 tonnes de cannes traitées soit une production journalière de 6500 tonnes de canne par jour.

La quantité d'air de combustion finale est réglée avec le contrôleur d'oxygène du gaz de combustion qui est équipé d'un variateur de vitesse. Pour s'assurer qu'une quantité suffisante d'excès d'air est maintenue à tout moment, un rapport air/combustible est calculé en divisant le débit d'air total de la chaudière par l'écoulement du combustible et une alarme est déclenchée si elle tombe au-dessous des conditions stœchiométriques.

La combustion de la bagasse produit des fumées à haute température. Avant d'être évacuée par la cheminée qui régule la dépression dans le foyer, il passe par l'économiseur pour augmenter la température de l'eau alimentaire avant de remplir le ballon supérieur et par le réchauffeur pour élever la température de l'air d'alimentation.

3.1.2. Rendement et Ratio de consommation

➤ Rendement et Ratio de combustion

Le bilan de fonctionnement basé sur le mois de mars pour évaluer le rendement de la chaudière IJT a donné un **rendement moyen de 59,8 % avec un PCS moyen de 2273,4 kcal/kg** sur référence du constructeur qui l'évalue à **70 % pour un PCS de 2272 kcal/kg** donc un manque à gagner de 10 % . Le calcul du ratio de combustion est égal à 2. Les valeurs obtenues ont été résumés dans le tableau suivant :

Ratio de combustion	Consommation en bagasse (t)	Humidité (%)	PCS (kcal/kg)	Rendement (%)
2	1259,47	50	2273,4	59,8

La consommation moyenne en bagasse évolue avec le débit de vapeur généré dans la chaudière. Ce qui fait que pour une production de vapeur de 105 t/h, le débit de bagasse brûlée sera de 52,48 t/h.

Nous avons constaté que le rendement augmente avec une diminution de la température des fumées à la sortie du réchauffeur d'air avec un excès d'air moyen de 45 %. Ainsi le meilleur rendement qu'on a eu était de l'ordre de 60,36 % pour une température d'extraction de 130,62 °C. Ce résultat a été obtenu le lendemain de la maintenance mensuelle de la chaudière. En fait l'échange de chaleur devient meilleur avec l'enlèvement des encrassements qui obstrue les tubes et empêche leur bon fonctionnement.

Parmi les défauts de fonctionnement, on a la conduite d'automatisation de la chaudière, des pertes de pressions au niveau du circuit d'alimentation d'air et de l'extraction d'air. La chaudière a été conçue pour fonctionner de manière automatique. La régulation n'étant pas parfaite, les conducteurs sont confrontés à des problèmes tels que diminution de la température de la chaudière, augmentation de la pression du barillet HP donc une non-conformité de la production énergétique.

3.2. Bilan exergétique

L'exergie associée à un transfert ou à un stock d'énergie peut être définie comme le potentiel travail maximal qu'il serait idéalement possible de tirer de chaque unité énergétique transférée ou stockée. Ainsi en faisant une analyse exergétique, on sait exactement la quantité d'énergie que perd notre système en échangeant avec le milieu extérieur et on peut évaluer efficacement les performances de la chaudière et de la turbine.

Après les calculs, on retrouve un **rendement exergétique égale à 35 %**, ce qui est un très bon rendement comparé aux autres chaudières à tube d'eau qui évalue leur meilleur rendement exergétique à 30 % (*Diop Mballo, 2001*). Pour la **turbine**, on se retrouve avec un rendement exergétique égale à **87 %**.

L'objectif de ce chapitre était de faire des calculs pour avoir une base d'analyse exergétique de la chaudière et de la turbine. Le bilan thermique ou énergétique fondé sur le premier principe de la thermodynamique bien que correct n'en demeure pas moins incomplet. En effet, le premier principe consiste à constater une équivalence entre le travail et la quantité de chaleur

qui a servi à sa production, mais il n'en résulte pas que toute quantité donnée de chaleur puisse être transformée entièrement en travail. C'est pour cette raison que le bilan exergetique est utilisé en complément au bilan énergétique.

Ainsi le bilan exergetique nous a permis de comprendre un peu plus le fonctionnement de nos installations et d'identifier les raisons de la non-optimisation de notre production énergétique.

3.3. Analyse de la production de vapeur et d'électricité

L'importance de la production de vapeur dans l'industrie de la canne à sucre a été reconnue depuis des décennies. Et il convient de souligner que l'énergie totale consommée par la CSS provient de la production de vapeur. Avec les précédentes considérations, la production et consommation de vapeur est liée au tonnage de canne. Cette pratique est normale, puisque le taux de broyage en termes de canne est la figure essentielle de l'usine.

La vapeur produite par IJT passe par un processus. D'abord sous forme de vapeur saturée : vapeur encore humide qui est dangereuse pour le GTA, puis cette vapeur saturée est récupérée au niveau des surchauffeurs (Primaire et Secondaire) afin d'obtenir de la vapeur surchauffée (sèche) à une très haute pression. En effet nous savons que dans un cycle thermodynamique, pour augmenter la chute enthalpique possible au niveau de la turbine, on peut augmenter la pression et/ou la température à l'admission, ou réduire la pression et/ou la température à l'échappement. Voilà pourquoi on fait passer le vapeur par deux étapes au niveau des surchauffeurs.

Cette vapeur est collectée au niveau du barillet HP (Haute Pression) pour l'alimentation du Groupe Turbo-Alternateur GE qui fournit l'énergie électrique et pour la production de vapeur BP (Basse Pression) au bypass HP/BP après désurchauffe. La production de vapeur journalière nécessaire au fonctionnement de la CSS est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 5: Caractéristiques de la production de vapeur

Semaine	Données	121 ^{ème} jour de campagne au 151 ^{ème} jour de campagne						
		1er jour	2e jour	3e jour	4e jour	5e jour	6e jour	7e jour
1 ^{ère} Semaine	Vapeur produite (t)	2192,4	2475,03	2465,67	2592,75	2522,48	2337,38	2428,83
	Pression vapeur (bar)	41,67	43,21	43,09	43	41,83	42,75	42,69
	Débit Vapeur (t/h)	91,4	103,1	102,75	108,01	105,12	97,38	101,22
2 ^{ème} Semaine	Vapeur produite (t)	2542,85	2482,18	2486,86	2591,32	2497,72	2523,77	2485,38
	Pression vapeur (bar)	42,77	42,71	43,44	42,93	42,76	42,58	43,07
	Débit Vapeur (t/h)	105,96	103,42	103,62	107,97	104,07	105,14	103,56
3 ^{ème} Semaine	Vapeur produite (t)	2378,04	2340,2	2321,32	1320,63	2,14	2688,61	2515,71
	Pression vapeur (bar)	42,99	42,8	42,9	29,13	0,53	42,43	42,76
	Débit Vapeur (t/h)	99,08	97,5	96,72	54,69	0,09	112	104,83
4 ^{ème} Semaine	Vapeur produite (t)	2551,01	2598,29	2615,16	2685,28	2611,57	2601,71	2605,6
	Pression vapeur (bar)	42,71	43,08	42,56	42,72	43,04	42,93	42,5
	Débit Vapeur (t/h)	106,28	108,25	108,96	111,92	108,77	108,38	108,58
5 ^{ème} Semaine	Vapeur produite (t)	2689,03	2716,13	2574,7				
	Pression vapeur (bar)	42,46	42,56	42,67				

	Débit Vapeur (t/h)	112,03	113,16	107,25
Moyenne de la vapeur produite (t)		2525,05		
Moyenne de la pression vapeur (bar)		42,72		
Moyenne du débit vapeur (t/h)		105,21		

Le bilan de vapeur indique 2525,05 t/j de vapeur produite par IJT pour un **pH** de **10,52** et

une **conductivité** égale à **516,86 $\mu\text{S}/\text{cm}$** suite à la consommation en bagasse de 1259,47 t/j. Ainsi le tableau suivant montre la production de vapeur et d'électricité ainsi que son utilisation en fonction :

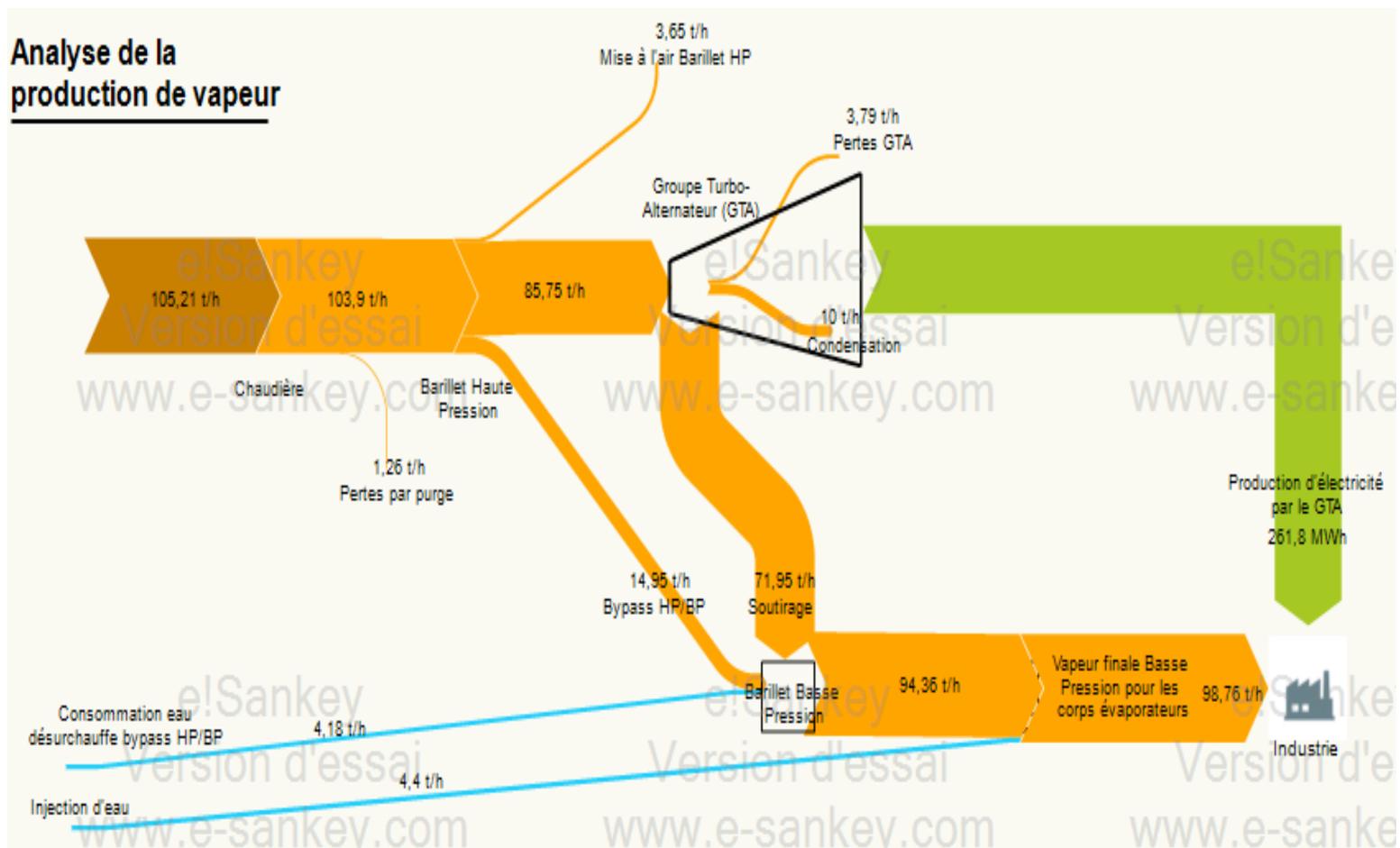
- Du tonnage de cannes traitées
- De la consommation moyenne en bagasse
- De la production de vapeur HP par la chaudière IJT KT 150
- De la production de vapeur BP par le bypass HP/BP et par le Groupe Turbo-Alternateur GE 25 MW par soutirage
- Des besoins en électricité à fournir par le Groupe Turbo-Alternateur
- Des pertes par la vanne de Mise à l'air et des purges

