

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR
ANTHONY GONCALVES

DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME DE COMBUSTION POUR LES RÉSIDUS
FORESTIERS

HIVER 2010

RÉSUMÉ

Les travaux présentés ici ont pour objet l'étude d'un système de combustion pour les résidus forestiers utilisant la technologie des lits fluidisés bouillonnant intégré dans un générateur de vapeur. La taille de l'unité correspond à la demande en vapeur d'une usine de production de lactosérum. Le principal objectif du projet est de développer une technologie de combustion qui permet une opération stable de la chaudière avec un taux d'humidité du combustible de 50%.

Les trois objectifs de cette maîtrise sont premièrement, la conception d'une grille de fluidisation et sa construction visant son intégration dans une chaudière à tube d'eau existante conçu pour une technologie de combustion à grille mobile. Deuxièmement, le développement d'un modèle mathématique associant tous les modes de transfert de chaleur dans le système (conduction, convection et rayonnement) à tous les régimes de fonctionnement a permis la vérification du bilan énergétique du système. La réalisation d'un montage expérimental a permis d'améliorer la compréhension du phénomène de fluidisation. Troisièmement, la réalisation d'un système de contrôle permettant le fonctionnement stable et sécuritaire de l'installation avec les particularités de la combustion en lit fluidisé qui diffère d'un contrôleur classique a été mené à bien.

La mise en service de cette centrale thermique de cogénération à la biomasse a eu lieu à l'hiver 2009, des séries d'expérimentations sur son fonctionnement à froid et à chaud sont présentés et comparées avec les calculs de conceptions.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier monsieur László Kiss, mon directeur de recherche, pour m'avoir aidé à développer mon esprit d'analyse scientifique. Il a donné de son temps sans compter et sa contribution a été d'une aide précieuse. Je tiens à remercier particulièrement madame Marie-Isabelle Farinas, ma codirectrice de recherche, qui a su me transmettre sa rigueur scientifique et son esprit de synthèse.

Je tiens à remercier toute l'équipe de Bouilloire Falmecc Incorporé pour leurs patiences et tout particulièrement Claude Asselin et Luc Martel (directeurs) pour leurs soutiens financiers sans lesquels cette maîtrise n'aurait pu être réalisée. Je tiens à remercier tous les membres de ce projet sans qui ce projet n'existerait pas non plus.

Je tiens à remercier tous mes collègues de maîtrise et doctorat avec qui j'ai eu la chance de partager leurs idées et leurs projets.

Je tiens à remercier tout particulièrement mes parents et mes sœurs ainsi que Jeanne Sophie Martin, ma conjointe, sur qui j'ai toujours pu compter et qui a su m'accompagner et m'aider tout au long de la maîtrise et surtout pendant les moments difficiles.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	I
REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	VIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 LE PROJET	2
1.1.1 PRÉSENTATION DU PROJET	2
1.1.1.1 <i>Présentation de l'entreprise</i>	3
1.2 PROBLÉMATIQUE	4
1.3 OBJECTIFS	5
CHAPITRE 2 GÉNÉRATEURS À VAPEUR	6
2.1 HISTORIQUE	7
2.2 RAPPEL SUR LE FONCTIONNEMENT D'UN GÉNÉRATEUR DE VAPEUR	8
2.3 CLASSIFICATION ET CARACTÉRISATION DES DIFFÉRENTS TYPES DE CHAUDIÈRES...	9
2.3.1 CHAUDIÈRES À TUBE D'EAU	10
2.3.2 CHAUDIÈRES À TUBE DE FUMÉE	13
2.4 NOTIONS DE BASE DES MÉCANISMES DE TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES GÉNÉRATEURS DE VAPEUR	15
2.4.1 RAYONNEMENT DANS UN GÉNÉRATEUR DE VAPEUR	15
2.4.1.1 <i>Calcul de la température adiabatique de la flamme</i>	16
2.4.1.2 <i>Calcul du flux échangé par rayonnement</i>	17
2.4.2 CONVECTION DANS UN GÉNÉRATEUR DE VAPEUR	19
2.4.2.1 <i>Calcul du coefficient d'échange par convection</i>	20
2.4.3 CONDUCTION DANS LES GÉNÉRATEURS DE VAPEUR.....	22
2.4.4 BILAN GLOBAL DANS UN GÉNÉRATEUR DE VAPEUR	24
2.5 NOTIONS DE BASE DES MÉCANISMES DE LA COMBUSTION ET ÉLÉMENTS DE CALCUL DES DIFFÉRENTS CARBURANTS (SOLIDE, LIQUIDE, GAZ)	25
2.5.1 THÉORIE DE LA COMBUSTION.....	25
2.5.2 POUVOIR CALORIFIQUE	28
2.6 MÉTHODE DE COMBUSTION DES CARBURANTS SOLIDES:DESCRIPTION DES DIFFÉRENTES CONCEPTIONS	30
2.6.1 SYSTÈMES DE COMBUSTION À GRILLE.....	30
2.6.1.1 <i>Systèmes de combustion à grilles fixe (inclinées et à plat)</i>	30
2.6.1.2 <i>Systèmes de combustion à grilles rotative ou vibrante</i>	32
2.6.2 SYSTÈMES DE COMBUSTION À LIT FLUIDISÉ	34
2.6.2.1 <i>Combustion en lit circulant</i>	35
2.6.2.2 <i>Combustion en lit fluidisé bouillonnant</i>	36
2.6.3 SYSTÈME D'ALIMENTATION DES COMBUSTIBLES SOLIDES DANS LE FOYER	38
2.6.3.1 <i>Combustibles solides pulvérisables</i>	38
2.6.3.2 <i>Combustibles solides non pulvérisables</i>	40

CHAPITRE 3 COMBUSTION EN LIT FLUIDISÉ ET CONTRÔLE	43
3.1 PRINCIPES DE LA FLUIDISATION	44
3.1.1 HYDRODYNAMIQUE	44
3.1.1.1 <i>Fluidisation d'une particule</i>	46
3.1.1.2 <i>Classification des poudres</i>	47
3.1.1.3 <i>Pertes de charges et vitesse critique</i>	49
3.1.2 TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES LITS FLUIDISÉS	52
3.2 CONCEPTION DES GRILLES DE FLUIDISATION	54
3.2.1 TYPES DE GRILLES DE FLUIDISATION	55
3.2.2 TAILLE DES BULLES	56
3.2.3 LONGUEUR ET VITESSE DU JET	58
3.2.4 PERTES DE CHARGES ET L'HOMOGENÉISATION DE LA FLUIDISATION	60
3.3 CONTRÔLE ET DÉMARRAGE DES CHAUDIÈRES À LIT FLUIDISÉ BOUILLONNANT	61
3.3.1 CONTRÔLE DES GÉNÉRATEURS DE VAPEUR.....	61
3.3.1.1 <i>Contrôle de la combustion en lit fluidisé bouillonnant</i>	64
3.3.1.2 <i>Stabilisation de la combustion au démarrage</i>	64
3.3.1.3 <i>Régime de fluidisation et température de sable</i>	66
3.3.1.4 <i>Avantages liés à l'utilisation des lits fluidisés</i>	66
3.3.1.5 <i>Phénomène d'agglomération dans les lit fluidisés</i>	67
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	68
4.1 CONCEPTION D'UN LIT FLUIDISÉ POUR LA COMBUSTION DE BIOMASSE.....	68
4.1.1 DÉMARCHE DE CONCEPTION	69
4.1.2 ESSAIS ET ANALYSE DU LIT FLUIDISÉ	74
4.2 ÉCHANGES DE CHALEUR	76
4.2.1 SIMULATEUR.....	76
4.2.2 ANALYSE ET DISCUSSION DU SIMULATEUR	81
4.3 GESTION DU SYSTÈME	82
4.3.1 CONCEPTION DE LA LOGIQUE DE CONTRÔLE	83
4.3.2 CHOIX ET EMBLACEMENT DES CAPTEURS.....	87
4.4 EXPÉRIMENTATIONS AVEC LE GÉNÉRATEUR DE VAPEUR INSTALLÉ À LA FROMAGERIE BOIVIN.....	89
4.4.1 ESSAIS DES BOUCLES DE CONTRÔLE À FROID	89
4.4.2 ESSAIS DES BOUCLES DE CONTRÔLE À CHAUD	93
4.4.3 ANALYSE ET DISCUSSION DU CONTRÔLEUR	101
4.5 COMPARAISON DES ESSAIS DE L'INSTALLATION AVEC LE SIMULATEUR.....	104
CHAPITRE 5 CONCLUSION.....	107
CHAPITRE 6 RECOMMANDATIONS	112
BIBLIOGRAPHIE	114
ANNEXE 1 : GRAPHIQUE DE L'ÉMISSIVITÉ DU CO₂ ET H₂O DANS UN MÉLANGE DE GAZ NON PARTICIPANT.....	116
ANNEXE 2 : GRAPHIQUE DE CORRECTION DE L'ÉMISSIVITÉ QUAND CO₂ ET H₂O SONT PRÉSENTS DANS UN MÉLANGE DE GAZ	117

ANNEXE 3 : CALCUL DE L'ÉMISSIVITÉ EFFECTIVE POUR DES TUBES AVEC DES AILETTES	118
ANNEXE 4 : VALEUR DES COEFFICIENTS DU NOMBRE DE NUSSELT POUR UN ÉCHANGEUR À FLUX CROISÉ AVEC PLUSIEURS SÉRIES DE TUBES	120
ANNEXE 5 : DIAGRAMME DES PERTES DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT D'UNE CHAUDIÈRE SELON LES NORMES DE L'ABMA	121
ANNEXE 6 : FONCTIONNEMENT DÉTAILLÉ DU SIMULATEUR	122
ANNEXE 7 : DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU GÉNÉRATEUR DE VAPEUR	125
ANNEXE 8 : NARRATIF DE FONCTIONNEMENT EN LIEN AVEC LE SCHÉMA D'INSTRUMENTATION ET DE CONTRÔLE	136
ANNEXE 9 : SCHÉMA D'INSTRUMENTATION ET DE CONTRÔLE	139

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Chaudière à vapeur avec système de combustion en lit fluidisé [1]	4
Figure 2.1 : Moteur à vapeur par Héron Alexandrie [2]	7
Figure 2.2 : La machine à vapeur de James Watt [3]	8
Figure 2.3 : Chaudière à tube d'eau	11
Figure 2.4 : Échange et circulation dans un générateur de type à tube d'eau [2]	12
Figure 2.5 : Chaudière à tube de fumée [2]	13
Figure 2.6 : Parcours des fumées [3]	14
Figure 2.7 : La circulation de l'eau dans une chaudière à tube de fumée [3]	14
Figure 2.8 : Disposition des tubes pour un surchauffeur [4]	21
Figure 2.9 : Distribution de la température avec flux constant [4]	23
Figure 2.10 : Bilan d'énergie d'un générateur de vapeur	24
Figure 2.11 : Schéma de principe de foyer à grille fixe [6]	30
Figure 2.12 : Système de combustion à grille fixe inclinée [3]	32
Figure 2.13 : Système de combustion à grille rotative [3]	33
Figure 2.14 : Lit fluidisé circulant [2]	35
Figure 2.15 : Lit fluidisé bouillonnant [2]	37
Figure 2.16 : Alimentation par transport pneumatique [8]	39
Figure 2.17 : Alimentation de type gicleur [3]	40
Figure 2.18 : Deux types de vis sans fin (a) pas variable, (b) diamètre variable [9]	41
Figure 2.19 : Double vis sans fin [9]	42
Figure 3.1 : Diagramme de Reh [8]	45
Figure 3.2 : Équilibre d'une particule [9]	46
Figure 3.3 : Classification des poudres selon Geldart [6]	48
Figure 3.4 : Vitesse de fluidisation [13]	51
Figure 3.5 : Changements d'état d'un lit de particules au fur et à mesure que la vitesse augmente [14]	52
Figure 3.6 : Trois types de conception pour des grilles de fluidisation [8]	55
Figure 3.7 : Caractérisation des bulles en fonction des types de grille de fluidisation [9]	58
Figure 3.8 : Disposition des tuyères à multiple trous horizontaux [14]	59
Figure 3.9 : Schéma simplifié d'un générateur de vapeur	62
Figure 3.10 : Diagramme des sous systèmes du contrôle de bouilloire [23]	63
Figure 4.1 : Buses de fluidisation	71
Figure 4.2 : Lit fluidisé expérimental (Département des sciences appliquées, UQAC)	71
Figure 4.3 : Résultats des tests sur les pertes de charges	72
Figure 4.4 : Conception finale du lit fluidisé (propriété intellectuelle)	74
Figure 4.5 : Configuration du lit fluidisé (propriété intellectuelle)	75
Figure 4.6 : Vue de l'algorithme	78
Figure 4.7 : Variation de la température du lit fluidisé obtenue avec le simulateur	79
Figure 4.8 : Débit de combustible en fonction du débit de vapeur	80
Figure 4.9 : Exemple de représentation pour un schéma d'instrumentation et de contrôle [8]	85

Figure 4.10 : Schéma d'instrumentation et de procédé (propriété intellectuelle).....	86
Figure 4.11 : Tableaux des besoins en instrumentation.....	87
Figure 4.12 : Variation du niveau d'eau	90
Figure 4.13 : Variation de la pression foyer	91
Figure 4.14 : Simulation de la boucle de contrôle de pression foyer.....	92
Figure 4.15 : Essai du lit fluidisé au démarrage	94
Figure 4.16 : Fonctionnement général du système de combustion.....	96
Figure 4.17 : Production de vapeur pour la période correspondant à la figure 4.16.....	97
Figure 4.18 : Variation de la pression dans le temps en fonction du taux de combustion (1)	98
Figure 4.19 : Production de vapeur pour la période correspondant à la figure 4.18.....	99
Figure 4.20 : Variation de la pression en fonction du taux de combustion dans le temps (2)	100
Figure 4.21 : Production de vapeur pour la période correspondant à la figure 4.19.....	101
Figure 4.22 : Compilation des résultats (comparaison)	105
Figure A1.1 : Graphique de l'émissivité du CO ₂ et H ₂ O [4]	116
Figure A2.1 : Graphique de correction de l'émissivité [4]	117
Figure A3.1 : Échangeur tubes ailettes	118
Figure A4.1 : Coefficient du nombre de Nusselt pour un échangeur [4].....	120
Figure A5.1 : Tableau des pertes pour un générateur de vapeur	121
Figure A6.1 : Schéma de principe du générateur de vapeur.....	122
Figure A6.2 : Schéma du principe itératif du simulateur.....	123
Figure A6.3 : L'arbre de décision du simulateur	124
Figure A8.1 : Schéma d'instrumentation et de contrôle	139

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Lettre latines

A	Aire	[m ²]
ABMA	American Boiler Manufacturers Association	-
ASME	America Society of Mechanical Engineers	-
a	Accélération	[m/s ²]
C _p	Chaleur spécifique	[J/kg.°C]
d	Diamètre	[m]
e	Épaisseur	[m]
F	Force	[N]
g	Constante gravitationnelle	[m/s ²]
H	Hauteur	[m]
h	Enthalpie	[kJ/kg]
h	Coefficient d'échange de chaleur	[W/m ² .°C]
k	Conductivité	[W/m.K]
l	Chaleur latente	[kJ/kg]
L	Longueurs	[m]
M	Masse	[Kg]
m	Débit massique	[kg/s]
P	Pression	[Pa]
p	Poids	[N]
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur	[kJ/kg]
Q	Flux	[W]
q	Densité de flux	[W/m ²]
R	Résistance thermique	[m ² .°C/W]
r	enthalpie de réaction	[kJ/kg]
S	Distance	[m]
T	Température	[°C]
U	Vitesse de fluidisation	[m/s]
V	Volume	[m ³]

Lettres grecques

σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² .K ⁴]
ε	Émissivité	[-]
α	Absorptivité	[-]
ρ	Densité	[kg/m ³]
μ	Viscosité dynamique	[kg/m.s]
τ	Contrainte mécanique	[Pa]
Δ	Différence	-
π	Pi	-
η	Rendement	[-]

Indices

b	Corps noir	-
c	Dioxyde de carbone (CO ₂)	-
comb	Combustible	-
e	Extérieur	-
f	Fluide	-
g	Gaz	-
h	Hydraulique	-
i	Intérieur	-
j	Jet	-
m	Tuyère	-
mf	Minimum de fluidisation	-
o	Coefficient d'échange global	-
p	Particule	-
r	Radiation	-
s	Surface	-
t	Terminal	-
w	Eau (H ₂ O)	-
wall	Mur d'eau	-

Nombres adimensionnels

Ar	Nombre d'Archimède	-
Nu	Nombre de Nusselt	-
Pr	Nombre de Prandtl	-
Re	Nombre de Reynolds	-

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Sur la scène mondiale, l'équilibre entre les demandes et la disponibilité d'énergie devient plus en plus critique dû à la pénurie à venir. Dans le contexte socio-économique actuel la volonté d'utiliser des énergies renouvelables s'accroît. Sa provenance, son coût et son utilisation ont toujours été des facteurs primordiaux pour les industriels et maintenant aussi pour les consommateurs. Entre autre, l'augmentation des prix du pétrole est un facteur non négligeable. Au Québec, 99% de la production d'énergie électrique provient des barrages hydro-électriques. Si les industries ne peuvent pas choisir la provenance et le coût de leur électricité, elles peuvent cependant diversifier les sources d'énergies nécessaires à leurs productions.

De nombreuses entreprises ont besoin de plusieurs types d'énergies (énergie thermique, énergie électrique, énergie mécanique...) pour alimenter leurs procédés et il leur est nécessaire de faire des choix judicieux. L'énergie thermique (la production de vapeur) est très utilisée dans l'industrie, telles que les pâtes et papier et l'agroalimentaire.

Dans la région du Saguenay Lac St Jean, les activités liées à la foresterie, bien que

déclinantes, ont une place non négligeable dans l'économie régionale, de même que dans l'économie québécoise. Le domaine forestier produit de nombreux déchets tels les écorces d'arbres, souvent inutilisées. Les stratégies adoptées par les scieries pour traiter ces résidus sont coûteuses en temps et en espace, ce qui présente ces résidus comme une ressource potentielle, disponible à moindre coût.

Par exemple, si on totalise les dépenses énergétiques nécessaires à la réalisation d'un procédé agroalimentaire nécessitant de la vapeur, les économies réalisées avec une combustion de biomasse sont de 80% par rapport au gaz naturel (*prix du gaz naturel et de l'écorce, 2008*).

À la lumière de ces deux problématiques, soit le coût de la production de vapeur et l'accumulation des résidus forestiers inutilisés, c'est autour de ce défi particulier que ce projet de maîtrise s'articule : produire de la vapeur grâce à cette biomasse.

1.1 LE PROJET

Ce projet est réalisé en collaboration avec *Bouilloire Falmec Incorporé (BFI)* située dans la zone industrielle des *Pins à Alma, Saguenay Lac St Jean* et l'*Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)*.

1.1.1 PRÉSENTATION DU PROJET

Le projet a débuté lorsque la compagnie *BFI* a répondu à un appel d'offre de la *Fromagerie Boivin*. La fromagerie souhaite produire de la poudre de lactosérum afin de fournir des entreprises agroalimentaires pour la fabrication de différents produits (plats

préparés, biscuits, boissons, etc.).

La fromagerie possède déjà un système de génération de vapeur pour sa production de fromage (chaudière). Cependant, la volonté de l'entreprise d'intégrer le marché du lactosérum nécessite une augmentation de la capacité de production de vapeur. Dans ce but, BFI a proposé une unité de cogénération à la biomasse de 9.5T/h de vapeur surchauffée. La compagnie a par la même occasion approché le Département des sciences appliquées de l'UQAC pour fins de collaboration, ce qui a résulté en un projet de maîtrise.

1.1.1.1 PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE

La compagnie *Bouilloire Falmec Inc (BFI)* se spécialise dans le développement et la fabrication des chaudières ou bouilloires industrielles de petites (environ 300 HP) et moyennes tailles (environ 600 HP). De la fabrication au démarrage d'une chaudière, trois étapes se succèdent :

1. La fabrication (assemblage des écrans de tubes, mise en forme, soudage, isolation) ;
2. L'installation des équipements et accessoires (pompes, ventilateurs, système de combustion, ...)
3. Le contrôle de la chaudière (programmation logique de contrôle de la combustion et du système, mise en route...).

BFI réalise jusqu'à présent la première étape et veut acquérir de l'expertise dans le but de réaliser les deuxième et troisième étapes. La figure 1.1 montre une chaudière avec les éléments des trois étapes.

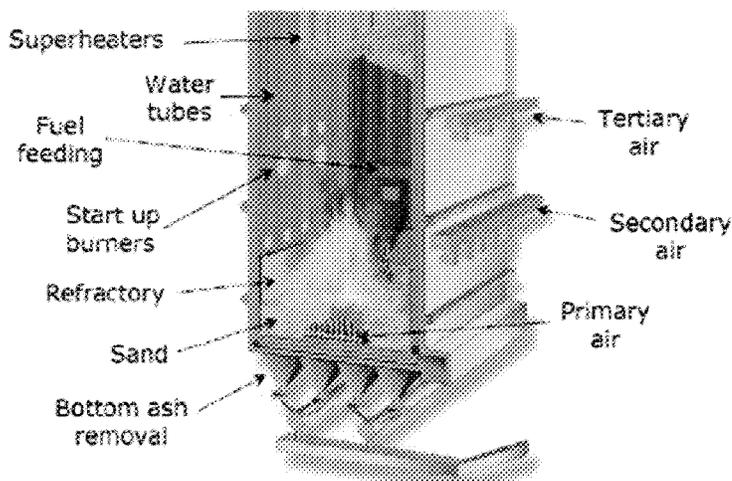


Figure 1.1 : Chaudière à vapeur avec système de combustion en lit fluidisé [1]

Les objectifs de *BFI* se sont bien insérés dans le présent projet. D'une part, l'entreprise souhaite développer une expertise dans le domaine de la combustion, dans le but d'équiper leurs chaudières (étapes 2 et 3). D'autre part, ils s'intéressent au potentiel d'utilisation des résidus forestiers comme combustible.