Tableau 6: Production de vapeur

Données	Valeur
Tonnages de cannes traitées (t/h)	255,3
Consommation moyenne en bagasse (t/h)	52,48
Production de vapeur HP par IJT KT150 (t/h)	105,21
Pertes purges IJT (t/h)	1,26
Pertes Vanne de Mise à l'air barillet HP (t/h)	3,4
Consommation en vapeur de la nouvelle centrale (Turbine GTA) (t/h)	85,75
Pertes GTA (t/h)	3,79
Production de vapeur BP au bypass HP/BP (t/h)	18,23
Consommation eau désurchauffe bypass HP/BP (t/h)	4,18
Production de vapeur après désurchauffe (t/h)	22,40
Production de vapeur par soutirage (t/h)	71,95
Débit total vapeur BP (t/h)	94,36
Echappement du GTA par condensation (t/h)	10

Production électrique GTA (MW)	10,91
Débit Eau Injection (t/h)	4,40
Débit Vapeur finale BP (t/h)	98,76

Au vue de ce diagramme ci-dessous, on remarque que les pertes de la production de vapeur sont réparties entre la chaudière jusqu'à son entrée dans la turbine. Ainsi les principales sources de perte de chaleur sont le barillet HP avec la vanne de mise en l'air qui se retrouve à un taux de pertes de 4,42 % et le GTA avec un taux de pertes envoisnant 5,23 %. Cette perte du GTA est comptée entre l'admission et l'échappement de la vapeur aux niveaux des tuyaux qui perdent de la vapeur par des fuites au niveau des joints, par condensation et des purges... Il faut signaler que l'ouverture de la vanne de mise à l'air entraine aussi une chute énorme de la pression d'admission au niveau de la turbine. Cette mise à l'air de sécurité s'ouvre trop fréquemment ce qui ne devait pas être le cas lors d'un fonctionnement normal.



3.4. PROBLEMES OBSERVES ET SOLUTIONS TECHNIQUES ENVISAGES

Lorsque la demande en approvisionnement d'énergie (électricité et vapeur) est maîtrisée, il est possible d'ajouter une méthode de régulation et de stabilisation de la puissance délivrée au sein de l'entreprise. Cela exige que l'alimentation ne doit pas être perturbé par des arrêts ou des pannes de l'usine (arrêt moulins, arrêt GTA...) ce qui peut provoquer une chute brutale de la production d'énergie de 15 000 à 10 000 kW. Ce sont les conditions les plus sévères qui peuvent être rencontrées pour la régulation de l'offre et de la demande.

Donc la première solution pour optimiser la production énergétique sera de résoudre les pannes courantes de l'usine. Le taux de panne depuis le commencement de la campagne sucrière est égale environ à 8 %. Ces pannes sont en général dues à la mauvaise qualité de la bagasse à la sortie du moulin, ce qui occasionne une baisse énorme de la pression ou de la température et donc arrêt de la production énergétique pour protéger certains équipements comme c'est le cas de la turbine. Donc pour résoudre les pannes au niveau de la chaudière, faudra commencer tout au début de la chaîne d'approvisionnement.

Il est un fait bien connu que le pouvoir calorifique de la bagasse baisse avec l'augmentation de l'humidité de la bagasse. Plusieurs études ont montrées qu'une réduction de 1 % d'humidité dans la bagasse augmente son pouvoir calorifique de 196 kJ/kg (47 kcal/kg). Et une réduction de 1% de l'humidité dans la bagasse augmente de 0,5 % l'efficacité de la chaudière si on l'utilise comme combustible dans la chaudière (*Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) handbooks*). Donc l'humidité de la bagasse aura des répercussions directes sur l'exploitation de la chaudière, qui peut s'éteindre complètement après avoir reçu de la bagasse humide.

Les études menées par J. Sudhakar and P.Vijay ont montré que 90 % des pertes d'une chaudière à bagasse sont en général causés par la teneur en humidité du combustible. Par conséquent en réduisant la quantité d'eau dans la bagasse, on augmente le rendement de la chaudière.

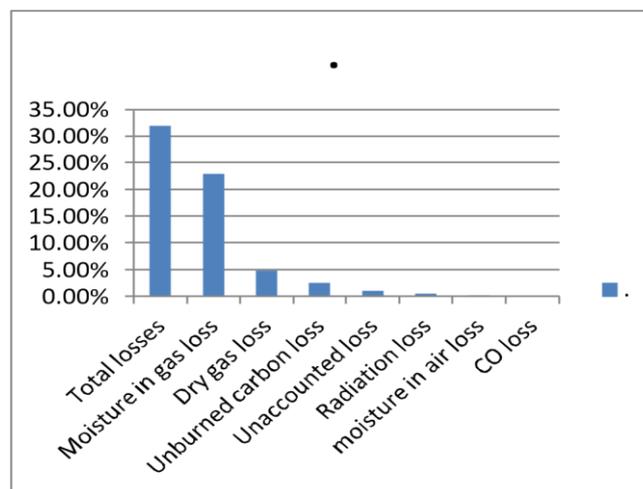


Figure 5: Classification des pertes d'une chaudière (J. Sudhakar and P.Vijay, 2013)

3.4.1. Qualité de la bagasse

Dans les sucreries, le service moulin occupe une place importante dans la chaîne de fabrication du sucre, d'obtention de la bagasse et de la mélasse. De son mode de fonctionnement de ses appareils (Moulins, Shredder, débit imbibition...) dépendent de l'amélioration de la combustion dans les chaudières et de la continuité de la production énergétique. Du côté de la production énergétique, l'appareil qui va nous intéresser le plus est le 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 et doit son existence et son utilité au fait que le tissu des membranes des cellules de la canne est très résistant.

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. Donc en facilitant le travail des moulins pour l'extraction du jus, il fournit à la chaudière une bonne qualité de bagasse en augmentant sa densité et en réduisant l'humidité.

L'état de la désintégration de la canne à sucre s'exprime par l'indice de préparation (IP) tel que calculé à partir de la détermination en laboratoire de la Pol. pouvant être obtenu par extraction à l'eau froide par rapport à la Pol. total obtenu par extraction à chaud ou par la désintégration complète de la canne dans le froid. Pour rappel le Pol. de la canne est la teneur apparente en saccharose de la canne.

$$I.P. = \frac{\text{Pol. obtenu par extraction à l'eau froide}}{\text{Pol. obtenu après la désintégration complète}} * 100$$

Les cannes sont réduites en fibres aux passages successifs dans le broyeur qui est composé d'un rotor portant des marteaux avec des extrémités à barres rectangulaires qui pivotent sur des disques ou plaques entre 1000 et 1200 tours par minute avec une espace ou «jeu» entre le chemin des marteaux rotatifs et le contre-bar de quelques millimètres. Ce qui nous permet d'avoir une bonne préparation de la bagasse en amont de la production.

Cependant il nous arrive que ces marteaux soit endommagés ou usés par des chocs. Ce qui a pour incident de réduire la qualité de la bagasse à sa sortie du moulin. C'est pourquoi pour une bonne optimisation et approvisionnement en bagasse, il nécessite de faire son entretien chaque semaine comme c'est le cas des Shredder Tongaat. Il dispose d'un broyeur à 8 rangées de marteaux et chaque semaine deux lignes sont inversées et deux autres lignes sont retirées pour ressoudage et remplacés par une ligne qui a été soudée (Hugot, 1986).

Mais il faut aussi noter que le diamètre de la canne à sucre qui peut varier de 1,5 à 6 cm (<http://www.maep.gov.mg/filtecanesucre.htm>) y joue un rôle hyper important, car le plus le diamètre est petit et plus il est difficile pour le Shredder d'avoir une bonne efficacité. Ceci peut être résolu en mélangeant les variétés de cannes pour faciliter le travail du Shredder et fournir de la bagasse avec une bonne granulométrie.

3.4.2. Séchage de la bagasse

Pendant la campagne les moulins dans le souci de récupérer le maximum de sucre augmente le taux d'imbibition. Ce qui a pour cause d'élever le taux d'humidité de la bagasse et de

diminuer le rendement de la chaudière, ajouté à cela le bourrage des alimentateurs et convoyeurs qui peut occasionner une rupture totale de la fourniture d'électricité par défaut d'alimentation de la chaudière.