1.2 PROBLÉMATIQUE

Le but de ce projet est le développement d'une technologie de combustion des résidus forestiers afin de produire de la vapeur. Le défi particulier consiste à optimiser et à contrôler la combustion de biomasse à très faible pouvoir calorifique et à fort taux d'humidité. De plus, ces deux paramètres varient en fonction de la provenance du combustible (condition de stockage, essence du bois).

Malgré des efforts investis dans la recherche sur la combustion des résidus agricoles et forestiers, les méthodes de calcul et de conception ne sont pas disponibles aux ingénieurs de l'industrie : d'où la nécessité de développer des outils particuliers.

1.3 OBJECTIFS

Le projet de recherche actuel vise à étudier le système complet de la production de vapeur en considérant la consommation d'énergie thermique de la *Fromagerie Boivin*. Dans ce but, une approche de recherche et de développement a été proposée. À l'issue de ce projet, *BFI* aimerait acquérir une expertise dans ce domaine afin de développer d'autres installations du même type. Dans ce projet de maîtrise cadrent trois objectifs principaux:

1. Concevoir un système de combustion adapté à l'écorce, utilisant le principe de combustion en lit fluidisé. Pour la conception, on doit développer une méthode de calcul basée sur la compréhension des procédés dans le lit fluidisé.
2. Développer un simulateur pour vérifier si le flux de chaleur échangé est suffisant pour la production de vapeur demandée (évaporateur, surchauffeur, préchauffeur-économiseur d'eau d'alimentation).
3. Concevoir le contrôleur d'une chaudière, car la combustion de la biomasse diffère d'une installation typique avec des combustibles liquides ou gazeux.

CHAPITRE 2

GÉNÉRATEURS À VAPEUR

L'industrie utilise couramment la vapeur comme énergie nécessaire à la réalisation de nombreux et variés procédés. La vapeur est un fluide caloporteur disponible en grande quantité, facilement transportable et non toxique. La production de vapeur demande l'utilisation d'un combustible et l'utilisation d'un générateur de vapeur (chaudière). De plus la production de vapeur couplée à une turbine électrique permet 75% de la production mondiale d'électricité.

L'objectif du présent document est de condenser les notions nécessaires pour la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur dans les chaudières et de présenter les calculs thermiques fondamentaux. De plus, ce document fait un lien avec une problématique actuelle telle que la combustion des déchets forestiers et agricoles et l'utilisation des lits fluidisés pour leur combustion.

Le présent document fera un rappel sur les connaissances nécessaires à la compréhension du fonctionnement des chaudières à vapeur.

2.1 HISTORIQUE

L'intérêt de l'homme pour la machine à vapeur apparaît très tôt. Les premiers travaux remontent à l'antiquité avec l'invention du premier moteur à vapeur à réaction par *Héron d'Alexandrie* (figure 2.1).

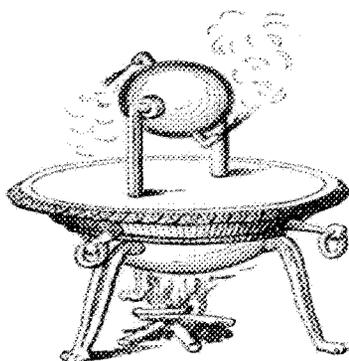


Figure 2.1 : Moteur à vapeur par Héron Alexandrie [2]

Cette invention (figure 2.1) resta une expérience sans réelle application. Il faut attendre les travaux de James Watt en 1780 pour voir les applications industrielles. James Watt améliora les machines à vapeur en permettant la régulation de la rotation de la roue (figure 2.2). Il déposa un brevet pour la première locomotive à vapeur. Il met lui-même au point le principe mécanique bielle et arbre à came ainsi que le cylindre à double action où la vapeur entraîne le piston à la descente et à la remontée. Ce qui augmente significativement les puissances des machines. Il invente aussi une nouvelle unité de la mesure de la puissance, le cheval vapeur.

Mais il faudra attendre 1800 et l'expiration des brevets de James Watt pour voir apparaître les générateurs à vapeur haute pression dans lesquels il ne croyait pas beaucoup.

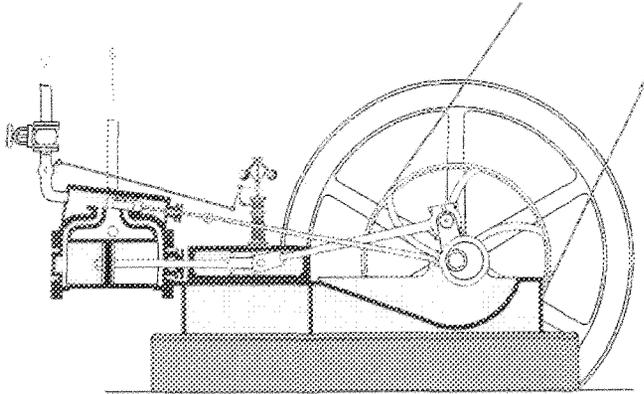


Figure 2.2 : La machine à vapeur de James Watt [3]

La machine à vapeur (figure 2.2) a permis la première révolution industrielle, en permettant de fournir la puissance au travail de l'homme et le déplacement des biens. Mais, elle a été remplacée aujourd'hui par le moteur à explosion, le moteur électrique et la turbine. L'utilisation de la turbine est très répandue pour la production d'électricité.

Depuis 1850, la construction des chaudières à vapeur et leurs utilisations a fourni de larges connaissances expérimentales. La recherche sur la combustion, les matériaux et la régulation ouvre un vaste domaine de recherche.

2.2 RAPPEL SUR LE FONCTIONNEMENT D'UN GÉNÉRATEUR DE VAPEUR

Le principe de fonctionnement des chaudières à vapeur fait appel aux connaissances de thermodynamique et de transfert de chaleur. On peut facilement faire l'analogie avec une casserole remplie d'eau au contact d'une source de chaleur.

Ainsi l'eau contenue dans la casserole élève sa température jusqu'à sa température d'évaporation (ébullition); puis, elle change de phase et devient vapeur. La température de

changement de phase correspond à l'état saturé de l'eau, elle est fonction de la pression du système. À la pression atmosphérique, l'eau s'évapore à 100°C.

La température de l'eau augmente par échange de chaleur et diminue lentement de densité. Ensuite, la température et la pression sont conservées et l'eau diminue de densité de façon significative pour changer de phase. Dans certaines chaudières, on souhaitera une vapeur surchauffée, ou encore appelée vapeur sèche. Le calcul de l'énergie nécessaire à l'évaporation peut se faire avec la différence des enthalpies et les chaleurs spécifiques (constante).

$$q = Cp * \Delta T_{12} + \Delta L_{23} + Cp * \Delta T_{34} \quad (2.1)$$

L'équation 2.1 représente la chaleur (ou flux) nécessaire pour chauffer (ΔT_{12}), évaporer (ΔL_{23}), et surchauffer (ΔT_{34}) 1kg d'eau.

Les modes de transfert de chaleur, dans une chaudière à vapeur par ordre d'importance sont le rayonnement, la convection et la conduction. Dans un premier temps, la combustion prenant place dans le foyer dégage une forte quantité de chaleur, matérialisée par une flamme, qui est transférée par rayonnement. Puis les fumées chaudes parcourent la chaudière en transférant leurs potentielles énergétiques à l'eau par convection et conduction à travers les tubes.

2.3 CLASSIFICATION ET CARACTÉRISATION DES DIFFERENTS TYPES DE CHAUDIÈRES

On retrouve deux principaux types de générateur de vapeur (tube d'eau et tube de fumées). La conception de certaines chaudières est le résultat d'un mélange entre les deux

principaux types, appelés « chaudières hybrides ».

2.3.1 CHAUDIÈRES À TUBE D'EAU

Ce sont les chaudières les plus utilisées dans les centrales thermiques. Elles permettent grâce à leurs configurations d'atteindre des pressions plus élevées nécessaires à la production d'électricité. La pression dans les tubes est égale à la pression du mélange diphasique à l'intérieur de ces derniers. En effet, la force par mètre de longueur s'appliquant à l'intérieur d'un tube de diamètre d_i , peut s'écrire de la façon suivante :

$$F = d_i * P \quad (2.2)$$

L'équation 2.2 montre que pour une même pression dans un générateur de vapeur (tubes), la force s'appliquant à l'intérieur des tubes augmente avec le diamètre. De plus, si on suppose que le tube est assemblé par deux zones de contact identiques représentant le point de rupture, on peut écrire :

$$F = 2 * e * L * \tau \quad (2.3)$$

L'équation 2.3 montre la limite mécanique du tube. Les équations (2.2) et (2.3) sont égales car la force dans le tube et celle qui provoquera la rupture au point de contact sont de même intensité. On peut ainsi écrire l'expression de la contrainte mécanique :

$$\tau = \frac{P * d_i}{2e} \quad (2.4)$$

L'équation 2.4 définit l'expression de la contrainte mécanique pour un tube soumis à une pression intérieure. Ce qui se traduit par une augmentation de la contrainte mécanique avec une augmentation du diamètre du tube pour une même pression. Alors une chaudière à tube d'eau est idéalement conçue pour fonctionner à haute pression (45 à 200bars).

L'appellation « tube d'eau » qui les caractérise provient du passage de l'eau dans une multitude de tubes verticaux reliés ensemble par des ailettes, qui sont exposés au foyer de combustion et à la fumée chaude (figure 2.3).

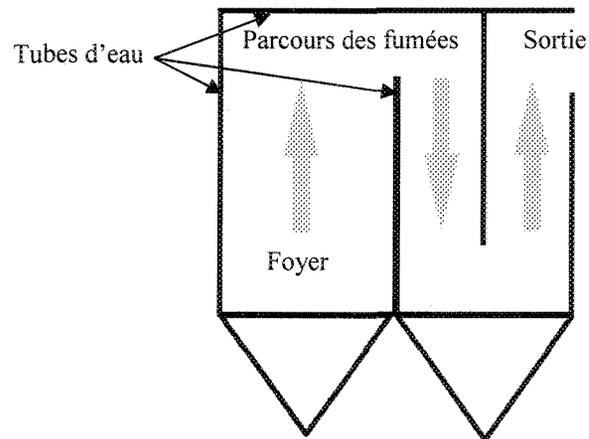


Figure 2.3 : Chaudière à tube d'eau

La figure 2.3 montre le parcours des fumées à l'intérieur d'une chaudière à tube d'eau. On peut remarquer que la surface contenant le plus de tubes est la chambre de combustion (flamme). La production de vapeur (taux de vaporisation) est directement liée à la surface d'échange avec la source chaude. Les tubes sont réunis dans un tube de plus grand diamètre appelé ballon de vapeur. Le ballon de vapeur contient une partie du mélange diphasique, soit la réserve tampon entre la demande et la production de vapeur. La figure 2.4 montre l'échange de chaleur entre les fumées et l'eau contenue dans les parois de la chaudière (tubes), et la circulation naturelle de l'eau à l'intérieur de ce type de chaudière.

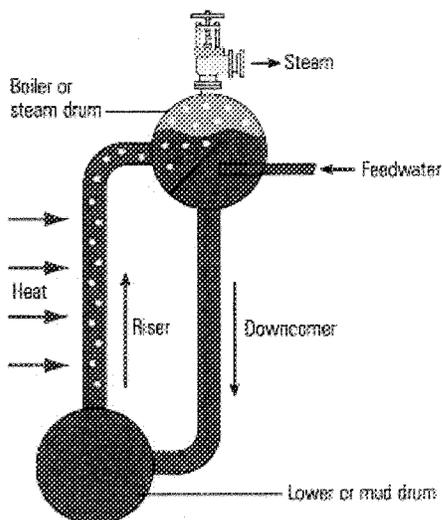


Figure 2.4 : Échange et circulation dans un générateur de type à tube d'eau [2]

L'eau provenant du ballon de vapeur descend dans les tubes non chauffés et remonte dans les tubes chauffés où l'eau se vaporise. Le mélange diphasique qui se forme dans ces tubes retourne au ballon de vapeur où elle est naturellement séparée. La vapeur peut ensuite quitter le système vers son utilisation (procédé, turbine...). Ainsi cette quantité de vapeur (débit de vapeur produit) est remplacée par une quantité d'eau (débit d'eau) égale au débit de vapeur produit. La circulation naturelle s'établit par le jeu des différences de masse volumique des colonnes de fluide en présence, l'un contenant de l'eau liquide et l'autre un mélange diphasique. Il résulte de ce principe que la circulation est d'autant plus intense que la différence de masse volumique entre l'eau et la vapeur est grande. L'évaporation prend place dans l'écoulement naturel des tubes chauffés.

2.3.2 CHAUDIÈRES À TUBE DE FUMÉE

Ce sont les chaudières les plus courantes dans l'industrie. Leur conception ne permet pas d'atteindre de haute pression, mais elles ont une grande réserve de vapeur et permettent d'absorber les demandes du réseau sans observer une trop grande baisse de pression.

L'appellation « tube de fumée » provient de la conception. En effet, le parcours des fumées a lieu à l'intérieur de tubes (contrairement au tube d'eau) qui traversent un réservoir cylindrique rempli d'eau (figure 2.5).

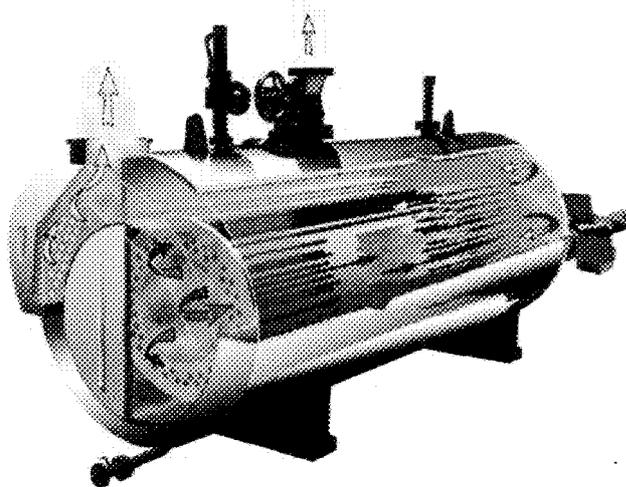


Figure 2.5 : Chaudière à tube de fumée [2]

La figure 2.5 montre le parcours des fumées dans les tubes et on peut observer que la combustion prend place au centre du générateur de vapeur. Les fumées font plusieurs détours avant d'évacuer le générateur (figure 2.6).

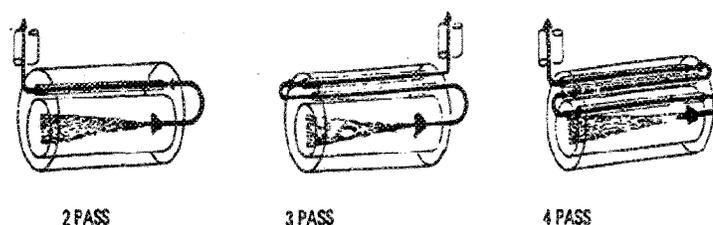


Figure 2.6 : Parcours des fumées [3]

Le nombre de passages (figure 2.6) dans le générateur de vapeur améliore le rendement. La température des fumées diminue avant de retourner à l'atmosphère et la surface d'échange est augmentée.

La principale différence entre les chaudières à tube d'eau et à tube de fumée est la quantité d'eau à l'intérieur de celles-ci. La circulation de l'eau est basée selon le même principe que les chaudières à tube d'eau (naturelle) (figure 2.7).

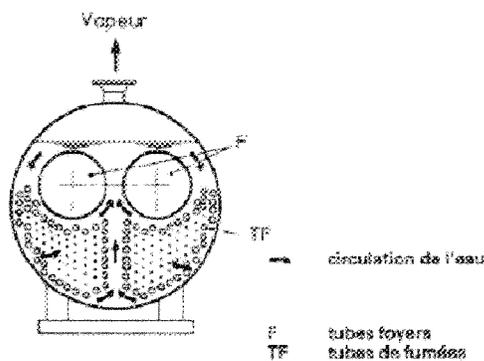


Figure 2.7 : La circulation de l'eau dans une chaudière à tube de fumée [3]

La différence de masse à l'intérieur de la chaudière donne lieu à un écoulement naturel, qui se fait de l'intérieur vers l'extérieur du générateur de vapeur. La disposition des tubes est propre à chaque constructeur et dépend de la puissance recherchée. On veut augmenter la turbulence à l'intérieur de l'écoulement dans le but d'augmenter l'échange thermique.

L'évaporation se produit à la surface extérieure des tubes.

Il existe des constructions de chaudières dites hybrides. On retrouve une partie à tube d'eau autour du foyer et un réservoir cylindrique de grosse taille, le ballon de vapeur. Ce type de générateur de vapeur est souvent utilisé dans le cas d'un combustible solide. On y retrouve des grandes surfaces d'échanges dans le foyer ainsi qu'une réserve de vapeur.

2.4 NOTIONS DE BASE DES MÉCANISMES DE TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES GÉNÉRATEURS DE VAPEUR

Un générateur de vapeur est un mélange complexe des trois modes d'échanges de chaleur (rayonnement, convection, conduction). La dominance des échanges par convection et rayonnement diminue l'importance de la conduction. Dans un premier temps, les méthodes de calculs pour les modes de transfert de chaleur sont présentées indépendamment. Dans un deuxième temps, les méthodes de calculs sont combinées dans le but de faire un bilan global dans un générateur de vapeur.

2.4.1 RAYONNEMENT DANS UN GÉNÉRATEUR DE VAPEUR

Une chaudière est chauffée par réaction chimique d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide avec de l'air dans la chambre de combustion. Cette réaction chimique donne naissance à une flamme et à des produits de combustion (fumée). Dans une chambre de combustion ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$) les gaz avec les molécules à trois atomes participent de façon significative dans l'échange radiatif ($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$). La couleur de la flamme provient des petites particules imbrûlées (liquide ou solide) dans les produits de la réaction (fumées).

2.4.1.1 CALCUL DE LA TEMPÉRATURE ADIABATIQUE DE LA FLAMME

On suppose que l'énergie contenue dans les réactifs (carburant-comburant) de la combustion est égale à l'énergie contenue dans les produits (fumées), soit une évolution adiabatique. De plus, on considère les fumées comme un gaz parfait donc l'enthalpie est égale à la variation de température multipliée par la chaleur spécifique des fumées. On obtient ainsi l'équation suivante :

$$m_{air} * h_{air} + m_{comb} * h_{comb} + m_{comb} * PCI = m_{gaz} * Cp_{gaz} * (T_{adb} - T_{ref}) \quad (2.5)$$

Dans l'équation 2.5 on utilise une température de référence ($\sim 25^{\circ}\text{C}$), qui est la température de l'ambient. On utilise la chaleur spécifique des gaz de combustion à la température adiabatique de la flamme. Ainsi un calcul par itération est nécessaire pour obtenir un équilibre dans l'équation 2.5. Une valeur de la chaleur spécifique moyenne obtenue par expérience peut aussi être utilisée [31].

Le calcul de la température de flamme adiabatique existe seulement pour une absence totale de travail, de variation d'énergie cinétique et potentielle. Étant donné ces hypothèses, il s'agit de la température maximale qui peut être atteinte par la réaction; car toute perte de chaleur et toute combustion incomplète aurait pour effet de diminuer la température de la flamme. Alors la flamme atteint sa température maximale dans le cas d'un mélange stœchiométrique. Ce calcul est une bonne approche et offre de bons résultats.

Une combustion stœchiométrique est un cas idéal, et la température de la flamme ne sera pas celle calculée. On définit alors une température de rayonnement des gaz de combustion, qui correspond à la température des molécules à trois atomes. Cette température se calcule par itération et sera détaillé par la suite.

2.4.1.2 CALCUL DU FLUX ÉCHANGÉ PAR RAYONNEMENT

Afin de calculer de façon précise l'échange de chaleur par rayonnement à l'intérieur de la chambre de combustion, on utilise généralement la méthode de l'émissivité et d'absorptivité des gaz (H_2O et CO_2) (équation 2.6). Le calcul de l'émissivité des surfaces est aussi très important, car il dépend de la géométrie qui modifie le facteur de forme et de l'encrassement qui modifie l'état de surface.

$$Q_{transférer} = \text{eff} * A * \sigma * (\varepsilon_g (T_{gaz})^4 K - \alpha_g (T_{surface})^4 K) \quad (2.6)$$

L'équation 2.6 est une méthode développée par Hottel en 1954 [4]. Les particules participantes sont celles à trois atomes. Le gaz carbonique et la vapeur d'eau sont importants en pratique car ils sont présents en grande quantité dans les gaz de combustion. Ceci signifie que ces gaz ont un certain coefficient d'absorption et d'émission, en fonction de leur densité, température, pression et de la géométrie de l'enceinte.

Les gaz présents sont considérés comme étant des gaz parfaits, l'émissivité déterminée est une émissivité moyenne pour toutes les longueurs d'ondes émises dans la chambre de combustion. L'utilisation de cette méthode nécessite une analyse des fumées pour le cas étudié. Cette analyse est souvent proposée en volume des gaz. Dans un premier temps, il faut déterminer la pression partielle des gaz CO_2 et H_2O :

$$P_c = \%CO_2 * P_{total} \quad (2.7)$$

$$P_w = \%H_2O * P_{total} \quad (2.8)$$

La chambre de combustion est ramenée à une longueur caractéristique (L_c) de la manière suivante :

$$L_c = 3.6 * \frac{\text{volume}}{\text{surface}} \quad (2.9)$$

Ensuite les résultats des équations (2.7) et (2.8) sont combinés avec l'équation (2.9) et utilisés dans le graphique de l'émissivité du CO_2 et H_2O (annexe 1). L'annexe 1 détermine l'émissivité des particules de H_2O et CO_2 . Afin de déterminer le facteur de correction quand H_2O et CO_2 sont présents ensemble dans un mélange de gaz, on utilise le graphique de correction de l'émissivité (annexe 2).

Ainsi l'émissivité du gaz s'obtient avec la combinaison des relations précédentes de la manière suivante :

$$\varepsilon_g = \varepsilon_c + \varepsilon_w - \Delta\varepsilon \quad (2.10)$$

Ensuite, on détermine l'absorptivité du gaz. La démarche nécessaire pour la détermination de l'absorptivité du gaz (H_2O et CO_2) est approximativement semblable. L'unique différence provient de la correction avec la température de surface de la chambre de combustion. Ainsi, il est important de retenir que l'absorptivité du gaz se détermine avec la température de surface. Dans le cas d'un générateur, la température de surface est prise à la température de changement de phase de l'eau dans les tubes. Il faut appliquer des corrections à chaque étape de la démarche afin de prendre en compte la température de surface et non celle du gaz. L'équation 2.11 montre la correction à apporter au calcul des pressions partielles pour le CO_2 et la même correction pour H_2O .

$$P = P_c * L_c * \frac{T_{\text{surface}}}{T_{\text{gaz}}} \quad (2.11)$$

Nous utilisons la même table (annexe 1) vue précédemment mais la température utilisée sera celle de la surface. On obtient ensuite un facteur de correction avec l'annexe 2 pour un

mélange de gaz et l'absorptivité du CO_2 et du H_2O dépend de l'émissivité précédemment calculée :

$$\alpha_c = \left(\frac{T_{gaz}}{T_{surface}} \right)^{0.65} * \varepsilon_c \quad (2.12)$$

$$\alpha_w = \left(\frac{T_{gaz}}{T_{surface}} \right)^{0.45} * \varepsilon_w \quad (2.13)$$

Puis l'absorptivité du mélange s'obtient de la même manière que pour l'émissivité :

$$\alpha_g = \alpha_c + \alpha_w - \Delta\alpha \quad (2.14)$$

Dans le cas d'un corps noir ($\varepsilon = 1$), le flux transféré serait :

$$Q_b = A * \sigma * [\varepsilon_g (T_{gaz})^4 K - \alpha_g (T_{surface})^4 K] \quad (2.15)$$

Dans le cas d'un corps gris le flux transféré serait :

$$Q = \frac{\varepsilon_s + 1}{2} * Q_b \quad (2.16)$$

L'émissivité de la surface est obtenue dans la littérature. Dans le cas d'un mur de tubes séparés par des ailettes, le rayonnement d'un des deux corps ne tombe pas complètement sur l'autre, il y a existence d'un facteur de forme. L'annexe 3 présente la démarche pour trouver ce facteur de forme. Ainsi on rajoute le facteur de forme obtenu et on obtient l'équation 2.6

2.4.2 CONVECTION DANS UN GÉNÉRATEUR DE VAPEUR

Les fumées issues de la réaction de combustion échangent de la chaleur le long des tubes jusqu'à la sortie du générateur. En plus d'échanger par rayonnement, elles échangent

par convection, équation 2.17 :

$$Q = h * A * \Delta T \quad (2.17)$$

Le calcul du coefficient de convection (h) dépend des propriétés thermophysiques du fluide (fumée), de la température, de la vitesse et de la géométrie. La démarche est présentée ici.

2.4.2.1 CALCUL DU COEFFICIENT D'ÉCHANGE PAR CONVECTION

Le calcul du coefficient d'échange par convection dépend du choix d'une température de référence qui est la moyenne entre la température de surface et du fluide.

On commence par le calcul du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho * V_{\max} * d_h}{\mu} \quad (2.18)$$

Si le nombre de Reynolds est supérieur à 2300 à l'intérieur d'un tube, l'écoulement commence sa transition de laminaire vers turbulent. Dans notre cas, l'écoulement est toujours (ou presque) turbulent. Ensuite, on utilise une corrélation pour le nombre de Nusselt. Les corrélations dépendent du type d'écoulement (laminaire, transitoire ou turbulent), de la géométrie et des températures. La corrélation la plus satisfaisante pour les générateurs de vapeur dans le cas d'un écoulement dans un conduit est l'équation de Colburn [4] :

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.43} \quad (2.19)$$

L'équation 2.19 s'applique dans le cas d'un écoulement turbulent, sans considérations de coefficient de friction et pour un écoulement complètement développé. Le nombre de Prandtl doit être compris entre 0,7 et 160 et le nombre de Reynolds doit être supérieur à

10000. Enfin le coefficient de transfert de chaleur par convection s'obtient de la manière suivante :

$$Nu = \frac{h^* d_h}{k} \quad (2.20)$$

Ainsi on obtient le coefficient d'échange par convection le long d'une paroi. Ce qui est nécessaire pour obtenir le coefficient d'échange par convection entre les fumées et les tubes d'eau. Selon la forme des échangeurs (échangeur à tube, flux croisé, flux parallèle) la méthode présentée n'est plus valable. Les corrélations pour la détermination du nombre de Nusselt sont disponibles pour la plupart des géométries.

On présente par la suite, une méthode de calcul pour un surchauffeur de vapeur (figure 2.8) de type tubulaire à flux croisé mais non mélangé. Pour déterminer les températures de sorties de deux fluides, il faut déterminer les coefficients de transfert de chaleur respectif pour chaque fluide. Dans un premier temps, le fluide passant à l'intérieur du surchauffeur bénéficie de la même analyse présentée à la section 2.4.2.1.

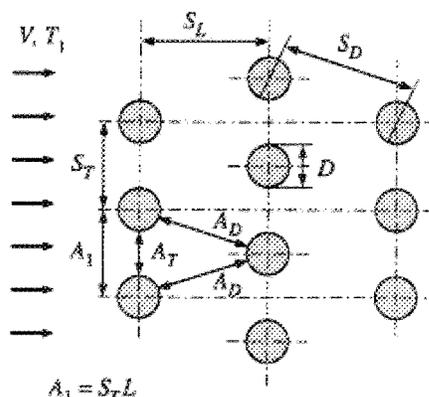


Figure 2.8 : Disposition des tubes pour un surchauffeur [4]

On détermine la vitesse maximale des gaz de combustion traversant l'échangeur :

$$V_{\max} = \frac{St}{2(Sd - d)} * V \quad (2.21)$$

avec (St) distance horizontale et (Sd) distance verticale. Ensuite, on peut calculer le nombre de Reynolds avec l'équation 2.18. La corrélation pour la détermination du nombre de Nusselt dépend du nombre de séries de tubes, si les séries de tubes sont en quinconces ou alignées et si le nombre de Prandtl est compris entre 0,7 et 500.

$$Nu = C * Re^m * Pr^n * \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25} \quad (2.22)$$

Les coefficients de l'équation sont donnés pour une valeur du nombre de Reynolds et sont présentées en annexe 4.

2.4.3 CONDUCTION DANS LES GÉNÉRATEURS DE VAPEUR

La conduction dans un générateur est présente mais n'est pas dominante. Afin d'accroître la précision des calculs, le calcul de la conduction dans la chambre de combustion est nécessaire dû à la présence de réfractaire. Le réfractaire est un bon isolant, il est couramment utilisé pour la protection des tubes proches des flammes. De plus, les pertes de chaleur d'une chaudière dépendent directement de l'épaisseur d'isolation (conduction). On trouve des tables qui permettent d'évaluer directement un pourcentage de la puissance totale perdue (annexe 5). La distribution du flux au travers des tubes et du réfractaire est équivalent à deux murs superposés ce qui correspond à deux épaisseurs et deux conductivités différentes, représenté à la figure 2.9.

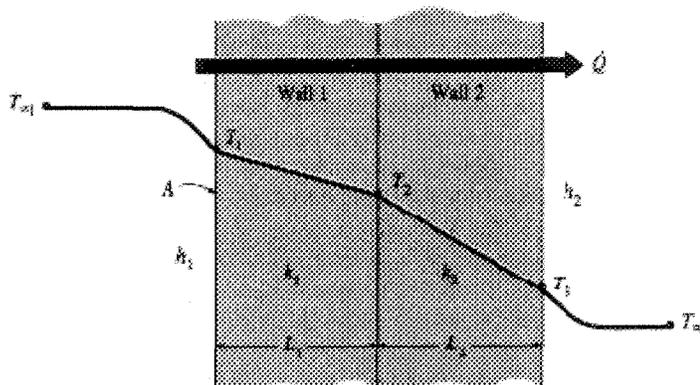


Figure 2.9 : Distribution de la température avec flux constant [4]

La conduction au travers des tubes ne représente qu'une toute petite partie de l'échange total. Si on met en équation la résistance totale au travers des tubes (figure 2.9), on obtient :

$$R = \frac{1}{h_e} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_i} \quad (2.23)$$

Le coefficient convectif pour un changement de phase est de l'ordre de $10000 \text{ W/m}^2\text{K}$ [4], la résistance thermique côté changement de phase est donc négligeable dans l'équation 2.23. De plus, le terme de la résistance thermique totale représentant la conduction est lui aussi très petit car la paroi du tube est mince. Il ne reste que le terme de résistance thermique représentant la convection des fumées de combustion sur les tubes qui possède une importance prépondérante sur les deux autres. Une approche rigoureuse utilise tout de même la résistance thermique totale.

2.4.4 BILAN GLOBAL DANS UN GÉNÉRATEUR DE VAPEUR

Un bilan d'énergie pour un générateur de vapeur peut être représenté de la manière suivante (Figure 2.10), d'un côté le système eau/vapeur échange avec le système air/combustible de l'autre côté.

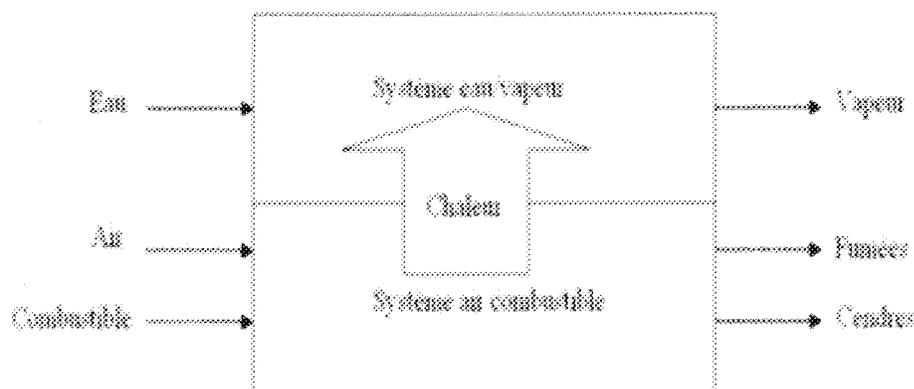


Figure 2.10 : Bilan d'énergie d'un générateur de vapeur

Le bilan d'énergie a plusieurs utilités. Il permet la détermination du rendement s'il n'existe pas d'inconnue. Pendant la conception d'un générateur de vapeur, le bilan d'énergie permet l'expression des inconnues sous formes d'équations simples faisant appel aux connaissances de thermodynamique.

$$PCI * m_{comb} = h_{total} * A * \Delta T + Pertes \quad (2.24)$$

L'équation 2.24 montre une manière simple de vérifier les performances d'un générateur de vapeur après la détermination du coefficient d'échange total (rayonnement, convection et conduction). Le coefficient d'échange total h_g s'exprime de la manière suivante :

$$h_g = \frac{1}{Ah_e} + R_{wall} + A(h_g + h_r) \quad (2.25)$$

Dans l'équation 2.25, on utilise la surface en contact avec les gaz de combustion.

Ensuite, le calcul du rendement peut se faire de la manière suivante :

$$\eta = \frac{m_g * \Delta h_g}{PCI * m_{comb}} \quad (2.26)$$

Ici l'équation 2.26 calcule le rendement d'un générateur de vapeur n'utilisant pas de turbine électrique mais seulement de la production de vapeur.

2.5 NOTIONS DE BASE DES MÉCANISMES DE LA COMBUSTION ET ÉLÉMENTS DE CALCUL DES DIFFÉRENTS CARBURANTS (SOLIDE, LIQUIDE, GAZ)

Les chaudières permettent aujourd'hui, selon leurs types, de brûler n'importe quelle source de combustible (gaz, huile, charbon, biomasse...). Le document présentera un rappel sur la théorie de la combustion.

2.5.1 THÉORIE DE LA COMBUSTION

La combustion est une réaction chimique rapide d'un carburant avec un comburant (air) appelé réactif et donnant suite à des fumées appelées produits de la réaction. Une combustion se matérialise par une flamme, fort dégagement de chaleur (lumière), et est une réaction exothermique.

La chaleur de réaction provient de la séparation des liens chimiques (liens de covalence). Les réactifs ont des liens à plus forte teneur en énergie et les liens chimiques des produits de la réaction sont plus faible ; la différence correspond au gain de chaleur. La chaleur dégagée par la combinaison d'une mole de carbone avec 2 moles d'oxygène est de 95,3kcal (équation 2.27) et a été obtenu par expérience (bombe calorimétrique). Cette

réaction n'existe pas sans un apport de chaleur extérieur, afin d'amorcer la réaction.

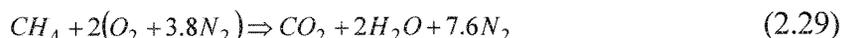


Une condition importante à cette réaction est le mélange de l'air et du combustible. Pour une combustion typique d'un gaz, la combustion prend place dans une seule phase gazeuse (combustion homogène) dû au mélange homogène de l'air et du combustible. Par contre, la combustion d'un liquide manifeste deux types de mélange avec le comburant. Dans un premier temps, le dégagement de chaleur dû à la combustion évapore la surface d'une gouttelette de combustible (mélange homogène), et dans un deuxième temps la surface de la gouttelette représente la frontière entre le combustible et l'air (mélange hétérogène). Dans le cas des combustibles solides, la combustion se réalise sur la surface des particules, le dégagement de chaleur évapore les composés organiques volatiles (C_xH_y) (mélange homogène), ensuite la combustion se réalise à la surface de la matrice de carbone restante et rend le mélange avec l'air plus difficile (combustion hétérogène). Il est important de comprendre que la qualité d'une combustion est directement liée au mélange des réactifs. Une combustion se fait majoritairement dans la phase gazeuse quel que soit le combustible. La quantité d'air nécessaire pour assurer la combustion se détermine facilement avec l'équation de réaction. Par exemple le méthane (CH_4) :

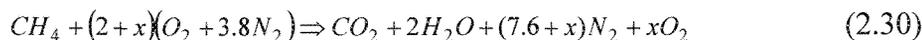


Une mole de méthane réagit avec deux moles d'oxygène et produit une mole de dioxyde de carbone et deux moles de vapeur d'eau. Les masses molaires des réactifs se trouvent dans les tables; ainsi on connaît les rapports massiques carburant/comburant. Une réaction de combustion prend généralement place dans l'air qui est composé d'environ 21% d'oxygène

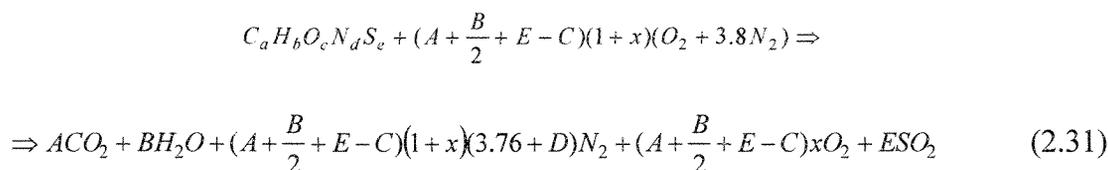
et 79% d'azote. On peut ainsi dire qu'il y a 3,8 fois plus d'azote que d'oxygène. L'azote est un gaz inerte et ne réagit pas, il ne fournit aucune chaleur. Ainsi l'équation de réaction du méthane dans l'air devient :



L'équation 2.29 est une réaction de combustion stœchiométrique. Le mélange de l'air et du méthane n'est pas parfait car en réalité chaque molécule de méthane et d'air ne sont pas en présence l'une de l'autre à chaque instant. C'est ainsi que des réactions incomplètes prennent naissance, plus connues sous le nom d'imbrûlés (oxyde de carbone) dans le cas d'une réaction de combustion. Afin d'assurer une combustion complète, on ajoutera un excès d'air. Ainsi on obtient pour le méthane :



Dans l'équation 2.30 l'excès d'air est un coefficient entre 0 et 1. La réaction de combustion du méthane est un cas simple. Un carburant est généralement composé de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et de soufre. À des fins plus pratiques et à partir d'une analyse élémentaire d'un carburant on peut écrire d'une manière générale la réaction suivante :



L'équation 2.31 permet de déterminer la quantité d'air (avec excès) nécessaire pour la combustion de n'importe quel carburant. On exprimera la quantité d'air en Nm^3 d'air/kg (ou Nm^3 si gazeux) de carburant. Le normal mètre cube (Nm^3) étant un mètre cube du gaz

aux conditions normales soit 0°C et 1 bar. De plus, l'équation 2.31 donne la quantité de fumée produite.

2.5.2 POUVOIR CALORIFIQUE

Une réaction de combustion est aussi caractérisée par son enthalpie de réaction. L'enthalpie de réaction ou pouvoir calorifique est la différence d'enthalpie entre les produits (r_p) et les réactifs (r_r) (équation 2.32) lorsqu'une combustion se produit à température et pression constante (souvent les conditions standards, 1atm et 15°C), ainsi :

$$\Delta r_{rp} = r_p - r_r \quad (2.32)$$

L'unité habituellement utilisée pour exprimer le pouvoir calorifique de combustion est le kilojoule par kilogramme (ou par kilomole) de combustible.

Lorsqu'un combustible contient de l'hydrogène, il se forme de l'eau par réaction avec l'oxygène (équation 2.28). On définit alors deux paramètres qui sont le pouvoir calorifique inférieur (*PCI*) et le pouvoir calorifique supérieur (*PCS*). Le pouvoir calorifique inférieur correspond à la variation d'enthalpie pour un état final où les produits de combustion sont à l'état gazeux. Le pouvoir calorifique supérieur correspond à un état final où la vapeur d'eau produite est condensée (liquide). La relation entre ces deux grandeurs peut s'écrire de la façon suivante :

$$PCS = PCI + h_{lg} \quad (2.33)$$

avec (h_{lg}) la différence d'enthalpie du changement de phase liquide-vapeur à sa pression de saturation. Dans le cas de la combustion, les fumées sont à la pression atmosphérique et l'enthalpie du changement de phase liquide-vapeur est prise à la pression partielle de

saturation (température des fumées). On remarque (équation 2.33) que le pouvoir calorifique supérieur est toujours plus grand que le pouvoir calorifique inférieur, car la condensation de la vapeur d'eau permet de récupérer une quantité de chaleur plus importante que le refroidissement des fumées (processus endothermique). Dans le cas des chaudières à vapeur, il existe des systèmes de combustion où les fumées sont condensées au travers d'un échangeur de chaleur afin de réchauffer l'eau d'alimentation. Ce type de chaudière n'est pas courante car la condensation de fumées contenant du soufre donne naissance à de l'acide sulfurique et endommage rapidement les échangeurs.

L'utilisation du pouvoir calorifique est simple et permet une approche très rapide pour la résolution de problématique de conception (équation 2.24 et équation 2.26). La puissance nécessaire pour évaporer un débit de vapeur est la première caractéristique d'un générateur de vapeur et il se calcule facilement avec le pouvoir calorifique. On trouve dans la littérature les pouvoirs calorifiques de la plupart des carburants. Les résidus forestiers contiennent le plus souvent un fort taux d'humidité (30 à 60%). Du point de vue de la combustion, cela représente une quantité d'eau liquide à évaporer avant de commencer le processus de combustion, donc une quantité de chaleur à fournir. Ce qui se résume par une diminution du pouvoir calorifique.

2.6 MÉTHODE DE COMBUSTION DES CARBURANTS SOLIDES:DESCRIPTION DES DIFFÉRENTES CONCEPTIONS

La combustion des combustibles solides représente un défi. En effet, les systèmes d'introduction, de combustion et de récupération des cendres doivent permettre une exploitation continue. Cette section traitera des différents systèmes de combustion et aura pour but de définir les avantages et inconvénients des systèmes présentés.

2.6.1 SYSTÈMES DE COMBUSTION À GRILLE

Dans les applications typiques, les combustibles solides sont brûlés sur des grilles fixes ou mobiles (figure 2.11).

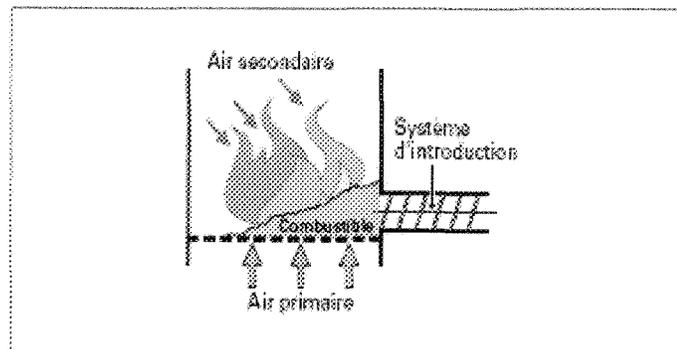


Figure 2.11 : Schéma de principe de foyer à grille fixe [6]

Ces grilles de combustion ne permettent pas un bon mélange de l'air avec le combustible, car ce dernier est déposé en amas.

2.6.1.1 SYSTÈMES DE COMBUSTION À GRILLES FIXE (INCLINÉES ET À PLAT)

La figure 2.11 montre une application courante de grille fixe à plat où le combustible est déposé en amas. Dans la section 2.5.2 réservée à la théorie de la

combustion, l'accent est mis sur le mélange du combustible avec l'air afin d'assurer une réaction complète et rapide. De plus, un bon mélange (carburant/comburant) diminue la formation de polluants et augmente le rendement de combustion. La figure 2.11 montre que le combustible forme un amas sur la grille. L'air nécessaire à la combustion est envoyé par-dessous, le mélange est imparfait et la combustion est hétérogène. La combustion prend place dans des cheminées qui sont des zones aléatoires où la réaction de combustion commence. Les cendres sont ramassées en dessous mais la formation d'agglomérats de cendre et de silices contenues dans le combustible ont tendance à obstruer leurs récupérations. On retrouve aussi les systèmes de combustion à grille fixe inclinée (figure 2.12). L'avantage de ces dernières est la récupération des cendres qui, par gravité, pourront être récupérées au point le plus bas et par ce fait l'obstruction du système de récupération des cendres est évitée. Une importante différence entre les grilles fixes à plat et inclinées est l'amélioration du rendement de combustion. En effet, le combustible a tendance à s'étaler sur la grille inclinée par gravité mais il y a encore l'existence d'un amas de combustible. De ce fait, le mélange air/combustible est légèrement amélioré et la quantité d'imbrûlés aussi.