C'est pour cela il nécessite de réfléchir à un procédé qui permettrait aux moulins de récupérer le maximum de sucre disponible de la bagasse sans pour autant pénaliser l'alimentation de la chaudière en combustible. Car le fait d'avoir un taux de sucre élevé dans la bagasse diminue le rendement de la chaudière. Le sucre a pour effet de se caraméliser sous l'action de la chaleur étant donné que ses forces intramoléculaires sont trop fortes pour être rompus par simple chauffage. Ainsi le mélange bagasse avec taux de sucre élevé peut être brûlé mais nécessite plus d'air que la bagasse possédant un taux faible en sucre. Ce qui entraîne des pertes d'énergie.

Ainsi dans l'industrie du sucre à part l'économiseur et le réchauffeur d'air, il y'a un troisième moyen d'améliorer la combustion dans le foyer, c'est de sécher la bagasse quittant les moulins avant de les envoyer vers la chaudière. Cette procédure qui est beaucoup moins utilisée à l'heure actuelle, mais à toutes les chances d'avoir un emploi de plus en plus à l'avenir, offre le grand avantage d'être la procédure qui permet aux fumées d'être portées à la température la plus basse et donnant ainsi à l'équipement une plus grande récupération de la chaleur des gaz de combustion.

La température du gaz sortant de la chaudière dépend de divers facteurs et notamment de l'humidité de la bagasse. Etant donné que plus la température des gaz à la sortie du réchauffeur d'air est basse et plus le rendement est meilleur, la teneur en humidité doit donc être prise en compte et prendre une importance majeure sur le process (Hugot, 1986).

Pour pousser d'avantage nos réflexions, on a essayé de calculer le Pouvoir Calorifique Supérieur en fonction de la teneur en humidité :

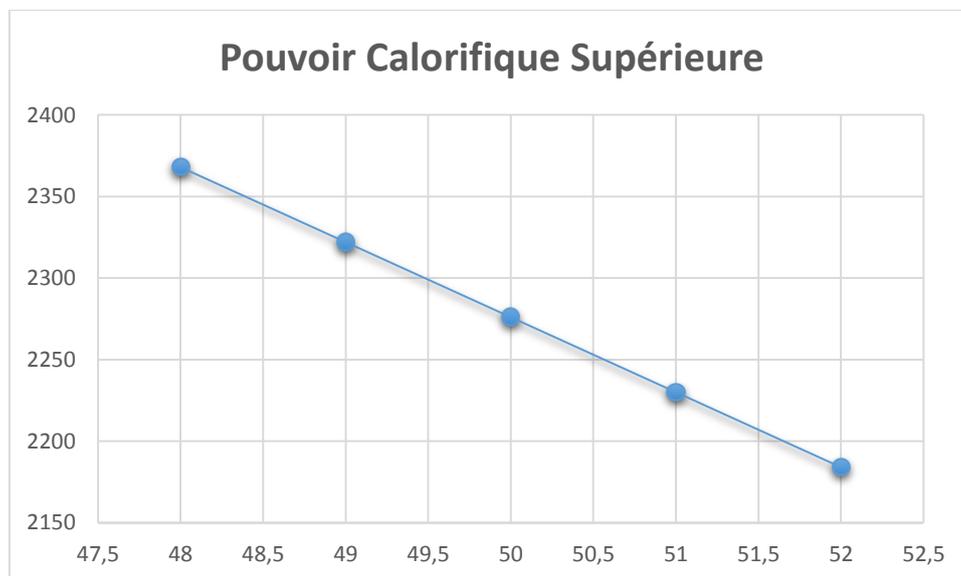


Figure 6: Le PCS en fonction de la teneur en humidité de la bagasse

On remarque que le PCS diminue fortement avec une augmentation de l'humidité de la bagasse. Ainsi pour augmenter l'efficacité de la chaudière à bagasse, il nécessite de diminuer la teneur en humidité. Dans le guide de la canne à sucre 3^{ème} édition E. Hugot parle de

diminuer la teneur jusqu'à 10 % car en dessous de cela la bagasse risque de capter l'humidité de l'air. En tenant en compte que nous avons une teneur en humidité de 30 % et une température d'extraction d'air de 134 °C, nous pouvons obtenir un rendement global de 68 % sur base PCS avec les caractéristiques suivantes :

Ratio de combustion	Consommation en bagasse (t)	Humidité (%)	PCS (kcal/kg)	Rendement (%)
3,15	824,81	30	3190	68,18

Pour une production de vapeur de 2600 t et un ratio de 3,15 ; on aura une consommation moyenne en bagasse de 824,81 t. Ainsi de suite il devient utile d'étudier quelles sont les possibilités qu'on a en notre possession pour diminuer la teneur en humidité.

Considérant que l'ensemble économiseurs et réchauffeurs d'air permet une réduction de la température des gaz d'échappement à 150-200 °C, la bagasse sèche permet une diminution de la température de rosée entre 60 et 70 °C. Or on sait que la présence de gouttelettes d'eau due à l'élévation de la température de rosée dans les produits de combustion est source surtout de corrosion par la formation dans certains cas, d'acide qui attaque les matériaux. Un autre avantage des sécheurs est que la bagasse introduite dans le foyer est chauffé ce qui facilite la combustion et l'allumage rapide de la chaudière.

Etude technico-économique

Dans la littérature et dans beaucoup de publications scientifiques, les chercheurs parlent de la possibilité d'utiliser les fumées de gaz pour sécher la bagasse et ainsi augmenter le pouvoir calorifique de la bagasse. Dans la sucrerie des cannes 3^{ème} édition, E. Hugot parle d'un sécheur à tambour rotatif ressemblant à la "Roto- Louvre" type de séchoir à sucre, muni d'ailettes qui se déplacent le long de la bagasse sur la longueur du cylindre tournant qui est capable de sécher la bagasse jusqu'à 20 %.

Bien que cela constitue une solution, la température des fumées de gaz d'IJT ne sera pas suffisante pour réduire l'humidité. Ce type de sécheur utilise la fumée des gaz sortant du réchauffeur d'air. Ainsi pour obtenir un taux d'humidité de 30-35%, il faudra entre 300-350 °C alors que la température des fumées après passage dans l'économiseur et le réchauffeur d'air dépasse rarement 150 °C. En outre, pour de la matière organique à 50%, la température qui peut être utilisée sera environ entre 500-550 °C.

L'installation d'un sécheur à bagasse prendra en compte l'alimentation en combustible pour la chaleur du sécheur mai aussi de l'ensemble accompagnant une telle installation. Pour le choix technique, on a opté pour le Turbo Dryer conçu par Maguin dans le but de combiner la meilleure récupération de chaleur à une destruction des composés organiques volatiles.

Cette conception est achevée par une réintégration de la vapeur évaporée pour récupérer 80 % de la chaleur latente entraînant un besoin net thermique minimum de 130 kcal/ kg d'eau évaporée.

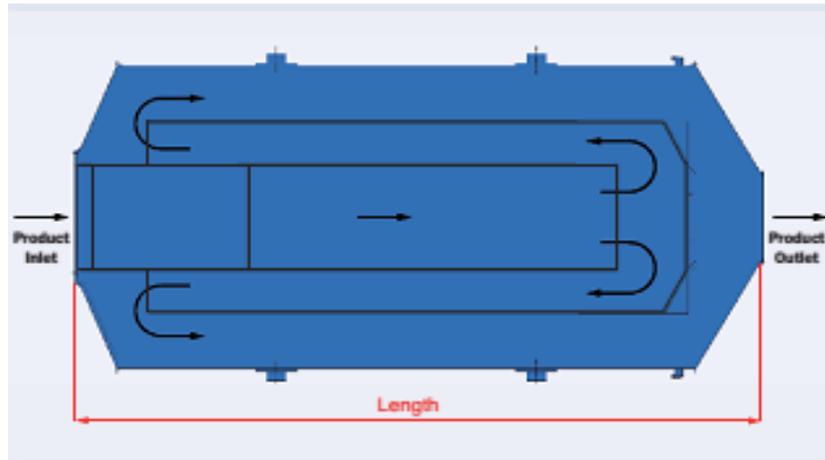


Figure 7 : Détails techniques du Turbo Dryer

Dans ce type de sécheur, les fumées de gaz sont en contact avec la matière de la biomasse à l'intérieur d'un tambour rotatif pour provoquer l'évaporation de l'humidité. Le principe de séchage est très simple ; des pales efficaces font tourner et mélangent en permanence un grand volume de biomasse. Cette idée combine le flux de grands volumes de produit assurant le bon transfert de chaleur et un mouvement constant du produit, ainsi permettant le séchage uniforme

Evaporation en t/h d'eau	Diamètre du tambour	Longueur du tambour
15-30	5,6 m	16 m

Pendant que la bagasse se déplace vers l'avant de la sécheuse, la bagasse est séché directement en contact avec l'air chaud circulant dans le cylindre et provoquant la séparation de l'eau de la matière pour le transformer en vapeur qui est récupéré. La bagasse sort du sécheur dans la qualité appropriée, avec une humidité résiduelle uniforme et une teneur en fines et en sable réduite.

Le Turbo Dryer permet de sécher différents produits qu'importent la taille, la granulométrie, et le taux d'humidité avec un produit final de meilleure qualité et homogène. Le séchage se produit dans une boucle fermée. L'alimentation en chaleur se fera par n'importe quel combustible (charbon, gaz naturel, fioul) avec une consommation équivalent à 8 kg de charbon pour une tonne de bagasse séché. Il peut permettre d'atteindre un rendement thermique de 80 % et éviter le bourrage des alimentateurs ou des convoyeurs à bagasse.