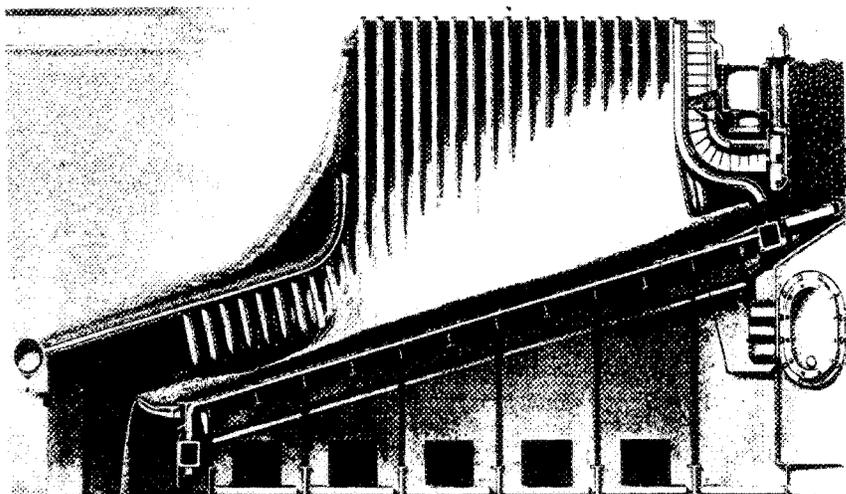


Figure 2.12 : Système de combustion à grille fixe inclinée [3]

L'avantage des grilles inclinées pour la combustion des combustibles solides réside dans la simplicité de mise en œuvre (conception, contrôle). Le désavantage majeur est leur faible efficacité (rendement de combustion) et leurs maintenances excessives engendrant des coûts supplémentaires.

2.6.1.2 SYSTÈMES DE COMBUSTION À GRILLES ROTATIVE OU VIBRANTE

Les systèmes de combustion à grilles rotatives ou vibrante sont les plus utilisés dans les chaudières à combustibles solides de nos jours. En effet, ce type de système permet une combustion plus efficace. L'épaisseur de tas de combustible est diminuée car il est entraîné par l'avancement de la grille (figure 2.13).

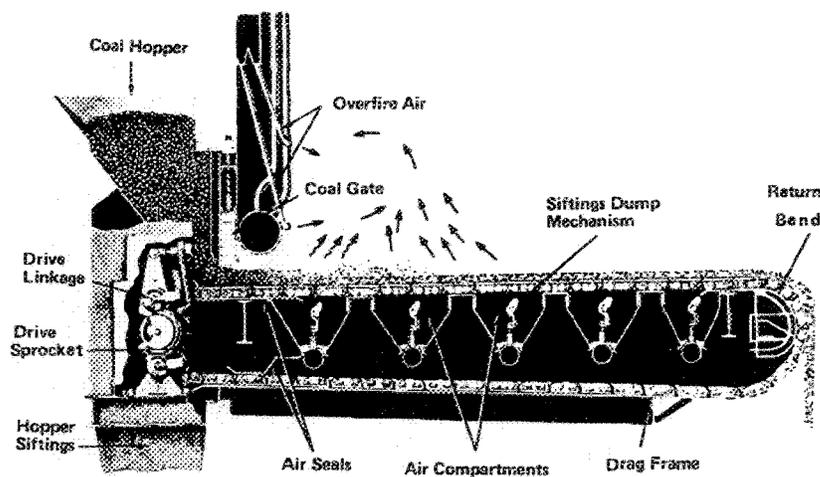


Figure 2.13 : Système de combustion à grille rotative [3]

La figure 2.13 montre un système de combustion à grille rotative, il existe aussi des grilles rotatives inclinées mais leurs avantages et inconvénients sont très similaires. Le principal avantage de ce type de système est la diminution du tas de combustible dans la chambre de combustion et ainsi l'augmentation du rendement de combustion. Le désavantage majeur est l'entretien d'un tel système. En effet, une grille rotative nécessite un système d'entraînement mécanique. Encore une fois la présence d'agglomérats de cendre et de silice a tendance à briser le système d'entraînement. Les systèmes de combustion à grilles vibrantes sont la solution à ce problème. Les grilles vibrantes ont l'avantage des grilles rotatives en permettant la diminution du tas de combustible accumulé dans la chambre de combustion et ainsi l'augmentation du rendement de combustion. De plus les grilles vibrantes de par leurs principes ne sont plus endommagées par la présence d'agglomérats. Le désavantage de ce type de grille reste la prédisposition au bris mécanique du système de vibration de la grille.

Il existe un problème commun à tous les systèmes de combustion à grille. Les matériaux utilisés pour réaliser les grilles sont dans la majorité des cas de l'acier ou alliage similaire. Le point de fusion se situe donc autour de 1400°C. La température adiabatique de flamme se situe autour de 1200°C. L'apparition de points chauds sur une grille de combustion peut donc approcher sa température de fusion et provoquer la déformation de celle-ci donc un entretien et des coûts supplémentaires. Il existe un système de combustion qui rassemble tous les avantages des systèmes présentés plus haut sans les désavantages, les lits fluidisés.

2.6.2 SYSTÈMES DE COMBUSTION À LIT FLUIDISÉ

Les systèmes de combustion à lit fluidisé sont moins répandus que les systèmes de combustion à grille car la conception requiert la compréhension d'un autre phénomène que la combustion, la fluidisation. Il faut alors réaliser des séries de calculs propres à la fluidisation qui ne sont pas nécessaires dans le cas d'un système de combustion à grille. La combustion en lit fluidisé existe depuis une vingtaine d'années, mais la fluidisation, utilisée dans plusieurs autres procédés, existe depuis plus longtemps. La fluidisation est un processus par lequel un matériau granulaire est traversé par un fluide, soit pour réaliser un échange, soit pour donner les caractéristiques d'un fluide au matériau granulaire. Ceci facilite le mélange intime air-combustible et, de cette façon, on obtient une meilleure combustion. La chaleur dégagée lors de la combustion est cédée au matériau granulaire donne une inertie thermique à la chambre de combustion.

Il existe principalement deux systèmes de combustion en lit fluidisé, la combustion en lit circulant et bouillonnant.

2.6.2.1 COMBUSTION EN LIT CIRCULANT

La combustion en lit fluidisé circulant (figure 2.14) est devenue populaire spécialement dans la production d'électricité (centrale thermique) pour son efficacité. Cette technologie est entrée sur le marché dans les années 1980. Les CFB (*circulating fluidized bed*) ont déjà fait leurs preuves, il existe une centaine d'unités de 1MW (électrique) allant jusqu'à 340MW (électrique) depuis 2005. Les problèmes des premières générations ont déjà été résolus et les CFB sont aujourd'hui considérés comme étant une technologie mature.

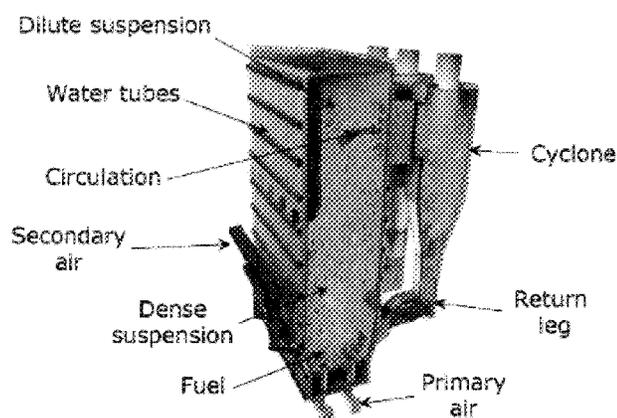


Figure 2.14 : Lit fluidisé circulant [2]

La figure 2.14 montre une chaudière fonctionnant avec un système de combustion à lit circulant. Le combustible est mélangé avec des particules très fines, généralement du sable et fonctionne avec des vitesses d'air très élevées (5 à 10m/s). L'efficacité élevée de combustion est due au très bon mélange air/combustible. La combustion prend place dans tout le foyer. En effet, le combustible (en cours de réaction de combustion) et le matériau granulaire (à 900°C) parcourt toute la hauteur de la chambre de combustion, passe dans un

cyclone généralement placé à la sortie du foyer et ils sont réinjectés à la base du foyer d'où leurs appellations lit fluidisé circulant. Le haut taux de transfert de chaleur est principalement le résultat de la turbulence dans le foyer. En effet, les particules de sable en circulation sont en contact avec les parois de tubes et augmentent l'échange de chaleur. L'existence de deux chambres de combustion (retour des particules) nécessite un système de filtration des particules efficaces au risque de voir des particules et des résidus s'envoler dans la cheminée (imbrûlés). Le combustible doit être traité avant d'entrer dans la chambre de combustion (0,1 à 40mm) afin de permettre sa fluidisation.

2.6.2.2 COMBUSTION EN LIT FLUIDISÉ BOUILLONNANT

Les chaudières à lit fluidisé bouillonnant (figure 2.15) sont sûrement les applications à lits fluidisés les plus répandues. Plus de 10 000 chaudières à BFB (*bubbling fluidised bed*) sont utilisées dans le monde. Elles ont remplacé la traditionnelle chaudière à grille rotative. Le développement des BFB est entré dans le domaine de la génération de vapeur dans les années 1960. Une chaudière à BFB typique nécessite un foyer et une zone d'échange convectif comme la plupart des chaudières. Le foyer est fait d'un lit de particules non combustibles.

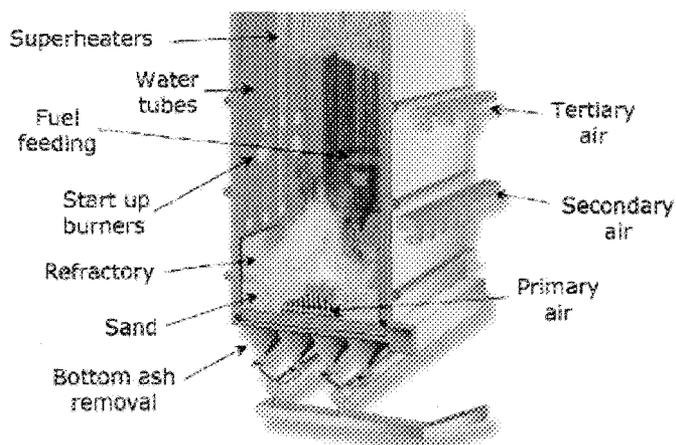


Figure 2.15 : Lit fluidisé bouillonnant [2]

La figure 2.15 montre une application typique d'une chaudière à lit fluidisé bouillonnant (BFB). L'intérêt d'un tel type de système de combustion débute avec la volonté d'augmenter le rendement de combustion. Au même titre que les lits fluidisés circulants, le mélange air/combustible est amélioré. L'avantage de cette application provient de la facilité d'entretien du foyer (changement du sable), de la souplesse d'utilisation (combustible immédiatement brûlé) et de la large gamme de combustible pouvant être utilisé (humidité et provenance). L'humidité du combustible peut varier de 40% à 60% et la stabilité de la combustion n'est pas altérée. En contre partie, la conception est plus complexe qu'un système de combustion classique (grille) car la compréhension du phénomène de fluidisation requiert une analyse approfondie. Un chapitre de ce mémoire est entièrement dédié à la fluidisation. Ce type de système de combustion est adéquat pour la combustion des matières solides telles que les résidus forestiers. En effet, les caractéristiques des résidus forestiers conviennent très bien à ce type système (humidité, variation de pouvoir calorifique...).

2.6.3 SYSTÈME D'ALIMENTATION DES COMBUSTIBLES SOLIDES DANS LE FOYER

Le système d'alimentation du combustible est une fonction importante dans les différents systèmes de combustion. D'une part, le système d'acheminement des combustibles solides jusqu'au foyer requiert une attention particulière. Par exemple les résidus ont tendance à bloquer les systèmes d'alimentation principalement à cause de leurs formes (taille) et de leur humidité. D'autre part, le système d'introduction diffère principalement en deux catégories : les combustibles solides pulvérisables et non pulvérisables.

2.6.3.1 COMBUSTIBLES SOLIDES PULVÉRISABLES

Les combustibles pulvérisables sont le plus souvent des charbons (tous types) broyés en fines particules. Ils sont alors transportés pneumatiquement dans des conduites. L'air utilisé pour le transport est souvent une partie de l'air nécessaire pour la combustion. La combustion ressemble à la combustion d'une huile (homogène - hétérogène). Une application typique est montrée à la figure 2.16.

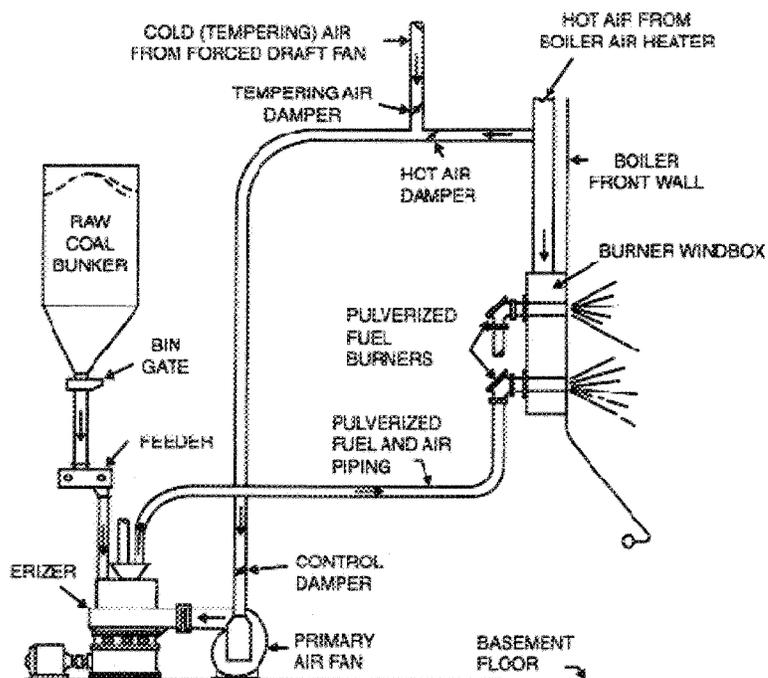


Figure 2.16 : Alimentation par transport pneumatique [8]

La figure 2.16 montre un système complet du stockage jusqu'à la chambre de combustion. On met en évidence le système de combustion qui ressemble à un brûleur typique d'huile ou de gaz. Ce type de système d'alimentation est mis en place pour des grosses unités car il est complexe à mettre en œuvre et demande un entretien soutenu. On retrouve aussi des systèmes d'alimentation connus sous le nom de gicleurs (figure 2.17).

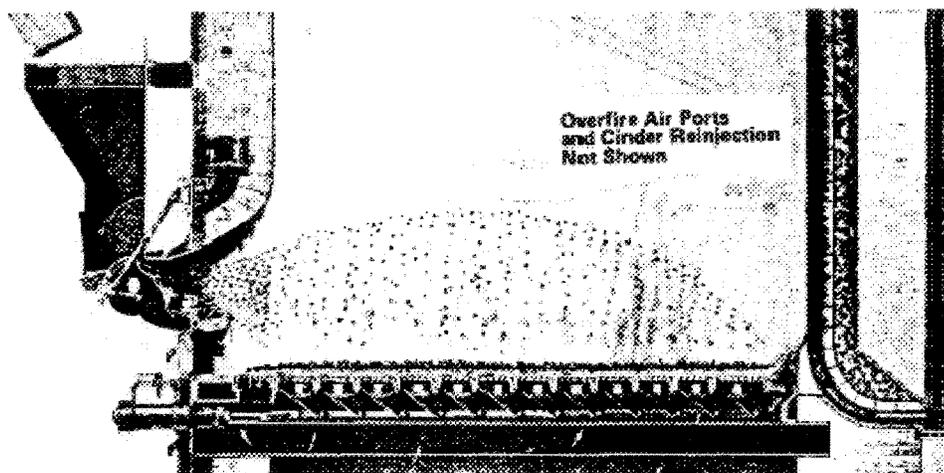


Figure 2.17 : Alimentation de type gicleur [3]

La figure 2.17 montre un système d'alimentation de type gicleur. Ce type d'alimentation est souvent utilisé pour des charbons. Dans ce cas, il nécessite un traitement du charbon moins rigoureux avant l'entrée dans la chambre de combustion. Le charbon se retrouve projeté sur toute la surface de la chambre de combustion ce qui évite l'apparition d'amas dans le foyer. Le principal inconvénient d'un tel système réside dans l'entretien des nombreuses pièces mécaniques en rotation.

2.6.3.2 COMBUSTIBLES SOLIDES NON PULVÉRISABLES

Les combustibles solides non pulvérisables représentent les biomasses, déchets (urbain) et tous les combustibles dont l'intérêt pour la combustion ne permet pas un traitement de celui-ci (broyage...). Il faut retenir que ce type de combustible présente deux difficultés majeures. La première difficulté concerne la variation de la qualité de ce dernier. La provenance, le stockage et le transport sont des caractéristiques variables. La provenance du combustible ainsi que le stockage du combustible (intérieur ou extérieur)

fait varier ses caractéristiques chimiques (humidité, analyse élémentaire...). Le système d'introduction dans le foyer le plus usuel est la vis sans fin. En effet, ce type de système permet un transport régulier avec un risque de blocage faible. On retrouve plusieurs types de vis sans fin destinées à cet usage. La vis sans fin à pas et diamètres variables (figure 2.18) permettant de réduire le risque de blocage et la double vis sans fin (figure 2.19) permettant le transport de combustible très léger (paille).

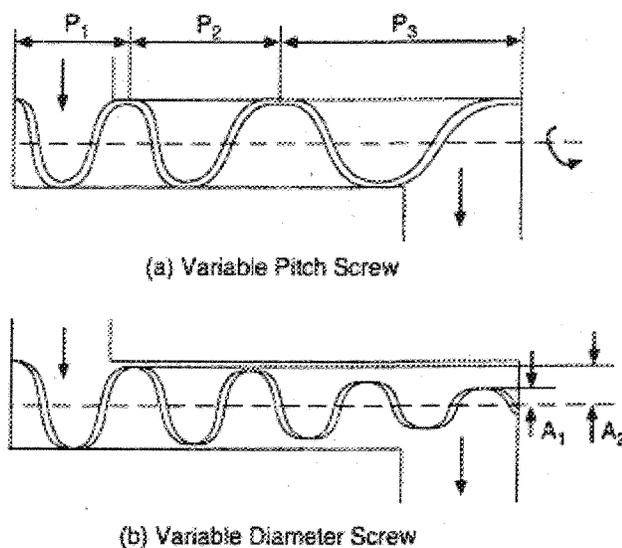


Figure 2.18 : Deux types de vis sans fin (a) pas variable, (b) diamètre variable [9]

La figure 2.18 montre deux configurations de vis sans fin. La vis sans fin à pas variable (a) et la vis sans fin à diamètre variable (b).

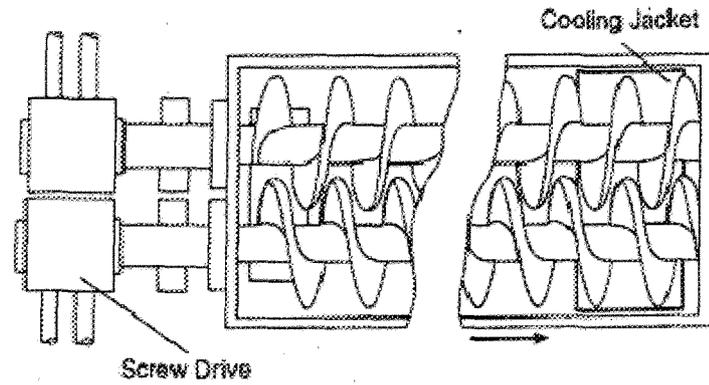


Figure 2.19 : Double vis sans fin [9]

La figure 2.19 montre une double vis sans fin permettant la compression du combustible entre les deux vis et facilitant son transport.

CHAPITRE 3

COMBUSTION EN LIT FLUIDISÉ ET CONTRÔLE

La combustion en lit fluidisé existe depuis une vingtaine d'années, mais la fluidisation, utilisée dans plusieurs autres procédés, existe depuis plus longtemps. C'est en 1940, après le lancement des premiers réacteurs de craquage catalytique, que cette technique a pris son véritable essor. Un des premiers scientifiques à avoir étudié le phénomène de la fluidisation dans les détails est *D.Geldart*, avec l'article *Large particle fluidisation* [7]. Leur utilisation dans le domaine de la combustion, de la gazéification et de l'incinération de déchets a fortement augmenté et le nombre de réalisations d'unités industrielles s'accroît régulièrement. Il est bien entendu impossible de décrire de manière approfondie les différents domaines techniques et scientifiques liés aux lits fluidisés, mais de nombreux livres sont disponibles [8, 9, 13, 22]. De plus, des conférences internationales sont régulièrement organisées, on peut citer par exemple le congrès biennuel par l'ASME.

La fluidisation est un processus par lequel un matériau granulaire est traversé par un fluide, soit pour réaliser un échange, soit pour donner les caractéristiques d'un fluide au matériau granulaire. Dans le cas d'une combustion en lit fluidisé, le but est de répartir le

combustible solide à la surface du lit. Ceci facilite le mélange intime air combustible et, de cette façon, on obtient une meilleure combustion. Les mécanismes principaux de la fluidisation comme l'hydrodynamique et les échanges de chaleurs sont bien définis dans la littérature scientifique. Dans ce chapitre, les méthodes pour la conception d'une grille de fluidisation dans une application de combustion sont détaillées. Ensuite une revue exhaustive des méthodes de contrôle de ce type de système de combustion dans un générateur de vapeur est faite.

3.1 PRINCIPES DE LA FLUIDISATION

Dans le chapitre précédent, les rudiments de la fluidisation ont été présentés afin d'introduire la combustion en lit fluidisé. La fluidisation est un phénomène complexe régit par les lois de l'hydrodynamique qui est approfondi dans la suite. De plus, le transfert de chaleur dans un lit fluidisé est un mélange complexe d'échanges qui joue un rôle important dans la conception des grilles de fluidisation.

3.1.1 HYDRODYNAMIQUE

Il existe plusieurs types de fluidisation, classés selon leur régime. Le régime dépendra principalement de la vitesse du fluide traversant le matériau granulaire et de la taille des particules. Le diagramme de *Reh* [8] exposé dans la figure 3.1 présente un graphique avec une abscisse qui correspond à la taille des particules et une ordonnée qui correspond à la vitesse de fluidisation. Il montre l'importance du diamètre des particules et de la vitesse de l'air sur le régime de fluidisation.

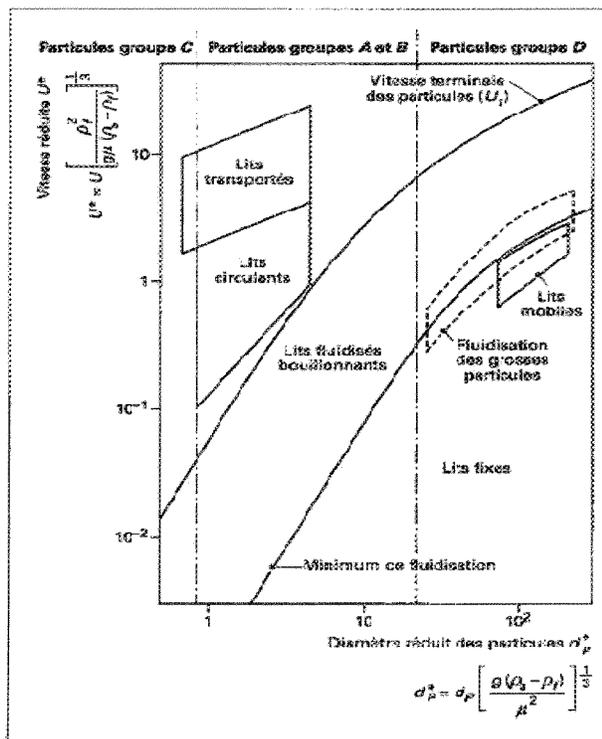


Figure 3.1 : Diagramme de Reh [8]

On retrouve dans ce graphique tous les types de fluidisation. Les plus utilisés sont les lits fluidisés de type bouillonnant et de type circulant. Ils ont tous deux leur application spécifique dans le domaine de la combustion.

La vitesse de fluidisation est une fonction de la taille des particules. Dans le cas où le matériau granulaire utilisé n'a pas un même diamètre, il faut imposer une granulométrie et définir la limite maximale et minimale (diamètre) ainsi que leurs quantités. Dans le cas contraire, les vitesses de fluidisations seront très différentes, certaines particules ne bougeront pas (vitesse trop faible) et d'autres seront emportés avec l'air (vitesse trop élevée).

Dans le système évalué, le matériau granulaire retenu est le sable, car il est facile à trouver et on obtient des granulométries assez précises : la combustion de biomasse est réalisée sur un lit de sable de type bouillonnant.

3.1.1.1 FLUIDISATION D'UNE PARTICULE

La fluidisation est un phénomène complexe qui repose sur un principe très simple. Ce qui nous intéresse, c'est la mise en suspension d'une particule solide (figure 3.2).

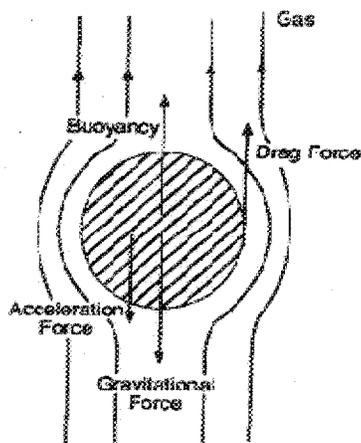


Figure 3.2 : Équilibre d'une particule [9]

Si nous appliquons un bilan de force à cette particule en suspension (figure 3.2), nous constatons que trois forces s'appliquent : son poids P , la poussée d'Archimède F_A et une force d'entraînement vers le haut due au gaz que nous appellerons force de traînée F_D . Nous avons pour une particule de masse M_p :

$$P - F_A - F_D = M_p * a \quad (3.1)$$

a étant l'accélération de la particule. Le poids (P) et la poussée d'Archimède (F_A) sont faciles à calculer, la force de traînée (F_D) est calculée à l'aide d'un coefficient de traînée C_d . L'accélération existe seulement pendant l'établissement du régime de fluidisation. Si la particule est en équilibre, on obtient alors :

$$P - F_A - F_D = 0 \quad (3.2)$$

Si l'on remplace chaque force par son expression, l'équation 3.2 devient :

$$\frac{\pi d^3}{6}(\rho_p - \rho_g)g - C_d \left(\frac{1}{2}U_t^2\right) \frac{\pi d^2}{4} = 0 \quad (3.3)$$

U_t représente la vitesse terminal de la particule, la densité de la particule, la densité du gaz ainsi que le diamètre de particule sont présent dans l'équation 3.3.

Cette équation est en général présentée sous une autre forme puisque nous pouvons faire apparaître le groupe $C_d U_t^2$:

$$C_d U_t^2 = \frac{4(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g}gd \quad (3.4)$$

Plutôt que U_t , nous pouvons faire apparaître le nombre de Reynolds ainsi que le nombre d'Archimède, ce qui donne :

$$C_d \text{Re}^2 = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\mu^2} \right) g \rho_g d^3 = \frac{4}{3} Ar \quad (3.5)$$

Le nombre d'Archimède est donc le nombre de base pour caractériser la fluidisation d'une particule, il suffit de remplacer C_d par son expression pour obtenir une équation permettant le calcul du nombre de Reynolds et par conséquent obtenir la vitesse terminale de la particule. Reh [8] a utilisé ce lien entre coefficient de traînée et nombre de Reynolds pour caractériser les différents régimes de fluidisation. La figure 3.1 permet de prévoir le régime de fluidisation en fonction des particules et des conditions hydrodynamiques.

3.1.1.2 CLASSIFICATION DES POUDRES

Dans le paragraphe précédent, on constate que deux paramètres influencent la fluidisation soit la densité du gaz et le diamètre de la particule, ce qui a conduit Geldart [6] à concevoir une classification des solides (figure 3.3).

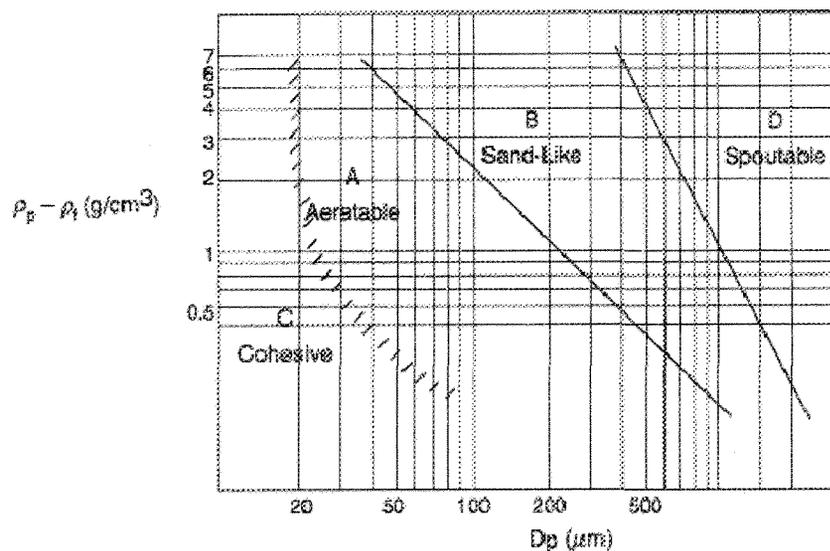


Figure 3.3 : Classification des poudres selon Geldart [6]

La classification des solides regroupe quatre catégories. La catégorie A représente les poudres fines (diamètre $< 150\mu\text{m}$) et légères faciles à fluidiser. Dans cette catégorie, on observe le passage à la fluidisation sans qu'il y ait apparition de bulles de gaz. Dans d'autres cas, l'apparition des bulles coïncide avec la mise en fluidisation c'est le cas des particules du groupe B. Le diamètre est inférieur à $800\mu\text{m}$ et la densité comprise entre 2 et 4g/cm^3 . C'est le cas du sable par exemple. Les particules de très petite taille, ou pour lesquelles les forces inter partuculaires sont importantes ne conduisent pas à la formation de bulles. On observe plutôt l'apparition de canaux dans le lit de solide permettant le passage du gaz. Ce sont des poudres du groupe C. Enfin, les grosses particules difficiles à fluidiser font partie du groupe D.

3.1.1.3 PERTES DE CHARGES ET VITESSE CRITIQUE

On remarque que la vitesse de fluidisation est un paramètre de base mais son évaluation demeure difficile. De nombreuses corrélations sont basées sur la mesure de la perte de charge dans le lit de solide. Cette variation de pression augmente linéairement avec la vitesse du gaz U_g . En régime laminaire la perte de charge est donnée par l'équation de Carman-Kozény :

$$\frac{-\Delta p}{H} = K \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu U_g^2 \left(\frac{A}{V} \right)^2 \quad (3.6)$$

K étant une constante qui dépend de la nature du lit de solide (taille et forme des particules, etc), il est courant de prendre $K=5$. ε est la porosité du lit et le terme (A/V) représente le rapport de surface sur le volume des particules ($S=6/d$ pour des sphères) et H la hauteur du lit de particule ce qui permet d'obtenir la forme courante de cette équation :

$$\frac{-\Delta p}{H} = 180 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_g}{d^2} \quad (3.7)$$

Dans le cas d'un régime turbulent l'équation 3.7 prend une autre forme. En utilisant les résultats de nombreuses expériences, Ergun a développé une équation générale qui inclut une composante laminaire et une composante turbulente [11] :

$$\frac{-\Delta P}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_g}{d^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U_g^2}{d} \quad (3.8)$$

Lorsque que l'on augmente la vitesse du gaz, la perte de charge passe par un maximum correspondant à la vitesse minimale de fluidisation U_{mf} avant de se stabiliser. Lorsque la vitesse du gaz devient très importante, on passe en régime d'entraînement pneumatique et les pertes de charges évoluent légèrement. Lorsqu'on est en régime de fluidisation, la perte

de charge dans le lit correspond au poids des particules moins la force d'Archimède divisée par la section du lit. Le volume occupé par le solide étant $HA(1-\varepsilon)$, nous avons donc :

$$-\Delta P = \frac{HA(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_g)g}{A} \quad (3.9)$$

Il est donc possible de déterminer la vitesse minimale de fluidisation en égalisant les pertes de charges dans un lit fixe avec cette relation, ce qui conduit à :

$$(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_g)g = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_g}{d^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U_g^2}{d} \quad (3.10)$$

Cette équation peut être réarrangée pour faire apparaître le nombre d'Archimède et le nombre de Reynolds :

$$Ar = 150 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} Re_{mf} + 1.75 \frac{1}{\varepsilon^3} Re_{mf}^2 \quad (3.11)$$

De nombreux auteurs ont donc cherché à corréler leurs résultats avec une loi semi empirique de ce type. On peut citer la loi de Wen et Yu (1966) [12] :

$$U_{mf} = \frac{\left[(C1^2 + C2 * Ar)^{0.5} - C1 \right] * \mu}{dp * \rho_g} \quad (3.12)$$

Il existe plusieurs valeurs de $C1$ et $C2$ disponible dans la littérature, on utilise le plus couramment 27,2 et 0,0408 respectivement.

On retrouve plusieurs vitesses critiques pour chaque type de régimes de fluidisation. Le régime de type bouillonnant est défini par les quatre vitesses critiques exposées dans la figure 3.4.

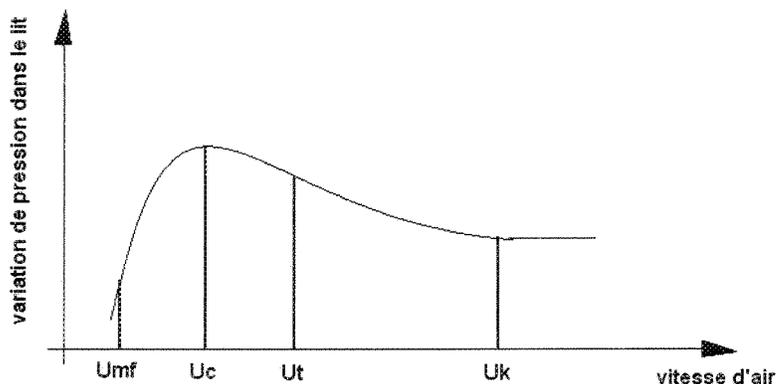


Figure 3.4: Vitesse de fluidisation [13]

Sur la figure 3.4 et 3.5 on définit la vitesse minimum de fluidisation U_{mf} , celle-ci étant la vitesse d'air minimum à atteindre pour mettre le lit en mouvement [20]. Elle n'est pas suffisante pour assurer une fluidisation stable.

Ensuite on distingue la vitesse U_c , qui représente la vitesse à laquelle la fluidisation se stabilise (figure 3.5b). On distingue également la vitesse U_k , qui est la vitesse à partir de laquelle le lit devient turbulent. Si dépassée, le risque de voir les particules s'envoler avec les fumées augmente significativement (figure 3.5c). Finalement, on identifie la vitesse terminale, U_t , qui représente la vitesse à laquelle les particules sont parfaitement en équilibre avec leur poids et avec la portance induite par l'air.

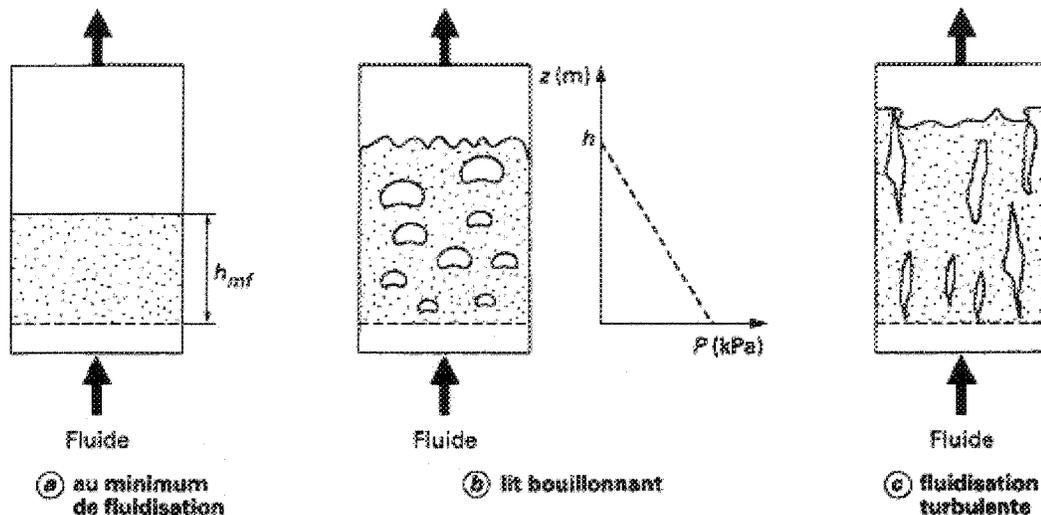


Figure 3.5 : Changements d'état d'un lit de particules au fur et à mesure que la vitesse augmente [14]

Dans l'application de la combustion en lit fluidisé de type bouillonnant, l'obtention d'une fluidisation optimisée se situerait entre U_c et U_k (figure 3.4).

3.1.2 TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES LITS FLUIDISÉS

Le transfert de chaleur dans un lit fluidisé bouillonnant est un mélange des modes d'échanges (convection, conduction et rayonnement). Dans la chambre de combustion, il y a un échange entre les particules et les parois (convection, conduction et rayonnement). Ensuite, les particules échangent entre elles par rayonnement, conduction et convection (mouvement des particules). Et enfin, il existe un échange entre le gaz de fluidisation (air) et les particules (convection). De plus, la source de chaleur dans notre cas est la réaction chimique de combustion qui se produit dans le lit fluidisé et qui n'est pas uniforme en temps et en espace. En effet, le dégagement de chaleur est influencé par la vitesse et la durée de combustion. Il existe de nombreuses corrélations permettant la détermination d'un

coefficient d'échange de chaleur global réunissant tous ces phénomènes (équation 3.13)

$$h_o = h_{gp} + h_{pwall} + h_{rad} \quad (3.13)$$

h_o est le coefficient d'échange global, h_{gp} est le coefficient d'échange entre le gaz et les particules), h_{wp} est le coefficient d'échange entre le mur et les particules) et h_{rad} est le coefficient d'échange par radiation. Les coefficients sont définis plus bas et les corrélations présentées . Les principaux paramètres qui influencent le coefficient d'échange de chaleur global sont la vitesse de fluidisation (régimes), la taille des particules et la température. Le coefficient d'échange (fonction du nombre de Nusselt, hd_p/k_g et du nombre d'Archimède, $gd_p^3\rho_g(\rho_p-\rho_g)/\mu^2$) pour un objet fixe placé dans un lit de particule (h_{gp}) a été obtenu empiriquement [15] :

$$Nu = 0.86 Ar^{0.2} \quad (3.14)$$

L'équation est limitée pour une valeur du nombre d'Archimède entre 30 et 10000. Dans le cas des particules plus grosses (classe B et D), le débit du gaz influence de manière significative l'échange, la composante convective (h_{gp}) s'obtient avec [16] :

$$Nu = 0.009 Ar^{0.5} Pr^{0.33} \quad (3.15)$$

L'équation 3.15 est valable pour des particules ayant un diamètre supérieur à 1mm. Une corrélation permettant une plus large application a été développée [17] :

$$Nu = 0.85 Ar^{0.19} + 0.006 Ar^{0.5} Pr^{0.33} + \frac{h_r d_p}{\lambda_g} \quad (3.16)$$

L'équation 3.16 est valable pour un nombre d'Archimède situé entre 10^2 et 10^9 . De plus, dans cette équation on retrouve la composante radiative qui est calculée à la température du lit de particule et du mur de la chambre de combustion. Ces types de corrélation sont

nombreuses (surtout pour des tubes immergés dans un lit fluidisé) et leurs utilisations sont restreintes (application particulière).

3.2 CONCEPTION DES GRILLES DE FLUIDISATION

La grille de fluidisation ou plaque de fluidisation, supporte le matériau granulaire et distribue l'air de fluidisation au travers du lit de matériel de façon homogène. C'est un aspect très important de la conception d'un lit fluidisé car il n'existe pas d'autre moyen physique pour influencer la distribution de l'air dans les particules solides. Une distribution non uniforme de l'air est le résultat de nombreux problèmes : réduction des performances du générateur, combustion non efficace, agglomération des cendres et bien d'autres.

Les problèmes communs à de nombreux générateurs à lit fluidisé concernent les buses de fluidisation qui permettent la répartition de l'air dans le matériau granulaire. Des problèmes d'entretien, de corrosion et de mauvaise conception sont les plus fréquents. L'air de fluidisation doit soulever une importante masse de particules et vaincre les pertes de charges de la grille de fluidisation. Ce qui représente une forte consommation d'énergie (7,5% à 11%) simplement pour fluidiser le lit de particules. Une bonne conception permet une plus grande efficacité afin de réduire cette consommation auxiliaire. Ensuite, les problèmes de fluidisation non uniforme et de retour de particules solides dans les grilles de fluidisation sont des problèmes réguliers. Une conception adaptée est la clé d'un lit fluidisé opérationnel et économique.

3.2.1 TYPES DE GRILLES DE FLUIDISATION

Cette section discute de la méthode générale pour la conception des grilles de fluidisation, en tenant compte de la vitesse et la longueur du jet à la sortie de buses, la taille des bulles générées dans le lit de particules, la répartition des buses en fonction des pertes de charges et l'homogénéisation. Il existe plusieurs méthodes pour concevoir une grille de fluidisation qui dépendent principalement de l'application. On peut regrouper trois types de conception (figure 3.6) :

- 1- la plaque de fluidisation, qui consiste en une plaque percée d'une multitude de trous, rarement utilisée dans les applications de combustion. (figure 3.6a, plate).
- 2- les tuyères ou buses de fluidisation permettant l'injection de l'air dans des directions différentes (figure 3.6b, tuyere).
- 3- les tubes de fluidisation sont directement introduits dans le lit de particules permettant le changement des particules sans même arrêter la fluidisation (figure 3.6c, sparge)

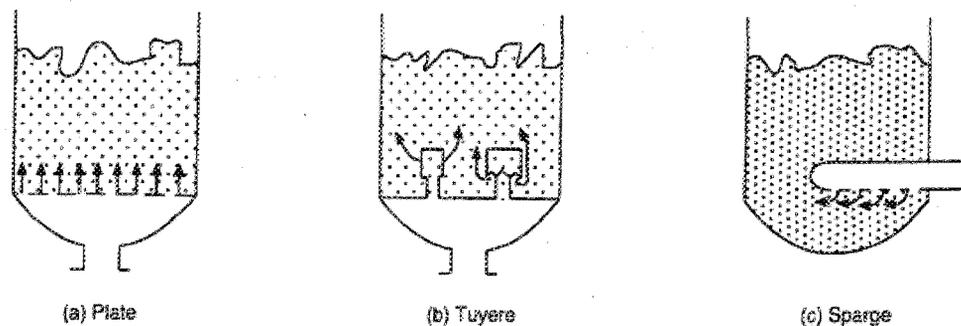


Figure 3.6 : Trois types de conception pour des grilles de fluidisation [8]

Il n'existe pas de forme de buse standard dans le domaine de la fluidisation. Chaque

application nécessite son propre type de grille de fluidisation. Dans le domaine de la combustion en lit fluidisé bouillonnant, une combinaison du type 2 et 3 est fréquemment utilisée. En effet, le type 2 (figure 3.6b) permet l'injection de l'air vers le bas ou les côtés ainsi le problème du retour des particules dans le système d'injection d'air est évité. Le sable est souvent utilisé comme lit de particules dans ce domaine dû à sa présence en grande quantité et son prix peu élevé. Le retour de sable dans le système d'injection cause une obstruction des orifices donc un entretien supplémentaire.