Tableau 7 : Tendances d'utilisation de la bagasse

	Humidité de la bagasse	Production moyenne en bagasse (t)	Consommation moyenne en bagasse (IJT) (t)	Consommation moyenne en bagasse (2 BR) (t)	Bagasse stockée à la fin de la campagne (t)
Situation Actuelle	50%	2507,26	1289,47	949,88	52 510,36
Installation d'un sécheur	30%	2507,26	824,81	607,59	203 252,49

En installant un sécheur à bagasse, on va quadrupler notre stockage à bagasse actuelle qui est de 52 510,36 tonnes pour atteindre 203 252,49 tonnes. Avec le stockage, on a que pour trois semaines de fonctionnement avec une production journalière électrique estimé à 11 MW soit 246,84 MWh/J. La bourse du carbone évalue la tonne de CO² à 13 € depuis 2013, ce qui nous permettra d'obtenir des crédits carbonés. Ainsi le sécheur fonctionnera au minimum 3 mois avec la même production énergétique.

Pour le calcul du Temps de Retour sur Investissement (TRI) on utilisera la formule :

$$TRI = \frac{\text{Coût d'investissement}}{\text{gain annuel brut}}$$

Avec couts d'investissement : le cout d'achat et d'installation des équipements

Et gain annuel brut : c'est la somme des gains prévisionnels réalisés grâce aux dépenses annuelles économisées sur le fuel et le gasoil, profits récupérés avec la vente d'électricité et la vente de crédits carbonés.

Les quantités annuelles économisées sont calculées sur la consommation en fioul des chaudières BR durant la campagne sucrière de Novembre 2013 à Mai 2014 et celles de la consommation en gasoil des groupes électrogènes (AKSA 1, AKSA 2, G2) pendant la campagne grâce aux relevés du « département Matériel » de la CSS, auquel on ajoute la réduction des consommations durant l'inter-campagne faites par nos propres estimations.

Le prix de la tonne de gasoil et de même celle du fuel ont été tirés du code d'investissements des marchés publics de l'APIX (Agence de Promotion des Investissements et Grands Travaux) publié en Novembre 2011 : prix de vente à la tonne du gasoil 670 089 F CFA/t et du fuel lourd 495 678 F CFA/t.

Le tableau suivant présente les résultats du Temps de Retour sur Investissement avec l'installation d'un sécheur à bagasse pour différents scénarios :

Tableau 8 : Temps de Retour sur Investissement avec l'installation d'un sécheur à bagasse

	Situation Actuelle	Installation d'un sécheur
Coûts d'investissement, d'exploitation (FCFA)		100 000 000
Consommation en fuel pendant la campagne (t)	730	0
Dépenses économisés sur le fuel (FCFA)		361 844 940
Consommation en gasoil pendant toute l'année (t)	2095	168
Dépenses économisés sur le gasoil (FCFA)		1 403 836 455
Temps de Retour sur Investissement TRI 1 (jour)		21
Surplus d'Énergie (GWh)	0	14
Gain financier lié au surplus énergie		675 000 000
Temps de Retour sur Investissement TRI 2 (jour)		15
Emissions en tonnes de carbones avec le fuel (tCO _{2e})	12 751	0
Emissions en tonnes de carbones avec le gasoil (tCO _{2e})	20 628	1 528
Gain financier lié aux crédits carbones	0	271 607 523
Temps de Retour sur Investissement TRI 3 (jour)		14

Dans le premier scénario, le temps de retour sur investissement est évalué à 21 jours dans le cas de la substitution du fuel et du gasoil. Ce qui permettra d'éviter les dépenses liés à l'alimentation des groupes électrogènes en gasoil pendant l'inter-campagne pour les besoins industrielles, d'irrigations.

Le deuxième scénario prévoit la vente du surplus de production d'électricité grâce au stockage de bagasse assurant 3 mois de production en inter-campagne. En considérant qu'on puisse vendre **150 MWh/j** à 50 F CFA/KWh à la **SENELEC**, le gain financier mensuel est calculé à 225 000 000 FCFA, soit **675 000 000 FCFA** pour un TRI de 15 jours.

Pour le troisième scénario, avec l'ajout de la vente de crédits carbones à raison de 13 € la tonne, FCFA, on se retrouve avec un TRI de 14 jours. soit un gain financier de 271 607 523

3.4.3. Ajustage des Paramètres des Régulateurs PID et Reconfiguration des Boucles de Contrôle de l'alimentation en bagasse et du niveau du ballon supérieur

Un coup d'œil sur les documentations du constructeur et sur l'analyse fonctionnelle de la partie automatisme de la chaudière, nous a fait savoir que les boucles de régulation de l'alimentation en bagasse et du niveau du ballon supérieur sont incomplètes et reste à refaire.

Ce qui a été confirmé par un expert de Thermal Energy Services South Africa qui était venu dans la semaine du 19 au 24 Mai 2014 pour effectuer une expertise de la chaudière. Ainsi la chaudière qui était conçu pour fonctionner de manière automatique et faciliter la tâche des opérateurs se retrouve à fonctionner de manière manuelle pour ainsi éviter :

- L'arrêt du GTA donc de toute la production sucrière
- La baisse ou la montée en flèche de la pression du barillet HP avec toutes les conséquences que ça peut amener (pertes de vapeur au niveau de l'évent de mise en

l'air et au niveau de l'évent de démarrage pour réchauffer la ligne d'admission vapeur en cas d'arrêt du GTA...)

Ainsi ces défauts de fonctionnement entraînent en eux-mêmes beaucoup de perte de vapeur mais aussi une fatigue du personnel chargé de veiller sans cesse à la production irrégulière d'énergie avec l'arrêt et le redémarrage des moulins. Ainsi cette partie du travail d'optimisation permettra d'alléger le travail des opérateurs au niveau de la salle de commande.

Ajustage des paramètres des régulateurs PID

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir. Ainsi il regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une grandeur physique à régler, égale à une valeur désirée appelée consigne. Il agit de 3 manières :

- Action Proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain G
- Action Intégrale : l'erreur est intégrée et divisée par un gain Ti
- Action Dérivée : l'erreur est dérivée et multipliée par un gain Td

Le problème majeur qu'on rencontre avec les régulateurs PID est qu'avec l'expérience acquise au fil des ans, les valeurs choisies pour les paramètres P.I.D. ne sont pas toujours satisfaisantes, ni adaptées au processus à régler (*Ajustage des paramètres d'un régulateur PID Prof. F. Mudry, 2002*). Ce qui est le cas de la chaudière IJT. Le principal défaut qu'on a rencontré au niveau de l'alimentation est la vitesse de la réaction lorsqu'une consigne est donnée.

Les régulateurs du KT150 ont été réglés par l'approche successive. Ce réglage consiste à modifier les actions du régulateur et à observer les effets sur la mesure enregistrée, jusqu'à obtenir la réponse optimale. On règle l'action proportionnelle, puis l'action dérivée et l'intégrale. Le procédé est d'abord conduit en manuel pour stabiliser la mesure au point de consigne. De petites variations sur la vanne permettent d'observer les réactions naturelles du procédé, afin de dégrossir les actions à mettre sur le régulateur au début de chaque réglage.

Les critères de performance retenus pour la régulation sont une réponse bien amortie (dépassement de 10 à 15 %) avec une rapidité maximum (temps d'établissement minimal) (www.technologuepro.com/Régulation.../Boucles-de-Regulation.pdf). Il faudra rétablir tous les paramètres pendant l'inter campagne et essayer d'avoir le temps de réponse minimum pour chaque nouvelle boucle de régulation après avoir été reconfiguré

Boucle de régulation de l'air primaire

Un regard sur les autres programmations des chaudières IJT et sur les documents constructeurs, nous a permis de voir une boucle de régulation avec la pression qui gère l'alimentation en bagasse de la chaudière et le débit d'air primaire en fonction du débit de vapeur générée et du taux d'oxygène. Cette présence du taux d'oxygène dans la boucle de régulation d'une chaudière à bagasse s'explique par la non-uniformité de la bagasse (humidité, Pol. bagasse...). C'est donc bien cette pression qui représente la meilleure grandeur à régler pour la régulation de la boucle de l'air primaire comme le montre la figure suivante :

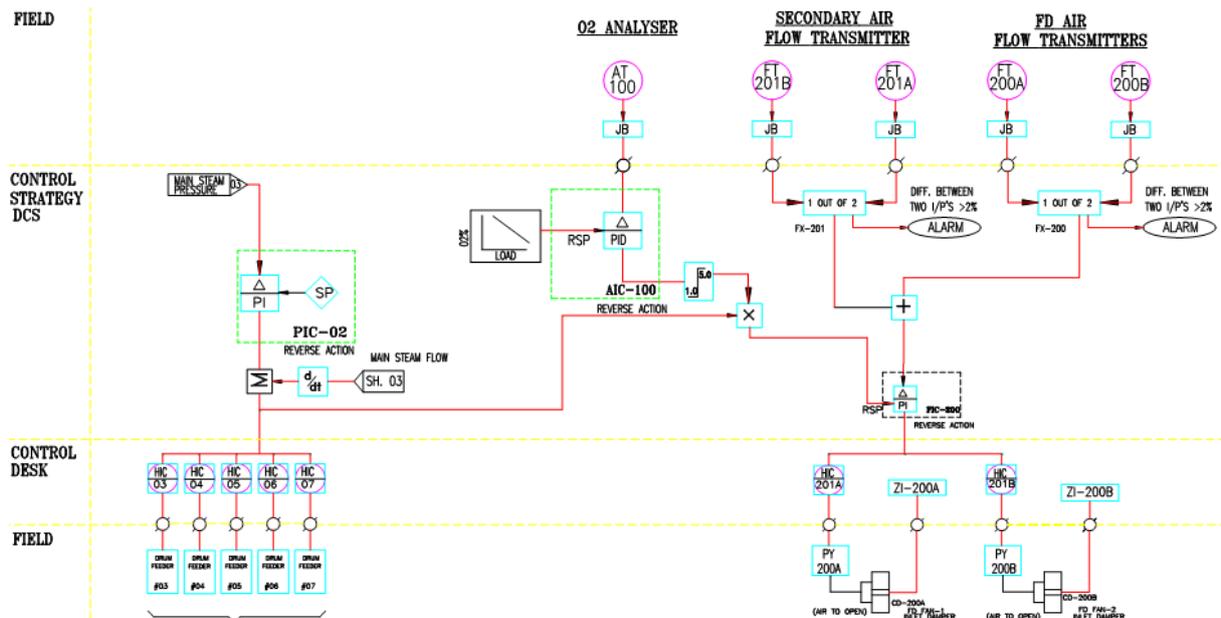


Figure 9 : Boucle de régulation d'origine d'Alimentation

La mesure qui est ici la pression sera comparée en permanence à la consigne C donnée par le concepteur et si un écart x se produit entre ces deux informations ($x=M-C$), le régulateur modifie son signal de sortie (S) vers l'organe de réglage afin d'obtenir $M=C$. Notre organe de réglage qu'est la pression va se baser sur le régulateur du débit d'air et du taux d'oxygène et avec comme grandeur perturbatrice le débit de production de vapeur. Les coefficients Gr (Proportionnel), Ti (Intégral) et Td (Dérivée) pondèrent l'interaction des 3 fonctions sur la sortie du régulateur. Ainsi Les 5 circuits alimentation bagasses pourront être démarrés.