De plus, la réaction de combustion génère des cendres et des particules inertes provenant du combustible (roche) que l'on souhaite retirer du lit sans arrêter le système. Le type 3 permet cette opération. En effet, l'introduction de tube dans le lit de particules laisse le passage libre pour récupérer, par gravité, les particules inertes (sable, cendre, roche).

3.2.2 TAILLE DES BULLES

Le passage de l'air au travers du lit de particules crée une multitude de bulles au dessus de la grille de fluidisation. L'avantage de la naissance des bulles permet le brassage du lit et homogénéise la température et favorise le mélange du combustible. La taille des bulles est un important paramètre pour une raison; si la taille de la bulle excède la hauteur du lit de particules, un trou apparaît au travers du lit et perturbe la fluidisation homogène. De plus, si les bulles sont très grandes par rapport à la hauteur du lit de particules, des chemins prioritaires apparaissent laissant ainsi des zones non fluidisées. La taille maximale d'une bulle (D_{bmax}) est donnée par [18] :

$$D_{bmax} = \frac{2(U_t)^2}{g} \quad (3.17)$$

L'équation 3.17 permet une première estimation du diamètre des bulles. Dans une problématique de conception, l'estimation de la hauteur du lit est une fonction de la taille des bulles. On choisira approximativement, par expérience, de 3 à 5 fois la taille maximum des bulles comme hauteur du lit. En effet, la hauteur du lit est liée directement aux pertes de charges et influence la démarche de conception de la grille de fluidisation. Ensuite, on peut utiliser l'expression suivante pour déterminer le diamètre des bulles (d_b) en fonction de la vitesse de fluidisation [19] :

$$d_b = 0.54(U - U_{mf})^{0.4} (z + 4\sqrt{A})^{0.8} g^{-0.2} \quad (3.18)$$

Il existe de nombreuses corrélations dans le but de caractériser les bulles apparaissant dans un lit fluidisé (figure 3.7) comme la vitesse d'ascension des bulles, la fraction volumique locale occupée par les bulles et la taille en fonction de la hauteur. Dans une problématique de combustion en lit fluidisé bouillonnant, le calcul de ces différents paramètres n'est pas nécessaire. Il est important d'évaluer la taille des bulles pour assurer une hauteur de lit et une fluidisation homogène. D'autres applications (calcination, gazéification, etc.) nécessitent une caractérisation plus rigoureuse des bulles.

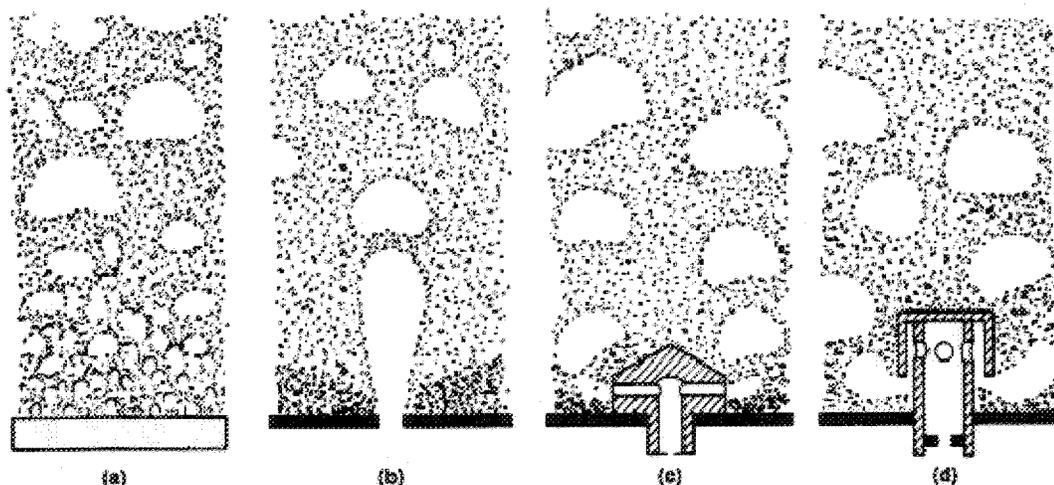


Figure 3.7 : Caractérisation des bulles en fonction des types de grille de fluidisation [9]

La figure 3.7 montre les caractéristiques des bulles en fonction du type de grille de fluidisation : (a) poreuse, (b) plaque, (c) et (d) tuyère.

3.2.3 LONGUEUR ET VITESSE DU JET

La quantité d'air nécessaire est calculée à partir de la vitesse minimum de fluidisation. La hauteur du lit de particules est approximée dans un premier temps avec la taille des bulles. Un autre paramètre important est la longueur du jet de fluidisation. Si celui-ci est trop important, l'interaction des jets entre les buses de fluidisation perturbe la fluidisation et augmente l'entretien de la grille de fluidisation par érosion des buses entre elles. La vitesse du jet à la sortie de la buse est nécessaire pour le calcul de la longueur du jet :

$$U_j = \left(n_j \frac{\pi d_j^2}{4} \right) = U_m = \left(n_m \frac{\pi d_m^2}{4} \right) = U \quad (3.19)$$

L'équation 3.19 fait apparaître la vitesse à l'entrée de la buse (U_j) et à la sortie de la buse

(U_m). La vitesse U donne le débit de fluidisation par mètre carré de la section du lit. De plus, le nombre de trous et le diamètre des trous apparaissent dans le calcul de la vitesse. On peut remarquer que la conception d'une grille de fluidisation est un équilibre entre plusieurs paramètres et cela nécessite une série de calculs. La longueur du jet est donnée par [21]:

$$L_j = 5.2d \left\{ \frac{\rho_f d_p}{\rho_p d} \left[\frac{\rho_f U_j^2}{\rho_s d_p g (1 - \varepsilon_{mf})} \right]^2 \right\}^{0.2} \quad (3.20)$$

La longueur du jet permet de quantifier l'espace nécessaire entre les buses de fluidisation afin d'éviter l'interaction des buses entre elles. En effet, on pourra choisir d'arranger les buses dans différentes positions (figure 3.8) pour un gain d'espace ou pour améliorer la conception.

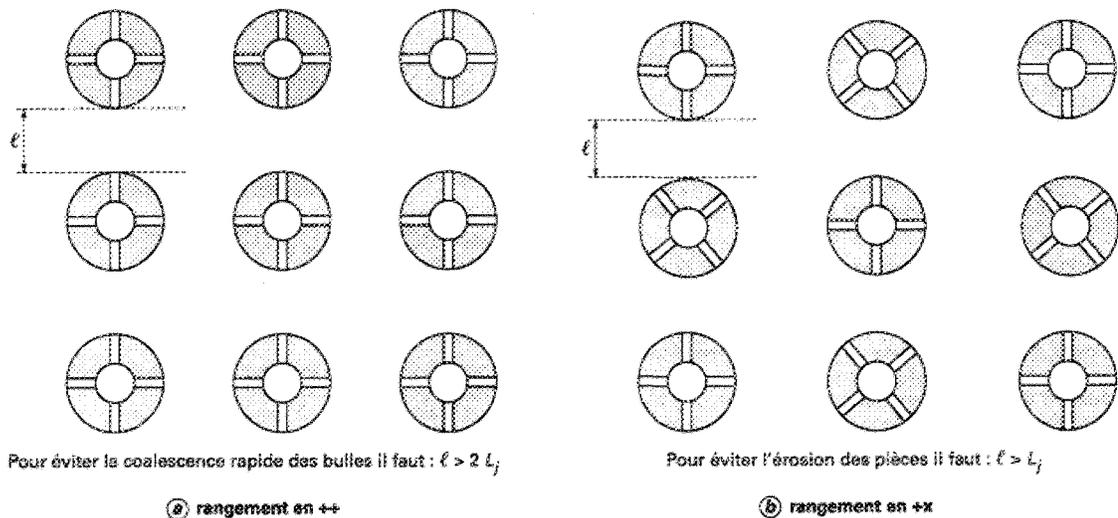


Figure 3.8 : Disposition des tuyères à multiple trous horizontaux [14]

La figure 3.8 montre une possibilité d'arrangement des buses de fluidisation en fonction de la longueur du jet et pour des tuyères à multiples trous horizontaux. La figure 3.8a montre la longueur nécessaire entre les buses pour éviter une coalescence rapide des bulles et la

figure 3.8b montre l'arrangement optimal pour éviter l'érosion des tuyères.

3.2.4 PERTES DE CHARGES ET L'HOMOGENÉISATION DE LA FLUIDISATION

La principale fonction d'une grille de fluidisation est, en plus des spécificités discutées plus haut, de distribuer uniformément le fluide sur toute la section du lit. En effet, l'apparition des bulles (régime bouillonnant) doit se faire de manière égale sur toute la surface du lit. Ainsi, le brassage attendu est uniforme dans la chambre de combustion. Afin d'équilibrer la fluidisation, le calcul des pertes de charges au travers de la grille de fluidisation et du lit de particules est important. L'équilibre hydraulique de la grille de fluidisation dépend de ce calcul. Des pertes de charges excessives augmentent la puissance du ventilateur considérablement et surdimensionnent l'installation. Pour obtenir une telle distribution, l'expérience a démontré qu'une perte de charge minimale équivalant à 1/3 du poids des particules est nécessaire [14] au niveau de la grille de fluidisation. Cependant, cette perte de charge ne peut être inférieure à 3400Pa [14]. Ainsi, lorsque le diamètre des orifices est choisi, le nombre de trous par mètre carré est fixé de telle sorte que, à la vitesse de fluidisation, la perte de charge de la grille soit légèrement supérieure à 1/3 du poids du lit (ou à 3400Pa en choisissant la valeur la plus grande) avec [22] :

$$\Delta P_{grille} \approx \frac{1}{2} \rho_f (U_j^2 - U_m^2) + \rho_f \frac{U_j^2}{4} \quad (3.21)$$

L'équation 3.21 donne directement la perte de charge de la grille sans prendre en compte l'épaisseur du lit. Une vérification doit être faite selon un critère empirique :

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_b} = 0.15 \rightarrow 0.3 \quad (3.22)$$

L'équation 3.22 représente le rapport des pertes de charges au travers de la grille (ΔP_d) sur les pertes de charges du lit de particules (ΔP_b). Le dimensionnement d'une grille de fluidisation est surtout basé sur des modèles empiriques. L'aboutissement d'une telle conception repose sur le respect des critères de fonctionnement. Chaque critère étant nécessaire pour le calcul des autres, il existe aujourd'hui des logiciels qui regroupent l'état de la science dans ce domaine et facilitent la conception [28].

3.3 CONTRÔLE ET DÉMARRAGE DES CHAUDIÈRES À LIT FLUIDISÉ

BOUILLONNANT

Dans un premier temps, une rapide revue des systèmes de contrôle des générateurs à vapeur est faite. Ensuite, l'application au contrôle des générateurs à vapeur avec lit fluidisé bouillonnant est détaillée, ainsi que le démarrage d'une telle installation et certains problèmes courants sont passés en revue.

3.3.1 CONTRÔLE DES GÉNÉRATEURS DE VAPEUR

Les chaudières sont une source d'énergie clé pour la génération de l'électricité et de la chaleur dans les procédés industriels et les bâtiments. Sans tenir compte de la capacité ou du combustible, il y a certains systèmes de contrôle fondamentaux exigés pour le contrôle de chaudière. Le défi s'articule autour du contrôle d'une combustion efficace (rendement) et sécuritaire (explosion).

Un système de contrôle robuste nécessite une précision dans les mesures. Si on ne

peut pas mesurer les variables d'un procédé, les variables ne peuvent pas être contrôlées.

Un générateur de vapeur peut être divisé en deux systèmes simples (figure 3.9). Le premier est le système eau/vapeur, que l'on appelle le « côté eau » de la chaudière. Dans le « côté eau », l'eau est introduite et chauffée à travers les tubes, elle est évaporée et quitte le système à l'état de vapeur.

Le deuxième système est l'alimentation en combustible et en air, que l'on appelle le « côté feu » de la chaudière. Dans le « côté feu », on introduit la quantité de combustible et d'air nécessaire à une combustion complète et on retrouve à la sortie les fumées et les cendres.

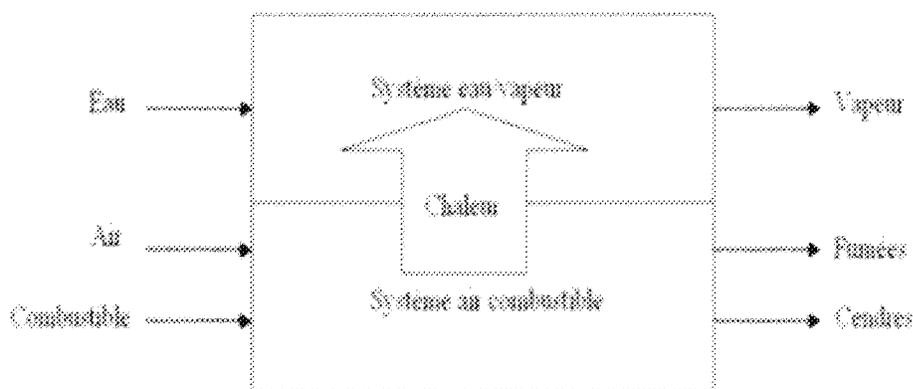


Figure 3.9 : Schéma simplifié d'un générateur de vapeur

Le système de contrôle est basé sur une relation maître-esclave (maintenir la pression de vapeur du réseau). La chaudière doit remplir ses fonctions de la manière suivante : la combustion doit être régulée en fonction de la demande. La variable de sortie du système de contrôle est la vapeur produite et la variable d'entrée est la demande « usine ». Il faut ajuster les paramètres nécessaires pour combler les demandes. Un contrôle par anticipation est possible mais rarement utilisé dans ce domaine.

Le système de contrôle est divisé en plusieurs sous système (figure 3.10), le niveau

d'eau, la demande de vapeur qui inclut la gestion de la combustion (air et carburant) et le contrôle de la température de la vapeur.

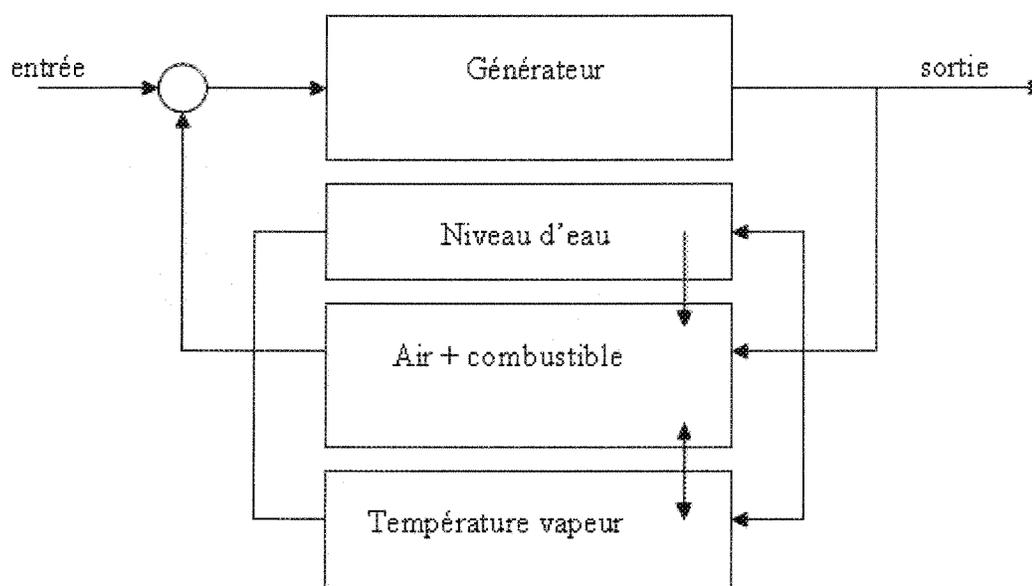


Figure 3.10 : Diagramme des sous systèmes du contrôle de bouilloire [23]

La figure 3.10 montre l'interaction entre les différents sous système de contrôle. On peut voir que le contrôle du niveau d'eau est unidirectionnel avec le reste du système, car l'admission d'eau liquide se fait dans un sens d'écoulement seulement (élément de sécurité). La consigne de température de surchauffe de vapeur peut demander une augmentation du taux de combustion (température trop basse) et une diminution du taux de combustion (température trop haute). Le débit de vapeur (sortie du système) peut demander une augmentation ou une diminution du taux de combustion afin de respecter la consigne (ou la demande du procédé utilisant la vapeur). La demande de vapeur influence les paramètres de combustion. Les paramètres de combustion incluent une gestion du débit

d'air de combustion et du débit de combustible appelé régulateur de combustion. Ce régulateur s'assure que la quantité d'air et de combustible sont toujours dans les proportions régis par la chimie de la réaction de combustion. De plus, les paramètres de combustion sont quelque peu différents (en opposition aux systèmes à grille) dans le cas d'une combustion en lit fluidisé bouillonnant (température du lit, régimes de fluidisation).

3.3.1.1 CONTRÔLE DE LA COMBUSTION EN LIT FLUIDISÉ BOUILLONNANT

Le contrôle de la combustion en lit fluidisé bouillonnant ne diffère pas de la philosophie de contrôle d'un générateur de vapeur plus classique. Plus haut, les paramètres importants de la fluidisation ont été vus : régime de fluidisation (vitesse de fluidisation), taille des particules et hauteur de sable. Le régime de fluidisation peut être contrôlé à partir de la mesure du débit d'air de fluidisation ainsi la vitesse de fluidisation peut devenir un paramètre de contrôle. La taille des particules doit être vérifiée par les opérateurs. Il est difficile d'utiliser un matériau granulaire avec le même diamètre, parce que plus coûteux qu'une granulométrie de sable. Et enfin, la hauteur de lit peut être contrôlée par mesure de pression statique au dessus de la grille de fluidisation. L'introduction d'appareil de mesure dans des conditions d'opérations à hautes températures (environ 800°C) et abrasive (sable en mouvement) nécessite une instrumentation particulière. La température est aussi une variable importante dans le contrôle de la combustion en lit fluidisé. Un générateur de vapeur plus classique contrôle la température du foyer ; mais une augmentation de la température du sable entraîne l'agglomération des cendres et du sable (vitrification).

3.3.1.2 STABILISATION DE LA COMBUSTION AU DÉMARRAGE

Une particularité d'un système de combustion solide est son démarrage. Il faut ajouter un accélérateur (gaz, huile...) ou/et un brûleur de démarrage. La technique la plus courante est le brûleur de démarrage. Un lit fluidisé doit opérer dans des conditions le caractérisant c'est-à-dire que le sable ou le matériau granulaire utilisé pour la fluidisation doit atteindre des conditions de températures (fonction du combustible) et de régimes de fluidisation (vitesse de l'air au travers des particules).

Il n'existe pas de méthodes précises pour définir un démarrage, et chaque compagnie utilise une méthode basée sur leur expérience. Mais un démarrage peut être décomposé en deux étapes : préparation et allumage.

Le lit fluidisé est préparé avec la bonne hauteur de sable et une vérification de la distribution homogène de l'air est recommandée (visuellement). Ensuite, il faut chauffer suffisamment le sable (ou le matériau granulaire utilisé pour la fluidisation) pour atteindre une température minimum d'allumage du combustible utilisé. Les travaux de *Stulz et Kitto*, [24] décrivent les températures d'allumages pour différents combustibles solides.

Pour une combustion de bois humide (écorce à 50% d'humidité), une température de 650 à 700°C est suggérée avant de permettre l'alimentation de biomasse dans le foyer. Il faut être capable de réchauffer une grande quantité de sable avant de commencer l'opération pour un lit fluidisé. L'utilisation d'un brûleur de démarrage est alors courante pour ce type de système de combustion, mais son dimensionnement reste difficile. L'échange entre la flamme et la surface du lit n'est pas efficace (15-20%) [25]. La surface à réchauffer est grande comparée à la flamme. De plus, l'air de fluidisation traverse le sable et refroidit celui-ci.

3.3.1.3 RÉGIME DE FLUIDISATION ET TEMPÉRATURE DE SABLE

On a vu plus haut que la fluidisation est caractérisée par la vitesse de l'air au travers des particules, appelé régime de fluidisation. Durant la combustion, il faut conserver le régime de fluidisation de l'installation. Certaines variables perturbatrices, comme la température de l'air font varier l'état du lit ou le régime de fluidisation. La mesure de la variation de pression à l'intérieur de celui-ci permet de caractériser l'état du régime bouillonnant [27]. Il faut utiliser la vitesse de l'air de fluidisation pour rester dans les paramètres de conception et faire une correction sur la température de l'air (mesure de débit massique).

Ensuite, le contrôle de la température du sable doit éviter la formation de silice en fusion qui vient perturber les conditions de fluidisation et de combustion. Une façon courante consiste à faire varier le débit d'air au travers du matériau granulaire. Une augmentation du débit diminue la température et une diminution de celui-ci augmentera la température du sable pendant le fonctionnement. Il faut aussi protéger le sable dans le cas où la température n'est plus contrôlable (combustion dangereuse, combustible différent, erreur du contrôleur...) qui coupera l'alimentation jusqu'au recouvrement d'une température normale.

3.3.1.4 AVANTAGES LIÉS À L'UTILISATION DES LITS FLUIDISÉS

Le principal avantage lié à l'utilisation des lits fluidisés pour la combustion des résidus forestiers est le mélange air/combustible. En effet, les résidus forestiers représentent

une source non exploitée d'énergie mais leurs caractéristiques chimiques (humidité et pouvoir calorifique) nécessitent une combustion efficace : la combustion en lit fluidisé est le meilleur compromis [9]. De plus, la combustion presque instantanée réduit la formation de composé chimique nocif (NO_x). Ensuite, on peut souligner la souplesse quant à l'utilisation d'un lit fluidisé dans un générateur de vapeur. C'est-à-dire que la production de vapeur pour la réalisation d'un procédé industriel (chaleur) n'est pas constante et donc génère une variation dans la demande qui doit être absorbé par le générateur de vapeur. Un lit fluidisé peut moduler la combustion et ainsi absorber des fluctuations de l'ordre de 4% [8]. De plus, la capacité à brûler des débits de combustible importants permet de générer de forts débits de vapeur et rend l'utilisation d'une installation à lit fluidisé apte à la cogénération (électricité).

3.3.1.5 PHÉNOMÈNE D'AGGLOMÉRATION DANS LES LIT FLUIDISÉS

La combustion en lit fluidisé possède un désavantage majeur lié à son utilisation. La fluidisation requiert l'utilisation d'un matériau granulaire, le plus souvent du sable car il est facile à trouver, bon marché et les granulométries sont connues. De ce fait, le sable est chauffé à des températures se situant entre 800°C et 900°C . La température de fusion du sable (silice) se situe autour de 1400°C mais en présence de produit basique (cendre) le point de fusion diminue ; il y a naissance d'agglomérats localement. Ces agglomérats ont tendance à créer des zones de non fluidisation qui déstabilise la fluidisation. Il n'existe pas de solution exacte pour éviter ce phénomène. Une fluidisation uniforme homogénéise la température dans le lit et diminue la formation locale de points chauds.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 CONCEPTION D'UN LIT FLUIDISÉ POUR LA COMBUSTION DE BIOMASSE

Les premiers travaux à réaliser pour le projet consistent à concevoir le système de combustion en lit fluidisé. Il fut nécessaire de se familiariser avec ce processus de combustion. Pour ce faire, une revue de la littérature, la consultation d'experts, l'achat de logiciels et des essais en laboratoire furent entrepris et ont permis une compréhension plus approfondie du phénomène.

La conception du système de combustion a été réalisée avec Réjean Villeneuve, un ingénieur travaillant aussi sur le projet. J'ai transmis à Mr Villeneuve les connaissances en thermodynamique, transfert de chaleur et combustion nécessaires à la compréhension des phénomènes de combustion en lit fluidisé. Après avoir effectué une recension des écrits exhaustive, il est apparu que les détails de conception du lit fluidisé n'étaient pas disponibles par le biais des revues scientifiques. Des recherches plus poussées ont permis de trouver un logiciel regroupant l'ensemble des connaissances actuelles sur les calculs des

paramètres des lits fluidisés. Une des options était de permettre la conception d'une grille de fluidisation.

L'entreprise *BFI* a donc financé l'achat de *Ergun* [28], un logiciel français réalisé par le professeur *Khalil Shakourzadeh* [28], de l'Université de Compiègne et auteur de nombreux articles dans ce domaine. Ce dernier est venu présenter une formation sur *Ergun* aux membres du projet en février 2008.

4.1.1 DÉMARCHE DE CONCEPTION

Le logiciel *Ergun* a été très utile lors des démarches de conception du lit fluidisé. En effet, ce logiciel permet d'obtenir les vitesses d'air pour différents régimes de fluidisation, températures, tailles des particules, hauteurs de lit de sable et les mécanismes de transfert de chaleur. Il permet aussi le respect des critères de dimensionnement lié aux pertes de charges et à l'homogénéisation de la fluidisation. Sinon des zones non fluidisées apparaissent, se traduisant par des particules de sables stationnaires. Dans le cas de la combustion, les particules de sable stationnaires, provoquent une apparition de points chauds se traduisant par une augmentation locale de la température, rapprochant le sable de son point de fusion (le point fusion de la silice, sable, diminue en présence de produit basique comme les cendres). Plusieurs installations utilisent des grilles de fluidisation (plaque perforée) mais dans le cas d'une combustion, il est nécessaire de récupérer le sable et les cendres sans arrêter le système. Il faut utiliser des buses de fluidisation qui servent à uniformiser la distribution de l'air dans le sable. Le logiciel permet aussi de déterminer la quantité de buses nécessaires, le nombre d'orifices et leurs diamètres, la vitesse d'air à la

sortie et la longueur du jet. Les buses sont disposées en quinconce dans le but de ne pas se nuire entre elles, dû à la vitesse d'air excessive à la sortie de la buse (100 à 200m/s). Les buses doivent provoquer une perte de charge suffisante pour une distribution de l'air homogène sans causer un surdimensionnement du ventilateur d'air dans le cas d'une perte de charge excessive.

La fabrication de la chaudière déjà existante et nos objectifs de production (10 000kg/h) de vapeur sont des contraintes. Par exemple, la place réservée au lit fluidisé dans la chaudière impose les dimensions de ce dernier. De plus, les vitesses d'air calculées pour assurer une fluidisation et la surface du lit fluidisé imposent la quantité d'air (1,89m³/s) nécessaire à la combustion.

Les résultats obtenus à l'aide du logiciel ont permis l'élaboration de huit buses (Figure 4.1) de différents formats qui satisfont les contraintes définies (surface du lit, vitesse d'air). Les buses ont été réalisées à titre de prototypes, afin d'effectuer des essais expérimentaux. Il fallait déterminer le format offrant le moins de pertes de charges. De plus, on a eu l'opportunité d'observer un lit fluidisé expérimental de petite taille, sans combustion (Figure 4.2). On a ainsi pu observer le mélange du sable et de la biomasse. L'interaction ne se produit que sur une épaisseur supérieure du sable, contrairement aux attentes. Si la hauteur de sable diminue, les pertes de charges diminuent aussi, permettant de diminuer la puissance du ventilateur.

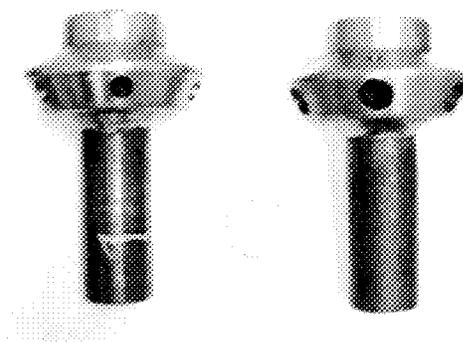


Figure 4.1 : Buses de fluidisation

(Au centre est placée une pièce de un dollar canadien.)

La figure 4.1 montre le format de buse retenu, qui a subi les tests de pertes de charges. Les tests de pertes de charges ont permis d'identifier un compromis entre une bonne distribution d'air et les pertes de charges minimum au travers du lit (figure 4.3).



Figure 4.2 : Lit fluidisé expérimental (Département des sciences appliquées, UQAC)

Le lit fluidisé expérimental (figure 4.2) mesure 12cm de large et 40cm de haut. La distribution de l'air est réalisée par une grille type filtre et le plenum est rempli de petites roches afin d'homogénéiser la distribution de l'air. Les essais de mélanges ont été réalisés avec de la biomasse (écorce) mesurant environ 1cm par 2cm. Afin de réaliser le lit de fluidisation quatre granulométries de sable ont été utilisées :

- 1- 1 à 2mm ;
- 2- 0,841 à 1mm ;
- 3- 0,500 à 1mm ;
- 4- 250 à 500 μ m.

Aucune différence n'a été observée en fonction de la granulométrie utilisée. Il n'y a pas de mélange dans toute la hauteur du lit seulement en surface. L'hypothèse de départ : la hauteur du lit est important pour réaliser le mélange de la biomasse avec le sable s'avère fausse. Il est important de retenir que ces essais ont été réalisés à froid et que le comportement du lit à chaud (combustion) et vu par la suite est différent.

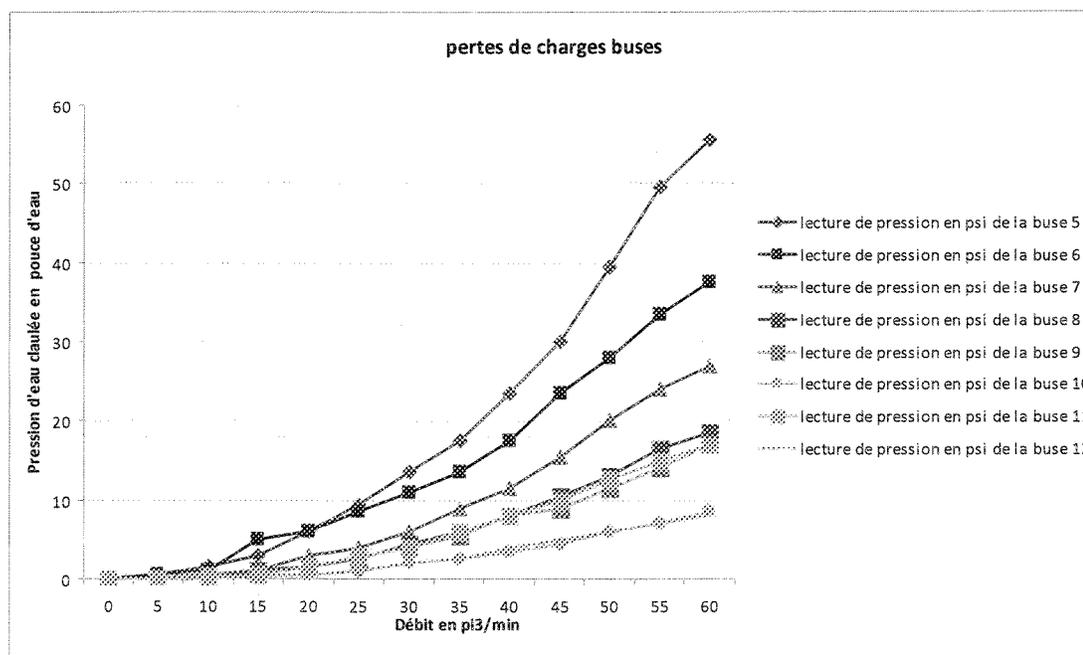


Figure 4.3 : Résultats des tests sur les pertes de charges

Le graphique de la figure 4.3 montre les pertes de charges dans les buses obtenues par expériences. Les différences entre ces buses, sont le diamètre et le nombre d'orifices. La buse retenue porte le numéro 8 dans ce graphique. La buse est retenue pour les raisons

suivantes :

- pertes de charges supérieures au minimum imposé par le logiciel (3400Pa) ;
- pertes de charges supérieures au tiers du poids du lit de sable imposé par le logiciel (dans notre cas, l'installation est conçu pour fonctionner avec une hauteur de sable pouvant aller jusqu'à 600mm) ;
- pertes de charges supérieures au parcours de l'air dans les conduites d'alimentation du lit fluidisé (environ 1000Pa) ;
- la puissance requise par le ventilateur pour obtenir la pression et le débit d'air doit être la plus faible (consommation d'énergie).

Finalement, on opte pour un lit fluidisé (figure 4.4) muni de 130 buses ayant chacune 6 orifices de 10mm. La conduite d'alimentation principale a un diamètre de 23,37mm. Ce format de buse possède une perte de charge d'environ 5kPa au débit maximum. Le débit maximum par buse pourra varier de 0,0185m³/mn à 20°C.

La hauteur de sable sur les buses influence la perte de charge et la distribution de l'air au travers du lit fluidisé. Le fonctionnement optimal nécessite une hauteur de sable minimale de 300mm correspondant à une distribution homogène de l'air et une hauteur maximale de 600mm pour ne pas surdimensionner le ventilateur.

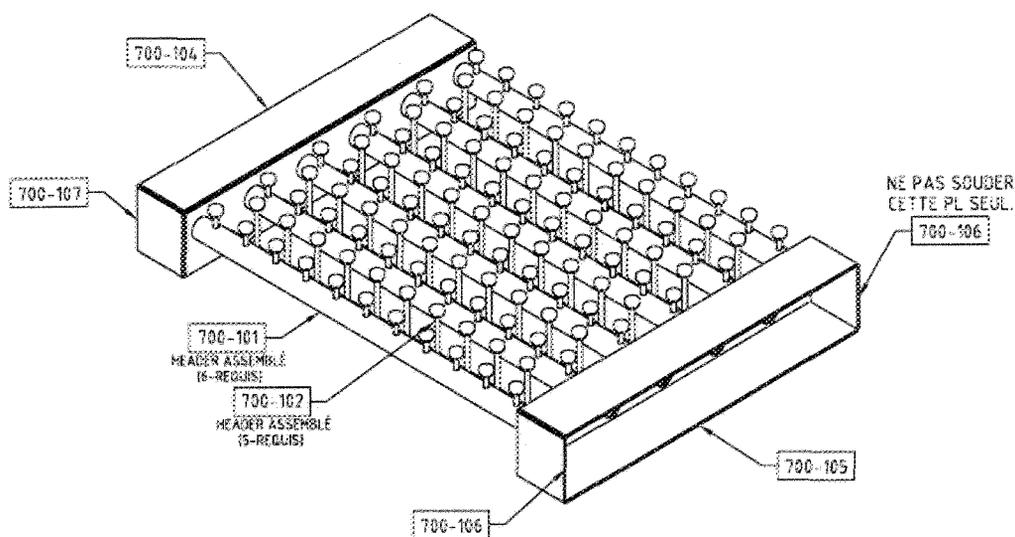


Figure 4.4 : Conception finale du lit fluidisé (propriété intellectuelle)

La figure ci-dessus montre la conception du lit fluidisé tel qu'installé dans la chaudière.

4.1.2 ESSAIS ET ANALYSE DU LIT FLUIDISÉ

Les essais du lit fluidisé à froid (sans combustion), permettent de vérifier les points suivants :

- répartition homogène de l'air à travers le sable ;
- vitesse minimum de fluidisation à froid ;
- vitesse maximale de fluidisation à froid ;
- choix de la granulométrie du sable.

L'homogénéisation de l'air dans le sable est critique. Car si on observe une fluidisation seulement dans certains endroits, certaines zones ne sont pas en mouvement et sont des zones critiques pour le développement de points chauds (hautes températures) et donc de fusions du sable et des cendres. Les essais réalisés avec le lit fluidisé installé à *La*

Fromagerie Boivin montrent que la première apparition de bulles se fait au milieu de la surface. Ensuite une augmentation de la vitesse d'air de fluidisation (débit) augmente l'espace de formation des bulles, jusqu'à atteindre une zone de fluidisation sur toute la surface. Par la suite, une diminution de la vitesse de fluidisation jusqu'à la vitesse d'apparition de la première bulle, le lit conserve une fluidisation homogène sur toute la surface. On remarque que la fluidisation est un phénomène non réversible.

Ensuite, les vitesses critiques permettent la vérification de la puissance du ventilateur primaire (air de fluidisation). L'apparition de la première bulle correspond à la vitesse minimum de fluidisation, et l'emportement du premier grain de sable, la vitesse maximale. Il faut prendre en compte que la température de l'air pendant la combustion augmente, et donc que les vitesses critiques sont différentes. La figure 4.5 montre une vue du lit fluidisé tel qu'il est installé dans le générateur de vapeur.

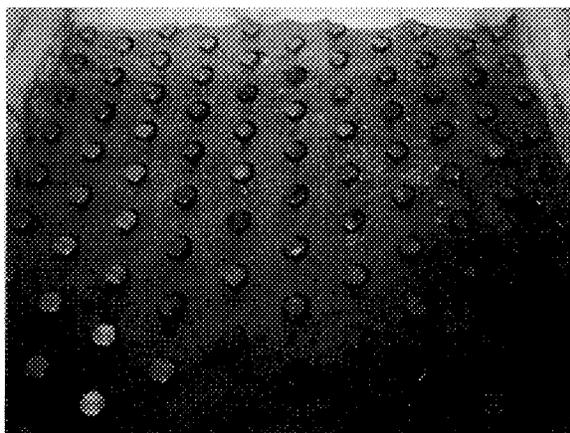


Figure 4.5 : Configuration du lit fluidisé (propriété intellectuelle)

Le choix de la granulométrie ainsi que la hauteur de sable sur les buses permettent l'ajustement du lit fluidisé. Si l'apparition de la première bulle nécessite une importante vitesse de l'air de fluidisation, on peut diminuer la granulométrie. Si la répartition de l'air à

travers le sable n'est pas homogène, on peut diminuer ou augmenter la hauteur du sable.

Le régime de fluidisation optimal est identifié à 36% de la vitesse du ventilateur et on remarque que l'on peut l'augmenter jusqu'à 45% sans risque de voir les particules s'envoler. Cette plage correspond au fonctionnement du lit fluidisé et à la quantité d'air prenant part à la réaction de combustion. L'ajout d'air provient du ventilateur secondaire.

Dans notre cas, les calculs préalables avaient prédit une hauteur de 300mm ainsi que des vitesses pouvant varier de 0.5m/s à 20°C, les meilleurs essais sont réalisés avec ces paramètres.

4.2 ÉCHANGES DE CHALEUR

Dans le but de connaître les performances de la chaudière avec le lit fluidisé envisagé, on a procédé à une analyse approfondie du mécanisme, qui s'est traduite par le développement d'un simulateur. Le logiciel Ergun permet d'obtenir des résultats sur le transfert de chaleur à l'intérieur des lits fluidisés, facilitant l'élaboration d'un simulateur cohérent développé avec le logiciel Excel.

4.2.1 SIMULATEUR

Ce simulateur est une combinaison de calculs sur Excel et de programmation avec Visual Basic permettant de rendre le simulateur simple d'utilisation. La chaudière est séparée en cinq sections : le lit fluidisé, la chambre de combustion, le surchauffeur, la chambre convective et l'économiseur. Chaque section est divisée en huit volumes. Une explication détaillée du simulateur est disponible en annexe 6. Le simulateur calcule la

température d'équilibre dans le lit fluidisé à l'aide des coefficients de transfert thermique obtenus dans le logiciel Ergun. À partir de cette température, le simulateur fait un bilan d'énergie dans les cinq sections et calcule le débit de combustible nécessaire pour un débit de vapeur. La puissance nécessaire pour produire un débit de vapeur est obtenue avec l'équation 4.1.

$$Q_g = \dot{m}_g * \Delta h \quad (4.1)$$

Il est nécessaire de connaître l'état initial et final de la vapeur en température et en pression pour utiliser l'équation 4.1. L'utilisation du diagramme entropique de l'eau permet une détermination simplifiée des paramètres (état, enthalpie...) de l'eau pendant le cycle.

Les échanges de chaleur pendant le parcours des fumées chaudes sont connus (chapitre 2.4). L'itération commence par la supposition de la température d'équilibre de la combustion qui est déterminé à l'aide un bilan thermique dans le lit fluidisé (annexe 6). La température de sortie est obtenue avec l'équation 4.2.

$$\dot{m}_g * C_{p_g} * (T_1 - T_2) = h_{total} * S * (T_g - T_f) \quad (4.2)$$

Où (T_1) représente la température à la sortie de la chaudière et (T_2) représente la température dans la chambre de combustion. L'obtention du coefficient d'échange par convection induit une erreur si la variation des grandeurs thermophysiques n'est pas prise en compte. Le simulateur est doté d'une base de données contenant toutes les caractéristiques de l'air et du gaz de combustion à toutes les températures et de l'eau aux différents états. Si le bilan présenté à l'équation 4.2 n'est pas équilibré, le simulateur suppose une nouvelle température de combustion (fonction d'un nouveau débit de combustible). Quand les températures sont connues, on obtient le flux de chaleur transféré à

l'eau moins les pertes de chaleur de la chaudière (pertes par convection et rayonnement).

On obtient le débit de combustible avec l'équation 4.3.

$$\dot{m}_{comb} = \frac{Q_{total} - Q_{pertes}}{PCI} \quad (4.3)$$

L'équation 4.3 utilise le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du combustible, quantité de chaleur dégagée lors de la combustion stœchiométrique (combustion parfaite). L'utilisation du PCI induit une erreur, dû aux imbrûlés, il faut déterminer un rendement de combustion par analyse des gaz de combustion. Ceci est compliqué à déterminer expérimentalement à l'étape de conception mais la littérature scientifique spécifie des rendements de combustion typique de biomasse.

En résumé, les résultats du logiciel Ergun (logiciel lit fluidisé) ont été intégrés au simulateur afin de prendre en compte le transfert de chaleur à l'intérieur du lit vers les murs du foyer. La page principale du simulateur est montrée à la Figure 4.6.

T4.01 Bilan éner					T4.1 calc lit fluid					
Énergie requise pour obtenir la vapeur visée	Autres pertes par	Itération	Utilisé pour l'itération		Températures du lit et du gaz de combustion et de l'air dans le lit	Bilan thermique				
Gain d'énergie requis dans la chaudière	Totale incluant les pertes	Bilan énergétique visé de vapeur moins énergie transférée	Pas proposé	Ancien Pas	Ancien Bilan	en amont de la section	Énergie qui sort du lit	Énergie qui entre dans le lit	Bilan	Pas
kW	kW		C						kW	
			0.01	-33.63636775	1126.757175					
Itère en deuxième quand "Bilan" = 0					Itère en premier					
Boxer 1 (Boxer T4.01 Iteration Energie req.)					Boxer 2 (Boxer T4.1 Iteration Le chert. total)					
Conditions à évaluer pour l'opération										
T4.01	T1	T4.1	T3							
vapeur ciblée	Pourcentage de perte d'énergie par la chaudière	Pression de vapeur d'opération	Type de combustible	Température de l'air à l'entrée	Pourcentage d'excès d'air	Pourcentage d'air principal	Echangeur dans le lit	Hauteur du lit fluidisé	Temp. res.	
										T4.2 Iter final

Figure 4.6 : Vue de l'algorithme

La figure 4.6 présente la version du simulateur permettant l'utilisation simplifiée du code.

Il est mentionné plus haut que le simulateur commence par le calcul de la température de

combustion. En effet, le processus itératif commence par le calcul de l'équilibre thermique du lit fluidisé. Ensuite, le code calcul les températures dans les cinq sections et il vérifie le bilan énergétique au travers du système. Dans le cas où le bilan énergétique n'est pas respecté, le simulateur suppose un nouveau débit de combustible, recalcule une température d'équilibre dans le lit fluidisé et recommence le processus jusqu'à l'équilibre du système.

La figure 4.7 montre les résultats obtenus avec le simulateur.