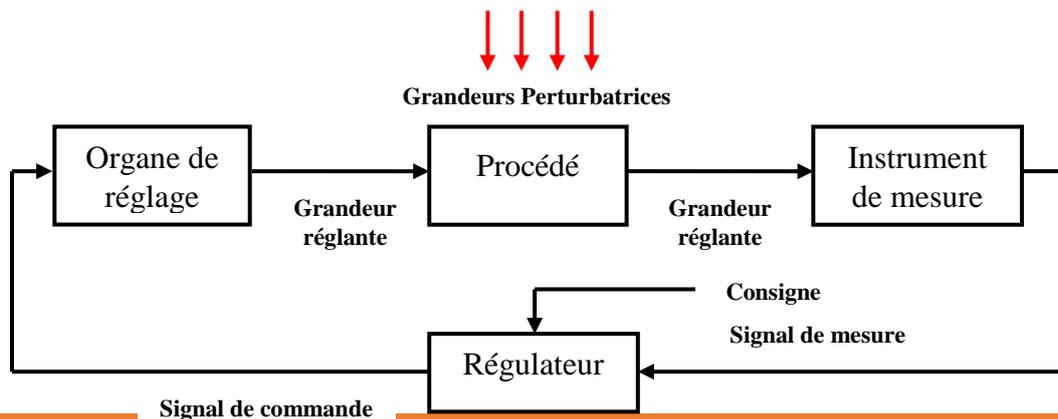


Figure 10 : Vue générale d'une Boucle de régulation "Boucle fermée"

La même chose a été remarquée avec la boucle de régulation du ballon supérieur où des valeurs ont été inversées et d'autres mal calculées.

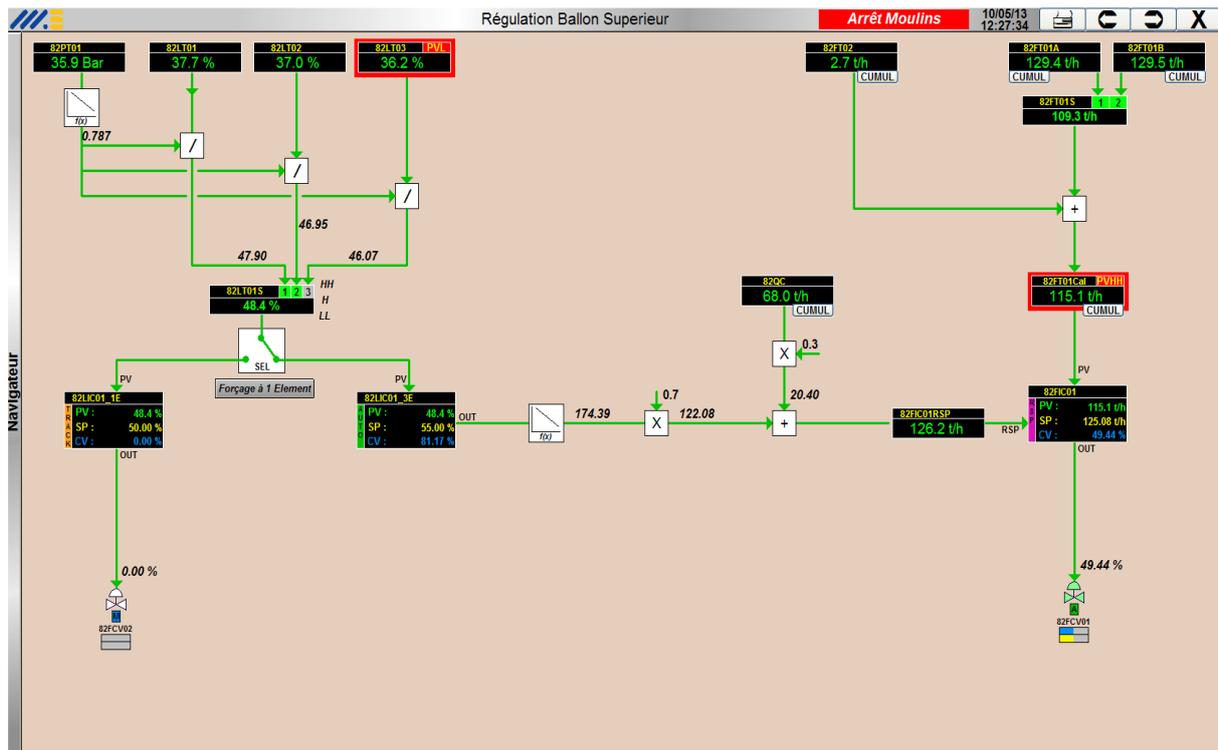


Figure 11: Boucle de régulation du niveau du ballon supérieur

A notre niveau, nous recommandons de faire venir un expert en automatisme qui a déjà eu à réguler des chaudières IJT similaires. Avec l'aide des documents constructeurs identifiés, il pourra faire une automatisation parfaite de la chaudière et ainsi diminuer les différentes pertes relatives à son exploitation.

3.4.4. Modification du circuit d'alimentation de l'air secondaire

Tout au long du stage, nous avons remarqué un dysfonctionnement de l'air secondaire qui nécessite des modifications pour avoir une bonne distribution de cet air. La pression de l'air secondaire en l'entrée des ventilateurs est à 60 mbar. Arrivée au niveau du conduit d'alimentation d'air secondaire, Il subit une petite perte de pression d'environ 1 mbar. Cette pression de l'air secondaire diminue de 20 mbar pour se retrouver avec une pression de 33 mbar moyenne au niveau de la goulotte d'alimentation des «spreader» où éjecteur d'air qui est

chargé d'éjecter la bagasse à l'intérieur de la chaudière. Ce qui diminue les performances de la chaudière.

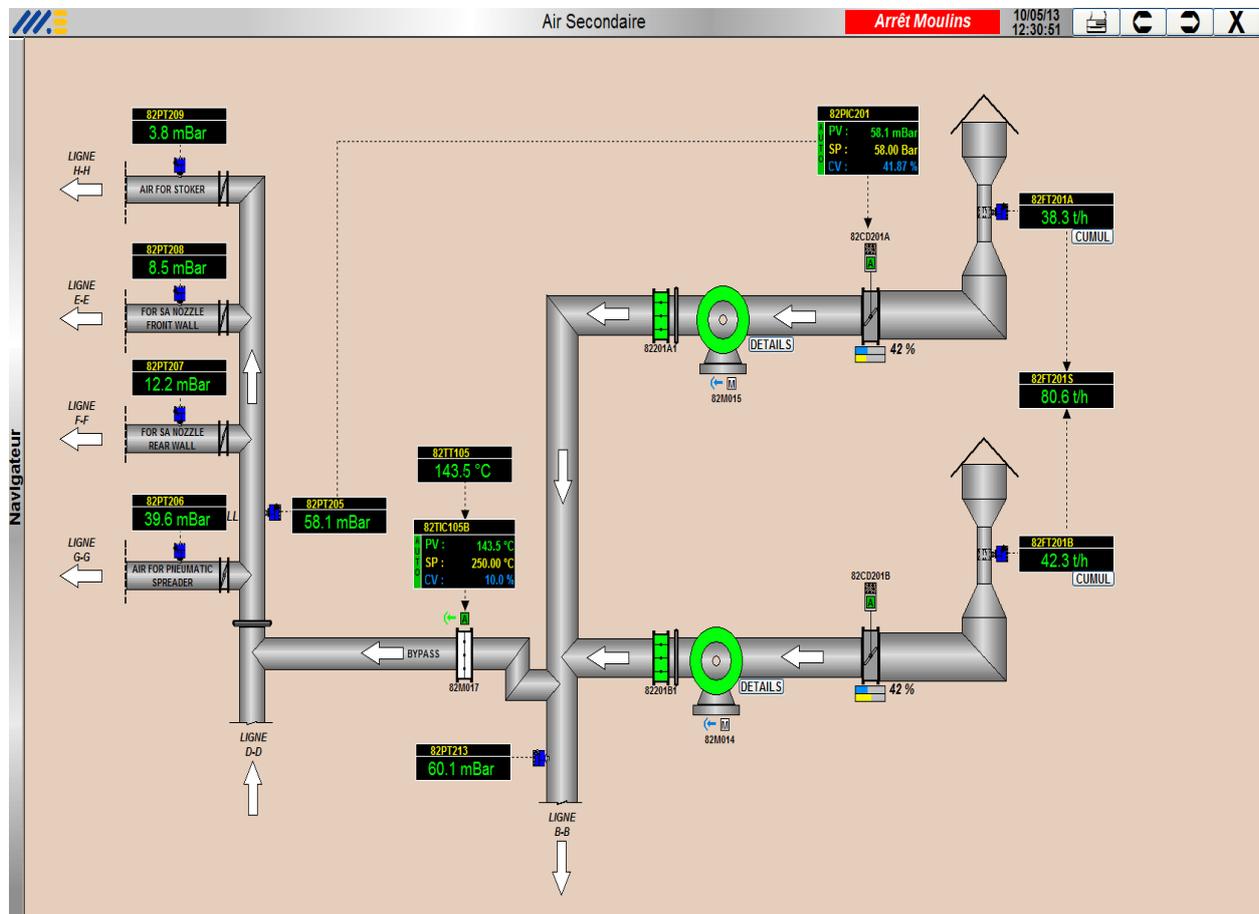


Figure 12 : Circuit d'alimentation de l'air secondaire

Ainsi on a fait des réglages mécaniques au niveau du circuit de distribution d'air et on a pu gagner en pression 10 mbar. Le réglage mécanique a consisté à une diminution de la pression d'arrivée de la paroi avant de la buse et de la paroi arrière en jouant sur les volets d'arrivée de l'air secondaire à l'aide de vanne manuelle et une augmentation de la pression des spreaders et des stokers situés au niveau de la grille qui ont pour rôle de repousser la bagasse à l'intérieur du foyer pour éviter les imbrulés.

Ces modifications ont eu pour effet une diminution de la température d'extraction qui est passé de 135 °C de moyenne à 125 °C mai aussi une **diminution du taux d'oxygène** dans les fumées qui est passé **de 7 % à 4 % soit un excès d'air moyen de 23,53 %** proche de celui voulu par le constructeur situé entre 20 et 25 %. Pour couronner le tout, cet effet a augmenté le **rendement de la chaudière** de 2 % qui est passé de 60 % à **62 %** et on a une plus grande facilité de montée de la température de la vapeur sortie chaudière; fait remarqué par la majorité des opérateurs de chaudière. Ceci peut s'expliquer par le fait la température de l'air secondaire est plus élevée que la température de l'air primaire et en augmentant la pression des spreaders, on diminue l'apport d'air frais dans la chaudière. En plus de cela, on projette

mieux la bagasse à l'intérieur du foyer qui brûle mieux. Donc nécessairement une diminution du taux d'air, une diminution du taux d'oxygène.

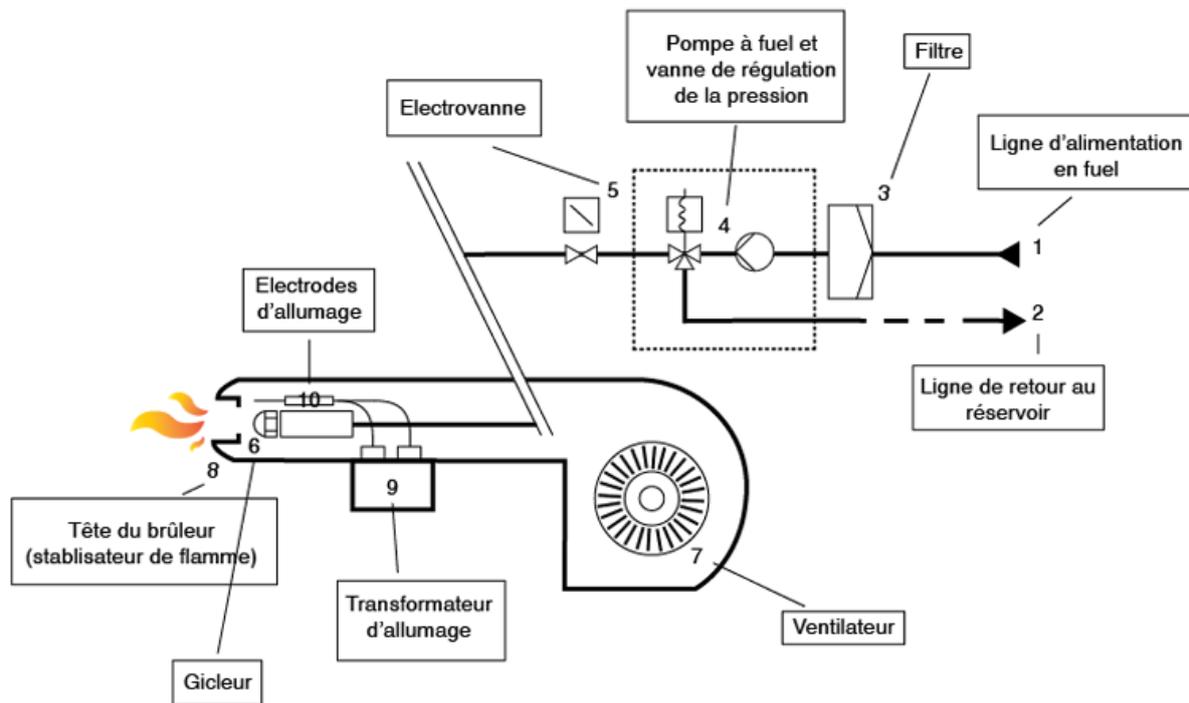
Bien que cela constitue un début encourageant, il nécessite de faire des modifications au niveau de la goulotte d'alimentation des spreaders pour combler le manque à gagner de 10 mbar. Ainsi on pourrait augmenter le nombre d'arrivée d'air au niveau de la goulotte. Au lieu d'une seule arrivée d'air secondaire, on pourrait en avoir 3 ; avec une arrivée à chaque extrémité de la goulotte et une autre au milieu pour permettre une meilleure distribution de l'air secondaire. La même remarque a été faite sur l'ensemble des circuits d'air (air primaire, extracteurs d'air...) qui sont en dessous de leur condition de fonctionnement optimum. Il faudra pendant l'inter campagne faire une très bonne maintenance de ces circuits pour retrouver leurs valeurs de pression optimum.

3.5. REMPLACEMENT DES BRULEURS A FUEL DES CHAUDIERES BR PAR DES BRULEURS POUR LIQUIDE A FAIBLE POUVOIR CALORIFIQUE

La Compagnie Sucrière Sénégalaise possède 4 chaudières mixtes (BR1, BR2, BR3 et BR4) d'une capacité totale de 200 t/h qui alimente l'ancienne centrale en vapeur HP possédant 4 turbo-alternateurs (TD1, S1, S2 et A2) d'un potentiel de production d'électricité équivalent à 23,3 MW. Pendant la campagne, l'une ou deux de ces BR est en fonctionnement pour permettre la relève au cas où il y'aurait une panne avec la chaudière IJT. Selon les besoins en électricité de l'usine et des caractéristiques de la bagasse ; les chaudières BR sont démarrées avec du fuel pour pouvoir maintenir la production électrique, le reste étant compensé par des groupes électrogènes (AKSA 1, AKSA 2, G2) d'une capacité de 5,6 MW pour éviter une coupure générale.

Ces chaudières BR sont équipées de brûleurs de fuel. Un brûleur est un élément mécanique qui assure la production de chaleur en assurant un mélange entre le fioul, avec de l'air comburant chargé d'oxygène. L'alimentation en air est assurée par un ventilateur qui puise l'air ambiant de la chaufferie et celle du fuel par une pompe qui puise dans le réservoir. La pompe a également pour mission de maintenir, via un régulateur, une pression suffisante au fuel pour permettre sa pulvérisation. L'électrovanne libère le combustible au moment déterminé par la programmation et le gicleur assure la pulvérisation du fuel en des milliards de gouttelettes et le réglage du débit nominal de fuel.

Fonctionnement et anatomie d'un brûleur de chaudière à fuel



© FioulReduc

Figure 13 : Fonctionnement et anatomie d'un brûleur de chaudière à fuel

Ainsi au cours de la Campagne 2013-2014 la consommation en fioul était d'environ 730 T, soit 361 000 000 FCFA. Ce qui constitue des impacts sur l'environnement énorme en termes de gaz à effet de serre et de rejets dans l'atmosphère 12 751 tCO₂e. Il nous est venu l'idée de remplacer les brûleurs à fuel par des brûleurs Saacke SSB-LCG/LCL (SAACKE Swirl Burner for Low Calorific Gas/Low Calorific Liquids) au niveau des anciennes chaudières BR.

La Compagnie Sénégalaise possède sa propre distillerie et produit un éthanol de qualité qui est exporté partout dans la sous-région, mais aussi des résidus issu de la distillation alcoolique tel que l'huile de fusel qui contient invariablement de l'éthanol. Cette huile de fusel ou vinasse est parfois mélangée à la bagasse pour permettre une meilleure combustion de la bagasse au niveau de l'IJT. A l'aide des brûleurs SSB-LCG/LCL, cette vinasse peut être brûlée pour produire de l'électricité, de même que la mélasse issue de la canne à sucre. E. Hugot parle de la possibilité d'utiliser la mélasse qui chauffée et diluée peut être utilisée dans les mêmes brûleurs à fuel (E. Hugot, 1986), ainsi nous avons 1 tonne de mélasses correspond exactement à 150 kg de fuel, 260 kg de charbon et à 6,35 m³ de gaz naturel.

La technologie a été déjà installée en Tanzanie sur des chaudières Babcock BR, mais aussi au Brésil où 4 chaudières de 40-70 t/h de vapeur chacune fonctionnent actuellement avec de la mélasse (N. Schopf, 2010). Le principal développeur de cette technologie est le Groupe SAACKE et est le fruit de nombreuses années de technologie éprouvée dans le domaine de l'industrie et des centrales. Cette série de brûleurs à flamme tourbillonnaire SSB-LCG a été conçu pour brûler les combustibles pauvres à pouvoir calorifique extrêmement faible en source d'énergie précieuse.

3.5.1. Sur le plan technique

Le principe du SSB-LCG/LCL est simple : en aval du brûleur (SSB) est placé un moufle spécial dans lequel la flamme tourbillonnaire supercritique au combustible pauvre brûle de manière stable. Ce moufle stabilise la flamme avant qu'elle ne passe dans la chaudière. Outre le combustible principal qui est la mélasse, le SSB modifié sur demande peut être équipé pour fonctionner avec un combustible supplémentaire (gaz naturel, fuel...). Pour ce faire, ces combustibles seront préparés comme un combustible standard et injectés dans le foyer via une lance d'injection. L'intérêt étant que les deux combustibles supplémentaires augmentent l'autonomie de l'installation et assurent des avantages en termes de coûts. Le combustible ne nécessite aucune préparation seulement si le taux de sucre est trop élevé pour éviter les effets corrosifs et la cristallisation à haute température.

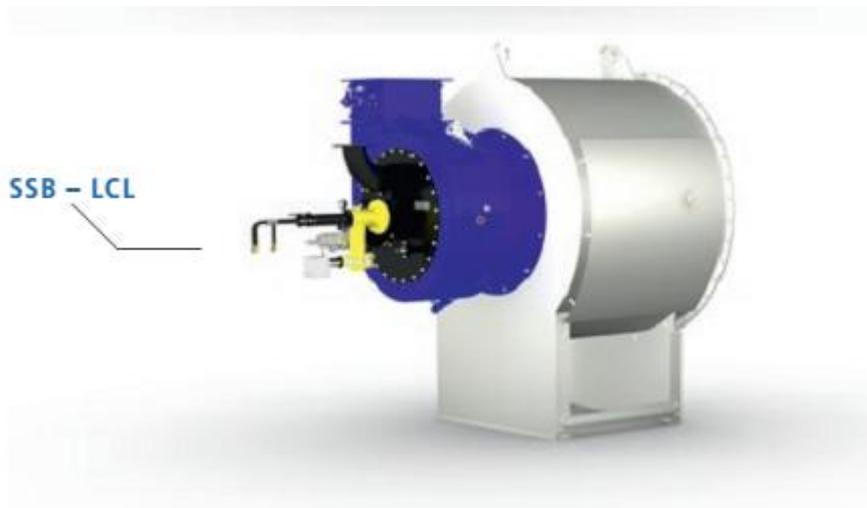


Figure 14 : Aperçu d'un brûleur Saacke SSB-LCL

Il est composé principalement des éléments structurels suivants :

- Boîte à vent tangentiel
- Lance d'injection du combustible principal
- Lance d'injection secondaire du combustible supplémentaire (Liquide, gaz)
- Amortisseur de contrôle de l'air de combustion
- Volet d'air avec lecteur de contrôle
- Système de surveillance de l'air de combustion composé d'un contrôleur de pression avec soupape d'essai et d'un manomètre avec vanne d'isolement
- Scanner à flamme et d'un allumeur électrique

La chaudière est mise en marche avec un combustible à haut pouvoir calorifique à l'aide du brûleur SSB et chauffée jusqu'à atteindre une température dans la gorge nécessaire à la combustion complète des gaz. La température typique qui est d'environ 650 °C est atteinte en 30 minutes environ (*N. Schopf, 2010*).

Le combustible à faible pouvoir calorifique est ensuite fourni au brûleur par l'intermédiaire d'un système d'atomisation dédié. La quantité de carburant nécessaire pour le démarrage de la chambre de combustion est réduite à la suite d'une combustion à faible pouvoir calorifique de

telle sorte que la flamme pilote est continuellement maintenu en assurant une combustion efficace du combustible à faible pouvoir calorifique.

Tableau 9 : Détails techniques du brûleur Saacke pour Liquide à faible pouvoir calorifique

SSB-LCL	DETAILS TECHNIQUES		
	Applications	Capacité Brûleur	Combustible
	Convient à tous les Générateurs de chaleurs (Chaudière à tube d'eau, à tube de fumée...)	2-50 MW	Combustible liquide à pouvoir calorifique extrêmement faible (mélasse, vinasse,...)

3.5.2. Sur le plan économique

Pour une production de 40 000 tonnes de cannes traités, on aura 1000 tonnes de mélasse (*W. H. German, Description of a molasses burning furnace*) et si 150 kg de fuel correspond à une tonne de mélasse, 4650 tonnes de mélasse sera suffisante pour produire de la vapeur pendant la campagne sucrière ajouté à la production d'huile de fusel. Et si on prend la **production totale de mélasse de la CSS** lors de la campagne sucrière qui est de **44 378 tonnes** ajouté à la production d'huile de fusel, on a suffisamment de combustible pour produire de l'électricité pendant la campagne et la saison hors-campagne.

Comme celle calculé précédemment, le Temps de Retour sur Investissement (TRI) pour le remplacement des quatre brûleurs des chaudières par rapport à la consommation en fioul de ces chaudières BR durant la campagne sucrière de Novembre 2013 à Mai 2014 et la consommation en gasoil des groupes électrogènes (AKSA 1, AKSA 2, G2) pendant la campagne grâce aux relevés du département Matériel de la CSS et celles de l'inter-campagne faites avec nos propres estimations. Ainsi nous avons :

Tableau 10: Etude économique de l'installation de 4 nouveaux brûleurs pour Liquide à faible pouvoir calorifique

	Consommation en fuel et Gasoil (Chaudière et Groupe Electrogène)		Consommation en mélasse		Coûts		
	Pendant la campagne (Source)	Pendant l'inter-campagne	Pendant la campagne	Pendant l'inter-campagne	Dépenses économisées (FCFA)	Coûts d'investissement, d'exploitations (FCFA)	T.R.I. (jour)
Situation Actuelle	730 tonnes de fuel 585 tonnes de gasoil	0 1680 tonnes de gasoil	0	0	0	0	37,19
Avec les 4 nouveaux brûleurs	84 tonnes de gasoil	84 tonnes de gasoil	4650 tonnes	4000 tonnes	1 766 599 095	180 000 000	

Le remplacement de ces anciens brûleurs au niveau des anciennes chaudières sera hyper rentable car le Temps de Retour sur Investissement (T.R.I.) est égale à 1 mois. En plus les résidus pourront être utilisés comme engrais dans les plantations de canne à sucre. C'est techniquement faisable parce que les BR subissent des opérations de maintenance qui ont eu lieu à chaque hors-campagne depuis leur date d'installation entre 1972 et 1981. Et le personnel de la chaufferie est très qualifié pour cela.

3.5.3. Sur le plan environnemental

La mélasse constitue un double problème environnemental par le fait qu'il pollue l'environnement comme composant organique fertilisant et l'azote qu'il contient contamine les sources d'eau et nappe d'eau phréatique. Ce procédé développé par SAACKE atteint des valeurs d'oxyde d'azote (NOx) inférieures à 20 mg/m³.

Par exemple, avec une longueur de flamme de seulement 3 mètres pour une puissance de 30 MW, la distribution d'air offre d'excellents résultats par le mélange du combustible qui permet, en outre, de prévenir efficacement les pointes de température et les rejets d'oxyde d'azote et de gaz carbonique. Malgré sa résistance, il ne laisse toutefois pas un gramme de combustible inutilisé et se distingue par ses faibles valeurs d'émissions et sa flamme d'une stabilité extraordinaire.

Les caractéristiques de la combustion sont présentes dans le tableau suivant avec aucun dépôt d'encrassement dans la gorge du brûleur ou de la chaudière, ce qui est réalisé par le système de gestion de brûleur (BMS) fourni par SAACKE, en contrôlant la température de la flamme dans une petite plage comprise entre 850-950 °C à l'aide d'une ou l'autre ration d'air en excès ou le pourcentage de combustible d'appoint (*N. Schopf, 2010*).

Tableau 11: Valeurs des émissions du brûleur SSB-LCG (Etude de cas d'une chaudière à Araucaria au Brésil)

Caractéristiques	Unité	Valeur
Production Vapeur	t/h	70
Pression Vapeur	bar	11,6
Débit de Gaz Naturel	Nm3/h	550
Débit de mélasse	t/h	15
Pression d'entrée du brûleur à mélasse	bar	16
Concentration mélasse	brix	75
Viscosité avant brûleur	cSt	54
Température de la molasse	°C	92
Dépression du foyer	mmWC	-4
Température de l'air comburant	°C	180
Emission en CO	ppm	30
Emission en Nox	ppm	280
Taux de CO ₂	%	8,5
Taux d'O ₂	%	5

L'estimation des **réductions d'émissions en tonne équivalent de CO₂** en cas de remplacement des brûleurs à fuels par des brûleurs à faible pouvoir calorifique est de **12 751 tCO₂e** pour le fuel lourd et **20 628 tCO₂e** pour le gasoil rajouté au 25 207 tCO₂e annuel de réduction des émissions d'IJT (*CDM-PDD CSS, 2006*). Ce qui nous rapporte un gain financier de **284 636 742 FCFA** en vendant nos droits d'émission.

3.5.4. Eligibilité du projet au programme MDP (Mécanisme de Développement Propre)

En se basant sur le fait de remplacer les brûleurs des quatre chaudières actuelles par des nouveaux brûleurs Saacke ne sera pas très avantageux et son éligibilité au programme MDP risque d'être très difficile. Car le rendement de ces chaudières (ratio de combustion égale à 1) laisse à désirer et leur conception date des années 70.

Il serait plus adéquat de le mettre dans le cas d'une nouvelle chaudière de 80 t/h adapté au nouveau contexte de développement durable avec d'émissions dans l'environnement négligeable pour pouvoir suppléer IJT et permettre au GTA d'atteindre sa capacité maximale qui est de 25 MW.

Cette méthode sera applicable dans le cadre des activités de projet de production d'électricité à base de biomasse ACM0006 "Consolidated methodology for electricity generation from biomass residues" approuvé par la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et pourra bénéficier ainsi des crédits carbone mais aussi des fonds d'investissements tel que celui du Fonds Africain des Biocarburants et des Energies Renouvelables (FABER). Ainsi on aura :

Conditions ACM0006	Faisabilité du Projet
Utilisation du résidu de la biomasse comme combustible principal (certains combustibles fossiles peuvent être utilisés comme suppléant)	Le combustible principal sera la mélasse obtenu après raffinage du sucre. Et le suppléant combustible sera un liquide où gaz à fort apport calorifique juste pour le démarrage

<p>La mise en œuvre du projet ne doit pas entraîner une augmentation de la capacité de traitement d'entrée brute (par exemple le sucre) ou dans d'autres changements importants (par exemple changement de produit)</p>	<p>L'augmentation de la production de mélasse est due à l'expansion de la CSS avec le projet KT150 et ne sera pas attribué à la mise en œuvre du projet.</p>
<p>Les résidus de la biomasse utilisés par l'établissement du projet ne devraient pas être conservés plus d'un an</p>	<p>La CSS possède sa propre distillerie qui utilise la mélasse pour produire de l'éthanol. Ainsi toute la mélasse produite est consommée en permanence, ne restant qu'une quantité qui est utilisé à d'autres fins. Ce qui permettra de vider le réservoir à mélasse et préparer la prochaine campagne</p>
<p>Il y'aura pas d'apport d'énergie excédentaires à l'exception du transport ou le traitement mécanique des résidus de biomasse, qui sera nécessaire pour préparer les résidus de la biomasse pour la combustion, à savoir les projets qui traitent les résidus de la biomasse avant la combustion</p>	<p>La mélasse utilisée dans ce projet ne se transforme pas en aucune façon avant d'être utilisé comme combustible. Et la seule préparation sera de réduire le taux de sucre si le brix dépasse un certain seuil</p>
<p>Le projet est applicable si seulement il combine la situation de référence et le projet en cours.</p>	<p>Ce projet aura pour objectif de trouver une solution à la production grandissante de mélasse et de développement de nouvelles méthodes pour l'utilisation des résidus de l'industrie sucrière tel que la bagasse.</p>

La technologie choisie pour l'activité du projet sera parmi les projets de transformation de la biomasse en énergie les plus avancées et innovantes mis en œuvre en Afrique de l'Ouest. L'innovation de ce projet est aussi dans la nature de la biomasse utilisée comme combustible. En fait tout en brûlant la bagasse dans les chaudières est une pratique courante, mais la valorisation énergétique de la mélasse en tant que combustible principal sera une première en Afrique francophone et la deuxième dans toute l'Afrique après la Tanzanie.

En raison des grands investissements nécessaires, les revenus liés à la vente de crédits de carbone et aux dépenses économisés avec l'achat de fioul lourd et de gasoil seront nécessaires pour mettre en œuvre l'activité du projet proposé.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude qui a pour sujet **Analyse et Optimisation de la production énergie renouvelable d'origine biomasse** nous a permis de comprendre les enjeux énergétiques en milieu professionnel, mais aussi le système de fonctionnement d'une chaudière à cogénération et d'une turbine. Le bilan énergétique que nous avons réalisé a montré une efficacité du procédé de production d'énergie qui est de 60 % à base PCS et qui devrait être normalement 70 % sur les références du document constructeur. La principale cause de cette baisse de rendement est le défaut de régulation de la chaudière. Cette régulation a été faite sans concertation des parties prenantes (IJT, MANGIN-EGLY, GE), ce qui s'en suit une énorme perte de la production de vapeur. Ainsi nous avons proposés qu'il faille qu'on refasse l'ensemble des boucles de régulation de la chaudière en consultant les documents constructeurs IJT.

Ce projet nous a permis de nous rendre compte de l'énorme potentiel d'économies d'énergies et des possibilités de ressources énergétiques valorisables que possèdent la Compagnie Sucrière Sénégalaise. C'est dans cette optique que nous avons proposé la solution de la mise en place d'un nouveau projet MDP pour l'installation d'une chaudière de 80 t/h dont le principal combustible principal sera la mélasse, pour trouver un alternative à la production grandissante de mélasse de la CSS et augmenter notre capacité de production énergétique pour vendre le surplus à la SENELEC. Par ailleurs, il serait bénéfique, dans la mesure où ce projet permettra d'éviter l'émission d'une importante quantité de CO₂, environ 33 340 tCO₂ annuellement.

A cela s'ajoute l'installation d'un sécheur à bagasse qui va quadrupler notre stockage actuelle. Ainsi on pourra fonctionner 12 mois sur 12 avec la bagasse comme c'est le cas en Thaïlande et au Brésil qui fonctionnent toute l'année avec la bagasse et où les seules technologies de sécheur ont été installées pour l'instant. Ce sécheur optimisera la production énergétique, et augmentera la durée de notre vie de notre chaudière. Le Temps de retour sur investissement est de quelques jours avec des gains financiers de 750 000 000 FCFA résultant de l'augmentation de notre stockage. . Le taux de panne sera diminué car la bonne granulométrie à la sortie du sécheur évitera les arrêts fréquents liés aux bourrages des alimentateurs à bagasse.

Comme perspective nous recommandons le nouveau paramétrage du système d'exploitation de la centrale KT 150 avec un approfondissement études techniques et MDP tel que :

- Mise en place bruleurs à mélasses sur chaudières BR et production d'électricité sur turbogénérateurs existants.
- Installation d'un séchoir à bagasse pour la centrale KT 150.
- L'installation d'une chaudière à mélasse de 80 t/h dans le cadre d'un projet MDP permettant une production de 8 MWe à vendre à la SENELEC

Bibliographie

- OUEDRAOGO Abdoulaye (2012). "Combustion et Chaudières." 116p. Cours Master II
- AFRICAN DEVELOPMENT BANK. (2005). "Développement des Capacités et Potentiel d'investissement dans le domaine des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Afrique de l'Ouest". Téléchargeable <http://energie.enda.sn/Documentations/FINESSEfinal.pdf>
- ANJUM Munir and Al. (2004). "Efficiency Calculations of Bagasse Fired Boiler on the Basis of Flue Gases Temperature and Total Heat Values of Steam." Pakistan Journal of Life and Social Science, 2(1): 36-39
- APIX (2011). "Cout des facteurs de production au Sénégal" téléchargeable sur investinsenegal.com/IMG/pdf/couts_des_facteurs_de_production.pdf
- ASSEFA Alena, OMPRAKASH Sahu (2013). "Cogenerations of energy from sugar factory bagasse." American Journal of Energy Engineering; 1(2): 22-29p.
- BANQUE AFRICAINE DE DEVELOPPEMENT (Août 2009). "Etude d'Impact Environnementale et Sociétale d'une Centrale à Charbon de 125 MW à Sendou Sénégal"
- CDM-PDD Version 03 (2006). "CDM: Energy efficiency improvement Project of CSS sugar mill" téléchargeable sur <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/BVQI1263550502.26/view>.
- Commission Européenne (2006). "Grandes installations de combustion." 584p. téléchargeable sur http://www.ineris.fr/ipcc/sites/default/files/files/Lcp_bref_0706_VF.pdf.
- COULIBALY Yezouma (2010). "Cours Thermodynamique Appliquée Master 1 énergie."
- COULIBALY Yezouma (2010). "Economie d'Énergie dans le Bâtiment et dans l'Industrie." 97p
- CSS, MANGIN-EGLY (2010). "Analyse fonctionnelle Chaudière KT150 CSS SYS 20 274 02 301 Révision B." 144p.
- DIOP Mballo (2001). "Analyse énergétique et exergetique d'une tranche de vapeur à la centrale CII de Bel-Air." Projet de fin d'études. Ecole Supérieure Polytechnique, 76p.
- EPA. (1993). BAGASSE COMBUSTION IN SUGAR MILLS. Téléchargeable sur <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch01/bgdocs/b01s08.pdf>
- GERMAN W.H. (1908). "Description of molasses burning furnace." 12p téléchargeable sur <http://ojs-prod.library.usyd.edu.au/index.php/EANSW/article/viewFile/3741/4365>
- HUGOT E., JENKIS G.H. (1986). "Hand Book of Cane Sugar Engineering 3rd Edition." Elsevier Science Publishers B.V., 1184 p.
- Journal de la CSS (2009, Aout). "Les enjeux du KT150." Téléchargeable sur http://css.sn/journaux/JOURNAL_CSS_N22-WEB.pdf
- KULKARNI D.P. (2013). "Cane Sugar Manufactured In India." The Sugar Technologists' Association of INDIA 21, Community Centre, East of Kailash, 525 p.

MUDRY F., (2002). "Ajustage des paramètres d'un régulateur PID" 30p.

Manuel d'emploi et d'entretien chaudière à grille roulante volume I, Chapitre IV Présentation et Description de la chaudière. Documents ISGEC JOHN THOMPSON

MAIGA M. (1995). "Le bassin du fleuve Sénégal. De la traite négrière au développement sous-régional auto-centré". Paris, Harmattan. Afrique 2000, 321p.

MBAYE K. (1985). "Impact de l'agro-industrie sur le développement de Richard Toll". Thèse de 3ième Cycle, Université de Paris 1, 286p.

N'DE Atsey Jean Marc (2012). "Efficacité Energétique des chaudières de l'unité agricole intégrée de Zuenoula (Production d'énergie)" " Mémoire pour l'obtention du Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 55p.

RAZACK Moussa (2012). "Amélioration du fonctionnement par une revue de l'exploitation des chaudières de la SN-SOSUCO. " Mémoire pour l'obtention du Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 56p)

SCHOPF N., ERBINO P. (2010). "Thermal utilisation of vinasse as alternative fuel." Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol., Vol. 27: 1-7p.

SUDHAKAR J., VIJAY P. (2013). "Control of Moisture Content in Bagasse by Using Bagasse Dryer." International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) ISSN: 2231-538p.

SOSA-ARNAO Juan H., NEBRA Sílvia A. (2009). "Bagasse Dryer Role in the Energy Recovery of Water Tube Boilers." Drying Technology, 27: 587–594p.

SY Karalan (2005). "Une recherche au service de la gestion décentralisée des ressources naturelles : le cas de la moyenne vallée du fleuve Sénégal ". Mémoire de DEA (Diplôme d'Etude Approfondie, Université Gaston Berger de Saint-Louis, 92p.

Saacke (2012). "Liquids with Low Heating Values" Téléchargeable sur http://www.saacke.com/fileadmin/Media/Documents/pdfs/EN/Brochures/0-0750-0020-02_Ansicht.pdf

SANKALP SHRIVASTAV, IBRAHIM HUSSAIN (2013). "Design of Bagasse Dryer to Recover Energy of Water Tube Boiler in a Sugar Factory." International Journal of Science and Research (IJSR), India Online ISSN: 2319-7064

TOURE Selle (2008). "Amélioration du rendement des chaudières à Bagasse type BRI à la CSS." Projet de fin d'études. Ecole Supérieure Polytechnique, 165p.

UNFCCC/CCNUCC (2006). Approved consolidated baseline and monitoring methodology ACM0006 "Consolidated methodology for electricity and heat generation from biomass" 89p.