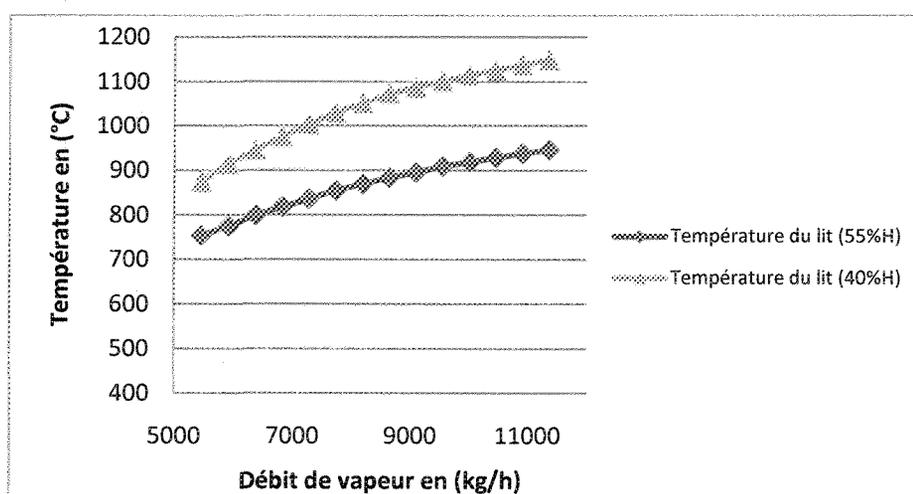


Figure 4.7 : Variation de la température du lit fluidisé obtenue avec le simulateur

La figure 4.7 montre les résultats obtenus avec le simulateur pour un combustible qui contient 55% d'humidité (losange bleu) et un autre qui contient 40% d'humidité (triangle vert). On remarque que pour un même débit de vapeur, le lit de sable est plus chaud quand le taux d'humidité est plus faible. La différence de masse d'eau qui doit être évaporé consomme une partie de l'énergie de combustion et ainsi diminue la température du lit fluidisé. L'installation est conçue pour fonctionner avec une de l'écorce à 55% d'humidité. Un combustible de plus faible teneur en humidité à pour conséquence un lit de sable trop chaud proche de la température de fusion du sable. Aussi, une augmentation du débit de

vapeur fait augmenter la température du lit fluidisé dû à l'augmentation du débit de combustible (proportionnelle au débit de vapeur) (figure 4.8).

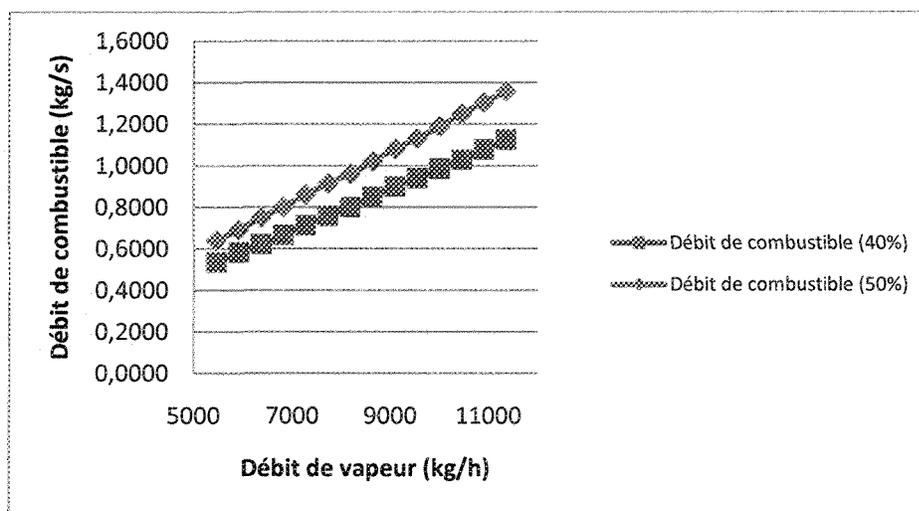


Figure 4.8 : Débit de combustible en fonction du débit de vapeur

La figure 4.8 montre la consommation d'écorce, obtenue à partir du simulateur, à 40% d'humidité (carré rouge) et à 50% d'humidité (losange bleu) en fonction du débit de vapeur. Selon l'équation 4.3, la consommation de combustible est proportionnelle au pouvoir calorifique. Le taux d'humidité affecte le pouvoir calorifique car une partie de la chaleur de réaction est utilisée pour l'évaporation du contenu en eau du combustible. On remarque (figure 4.8) que l'utilisation d'un combustible moins humide nécessite un plus faible débit de combustible pour une même production de vapeur. De plus, la consommation d'écorce est proportionnelle à la production de vapeur selon les équations 4.1 et 4.3.

4.2.2 ANALYSE ET DISCUSSION DU SIMULATEUR

Les différences des résultats obtenus entre le simulateur et les essais réalisés avec l'installation du générateur de vapeur installé à la fromagerie *Boivin* s'expliquent par de nombreuses incertitudes quant au phénomène de combustion en lit fluidisé.

Dans un premier temps, le simulateur considère une combustion sur toute la surface du lit. Les essais ont démontré que la combustion se réalise majoritairement au centre de la chambre de combustion. Le rayonnement calculé dans le simulateur n'est pas représentatif.

Ensuite, le régime de fluidisation bouillonnant souhaité est compris entre deux vitesses d'air. Il faut limiter le débit d'air primaire pour ne pas dépasser la vitesse maximale de fluidisation dans le lit. La quantité d'air nécessaire à la combustion provient principalement de l'air primaire et est complétée par l'air secondaire. Le simulateur prend en compte 90% de l'air nécessaire à la combustion comme étant l'air primaire. Si les essais sont faits avec ce rapport d'air, les vitesses de l'air dans le lit fluidisé emportent les grains de sable et le régime de fluidisation n'est plus respecté. De plus, la théorie de la combustion en lit fluidisé dit que la réaction de combustion prend part à l'intérieur de ce dernier. Ce n'est vrai que pour des combustibles où le mélange de sable et de combustible est possible. Dans notre cas, la biomasse reste en surface et l'apparition de flammes rend le simulateur non valable. L'apparition de flammes augmente beaucoup le rayonnement dans la chambre de combustion et la température observée dans le sable n'est pas la température de la réaction. Le sable est à une température provenant de l'échange gazeux à la surface du lit. Cet échange provient des trois modes de transfert de chaleur. Une étude approfondie doit prendre en compte l'échange de chaleur réalisé à la surface du lit résultant de la

température du lit fluidisé. De plus, le simulateur doit être modifié afin de prendre en compte le mélange avec l'air secondaire. Une expérimentation approfondie doit prendre en compte le rapport d'air primaire/secondaire ainsi qu'une autre méthode de mesure pour la température. Une étude de la cinétique de réaction de combustion permettrait une analyse approfondie de la réaction de combustion dans un lit fluidisé bouillonnant permettant d'évaluer la part de la réaction qui prend place dans le lit et au-dessus du lit dans le cas d'un projet similaire. Ce qui apporterait une amélioration au fonctionnement du simulateur.

4.3 GESTION DU SYSTÈME

La conception d'un contrôleur quel qu'il soit requiert une connaissance approfondie du procédé, tel que le nombre d'entrées (variables indépendantes) ainsi que les variables d'états (variables dépendantes). Les variables d'états peuvent changer en modifiant les variables d'entrées. Afin de bien connaître le procédé, une revue de la littérature sur le fonctionnement d'une chaudière haute pression avec un combustible solide et un système de combustion à lit fluidisé est réalisée. Le contrôle d'un générateur de vapeur est largement connu [6] [23]. Le contrôle du régime de fluidisation (bouillonnant) [25] ainsi que les températures de fonctionnement du générateur à lit fluidisé [24] sont trouvés dans la littérature. Les procédures de démarrage [8] font également l'objet de discussion.

De plus, certaines contraintes s'ajoutent comme les règlements et codes en vigueur pour l'exploitation des appareils sous pression. Par exemple au Québec, il faut respecter le code sur l'installation des installations sous-pression *NQ 3650-900* [27] ainsi que le règlement sur les dangers des systèmes de combustion *NFPA 85* [29].

4.3.1 CONCEPTION DE LA LOGIQUE DE CONTRÔLE

Pour concevoir un système de contrôle adéquat, il faut d'abord analyser le fonctionnement des générateurs de vapeur. Les variables d'états les plus communes dans les chaudières à lit fluidisé bouillonnant sont les suivantes :

- pression de vapeur ;
- niveau d'eau ;
- pression du foyer ;
- taux d'oxygène ;
- température de vapeur surchauffée ;
- température du lit.

Les variables d'entrées les plus communes dans les chaudières à lit fluidisé bouillonnant sont les suivantes :

- débit d'eau ;
- hauteur du lit ;
- vitesse du ventilateur de tirage ;
- débits des ventilateurs primaire et secondaire ;
- débit d'alimentation.

Un cas idéal implique une variable d'entrée avec une variable d'état. Par exemple, le niveau d'eau est influencé par le débit d'eau ou le débit de vapeur. Dans la pratique, une variable d'état est influencée par plusieurs variables d'entrée. Par exemple, le niveau d'eau est influencé par le débit d'eau, le débit de vapeur, le taux de combustion et la pression de vapeur. Une augmentation soudaine de la demande de vapeur va diminuer la pression dans

le générateur de vapeur. Cette dernière (pression) fait varier la densité du mélange diphasique (eau/vapeur) créant ainsi une augmentation du volume des bulles qui a pour conséquence une brusque augmentation du niveau d'eau. Une baisse de pression a pour effet une augmentation du taux de combustion (réponse du contrôleur), qui à son tour augmente significativement le débit de vapeur. Ainsi, on peut écrire l'équation suivante :

$$\text{Niveau d'eau} = f(\text{débit}) + d(\text{taux de combustion}) + d(\text{pression de vapeur}) \quad (4.4)$$

L'équation 4.4 se lit comme suit : « le niveau d'eau est fonction du débit et dépend du taux de combustion et de la pression de vapeur ». C'est une méthode pour relier les variables entre elles dans le but de développer une meilleure compréhension du procédé et ainsi du contrôleur.

Le taux de combustion est donc relié à la pression de vapeur dans le générateur de vapeur. Ainsi on pourra faire augmenter le débit d'air et de combustible afin d'augmenter le taux d'évaporation. Il faut fournir au contrôleur les rapports air/combustible, ce qui se traduit par le débit d'air des ventilateurs (primaire et secondaire) et le débit de combustible nécessaire à une bonne combustion pour un taux de combustion correspondant.

Il faut porter une attention particulière au système d'alimentation en résidus forestiers. Ce dernier représente la souplesse du système. Car les écorces humides choisies pour la production de chaleur ne sont pas facilement transportables par convoyeur sans risque d'accumulation sur les parois des systèmes de convoyage. Ce qui provoque une interruption de l'alimentation.

La combustion d'un solide est plus difficile à contrôler que celle d'un gaz ou d'un liquide. La formation d'imbrûlés est donc augmentée dû au mauvais mélange de l'air et du

combustible. La combustion en lit fluidisé offre un meilleur mélange mais un contrôle sur l'excès d'oxygène est requis. Ce qui permet au contrôleur d'augmenter ou de diminuer le débit d'air à chaque instant afin de compléter la combustion.

Après une analyse approfondie du procédé, la réalisation « d'un schéma d'instrumentation et de procédé » permet la compréhension générale de la logique de contrôle ainsi qu'une partie du procédé. Ce schéma est réalisé en langage ISA (*International Society of Automation*). On retrouve une description schématique des lignes de procédés (eau, gaz, vapeur) et du matériel (moteur, pompes, vannes, instrumentation). Il contient toutes les informations concernant les variables mesurées, les liens et les actions entre chacun des éléments.

Chaque variable mesurée est indiquée par le numéro de la boucle dont elle fait partie, ainsi qu'une série de lettres pour identifier sa mesure. De plus le symbole utilisé pour la représenter permettra d'identifier l'emplacement de la mesure.

Ainsi, une mesure de pression sur un schéma d'instrumentation et de contrôle peut être représentée de la manière suivante (figure 4.9) :

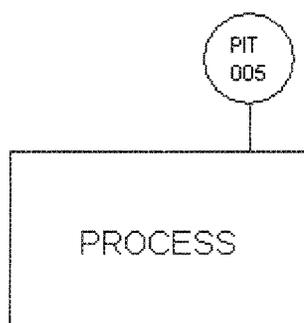


Figure 4.9 : Exemple de représentation pour un schéma d'instrumentation et de contrôle [8]

Ainsi, on peut lire (figure 4.9) que l'instrument mesure une pression (P) et doit indiquer la

Un schéma d'instrumentation et de contrôle lié à un narratif de procédé (annexe 8) sont des outils indispensables pour la réalisation du contrôleur par un programmeur. Un narratif de procédé décrit littéralement le fonctionnement et les marches à suivre d'un procédé.

4.3.2 CHOIX ET EMPLACEMENT DES CAPTEURS

Après avoir défini la logique de contrôle, il faut choisir l'emplacement des capteurs déterminés sur le schéma d'instrumentation et de contrôle (figure 4.9). Il faut porter une attention à l'emplacement des points de mesures. Dans un premier temps, le choix de l'instrumentation peut être structuré de la manière suivante (figure 4.10). On réunit tous les capteurs nécessaires en fonction de la variable mesurée et on ajoute la gamme de mesures, le fluide mesuré et l'environnement (température ambiante, poussière...).

instrument	gamme de mesure	fluide	environnement	quantité	numéro schéma
transmetteur de pression différentiel	5" WC à 55"WC	vapeur 400PSI 235°C	35°C	1	PID 004
thermocouple	20°C à 1200°C	sable et cendre en mouvement	abrasif, 1000°C	5	TIT 004

Figure 4.11 : Exemple d'un tableau des besoins en instrumentation

Ainsi, on peut identifier précisément chaque instrument (figure 4.11) et relier son utilité avec le schéma d'instrumentation et de procédé. Le tableau des besoins en instrumentation du générateur de vapeur de la *fromagerie Boivin* n'est pas présenté car sa

présentation n'est pas jugé pertinente. Il faut choisir l'emplacement physique de l'instrument avec la pertinence de la mesure. Une mesure de température peut être influencée par son milieu (rayonnement). De plus, l'emplacement du capteur permet, entre autre, la robustesse du contrôleur. Par exemple, un générateur de vapeur qui utilise plusieurs ventilateurs (primaire, secondaire, cheminée), doit équilibrer les pressions (légèrement négative) dans le foyer. Une mesure de pression est donc faite dans la chambre de combustion dans le but d'assurer l'évacuation des fumées à la cheminée. Le parcours des fumées dans la chambre de combustion n'est pas laminaire. Il y a des zones de recirculation dans les détours du parcours et la naissance de flamme donne naissance à des variations de pression dans le foyer. Si la mesure est faite dans une zone de recirculation, la turbulence de l'écoulement vient perturber la lecture et rend le système instable.

Dans notre cas, il faut aussi contrôler la température du sable dans le lit fluidisé. Il y a trois thermomètres immergés dans le sable. Le contrôleur utilise la moyenne des trois températures et fait varier la vitesse du ventilateur primaire pour augmenter ou diminuer le débit d'air de fluidisation. La mesure montre une incohérence, car les buses de fluidisation sont trop proches des thermocouples et la mesure est la température de l'air à l'entrée du lit et non celle du sable fluidisé. Les thermocouples sont déplacés pour les éloigner de l'entrée d'air de fluidisation et ainsi lire une valeur représentative de la température du sable.

4.4 EXPÉRIMENTATIONS AVEC LE GÉNÉRATEUR DE VAPEUR INSTALLÉ À LA FROMAGERIE BOIVIN

Le générateur de vapeur est installé à la *fromagerie Boivin*. Le lit fluidisé tel que conçu (Figure 4.5) est en place dans le foyer du générateur. La vérification préopérationnelle du système complet (système de combustion, système de contrôle, sécurités, accessoire tel que vannes, pompes, capteurs...) peut commencer. Il faut vérifier le fonctionnement de chaque composante indépendamment avant de faire le premier essai. On commence par vérifier les boucles de contrôle et ensuite on peut faire la mise en route réelle du système.

4.4.1 ESSAIS DES BOUCLES DE CONTRÔLE À FROID

Les essais des boucles de contrôle à froid permettent la vérification de la calibration de l'instrumentation ainsi que la réponse de la boucle. Par exemple, la régulation du niveau d'eau dans le ballon de vapeur (figure 4.12) est très importante. La boucle de contrôle est constituée d'une mesure par sonde immergée dans l'eau et action sur une vanne modulante électrique.

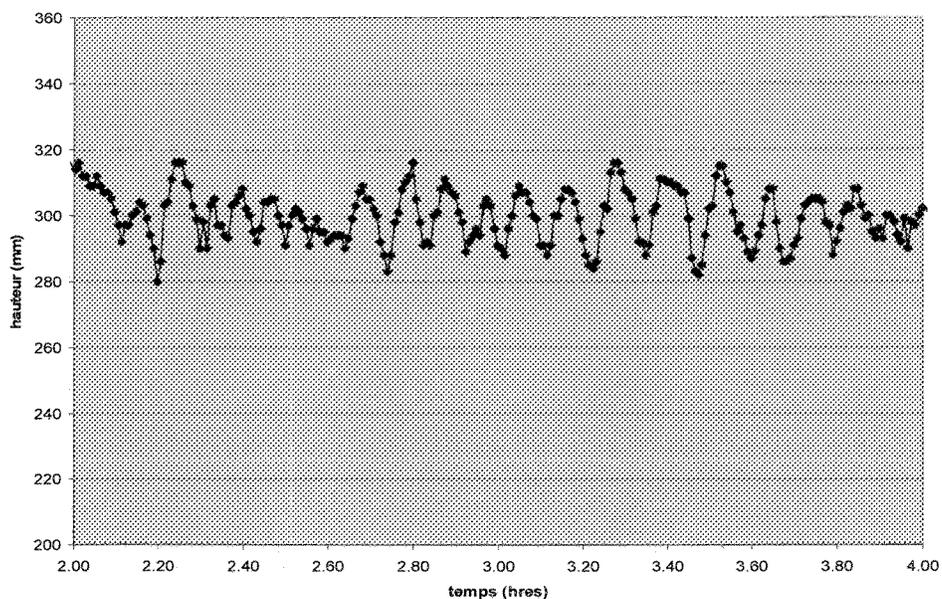


Figure 4.12 : Variation du niveau d'eau

Le graphique 4.12 montre la variation de la hauteur d'eau dans la chaudière. Le régulateur demande 300mm d'eau à la sonde et une variation de la lecture actionne une vanne de contrôle de débit d'eau afin de recouvrer une hauteur d'eau normale. De plus, cette boucle de contrôle doit commander la mise en route des pompes. Les essais à froid permettent de calibrer chaque élément devant fonctionner ensemble. Dans le cas de la régulation du niveau d'eau, une mauvaise régulation aura pour effet de diminuer la durée de vie des pompes, ou encore de mettre en danger l'installation par manque d'eau.

La régulation de la pression dans le foyer est aussi une boucle de contrôle importante. Le ventilateur de la cheminée doit assurer l'extraction des gaz de combustion en maintenant la pression légèrement négative (figure 4.13)

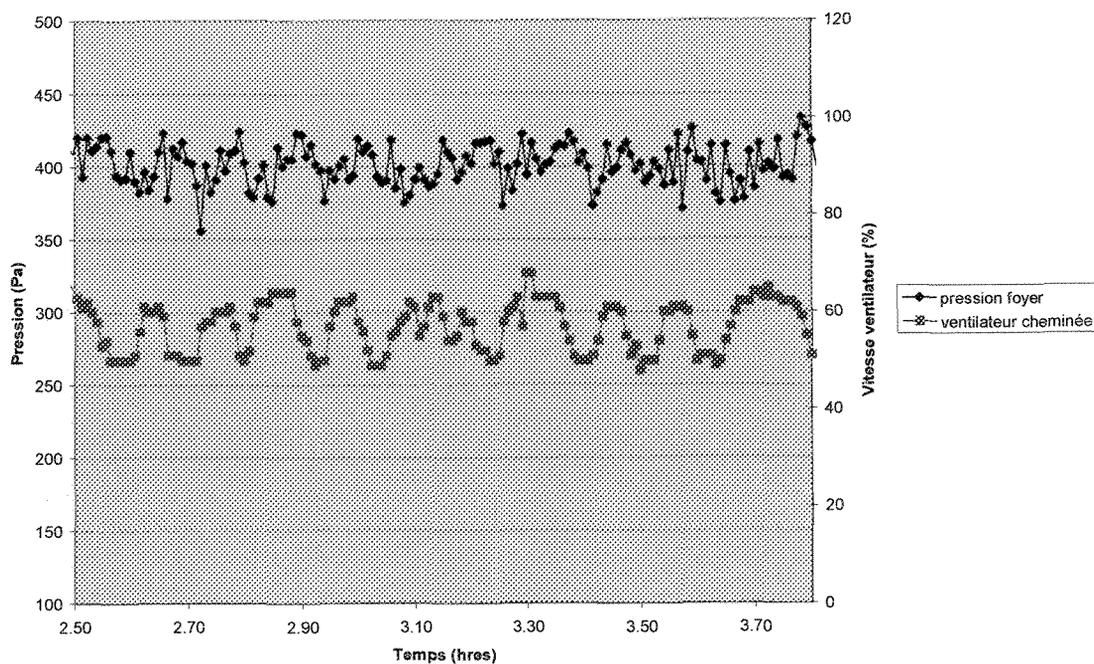


Figure 4.13 : Variation de la pression foyer

La figure 4.13 montre la régulation de la boucle de contrôle de la pression du foyer. Une augmentation du taux de combustion (air et combustible) a pour effet une augmentation du volume des fumées à extraire. Le ventilateur de la cheminée doit maintenir la pression désirée. Un capteur de pression différentiel placé à la sortie du foyer permet une lecture de la pression du foyer et un contrôle direct sur la vitesse du ventilateur de cheminée est réalisé. Lors d'un essai à froid, il n'est pas possible de voir l'effet du taux de combustion. La boucle de contrôle peut alors être vérifiée en faisant varier la vitesse du ventilateur primaire (figure 4.14), ainsi on peut simuler une augmentation du taux de combustion par une augmentation du comburant (air primaire).

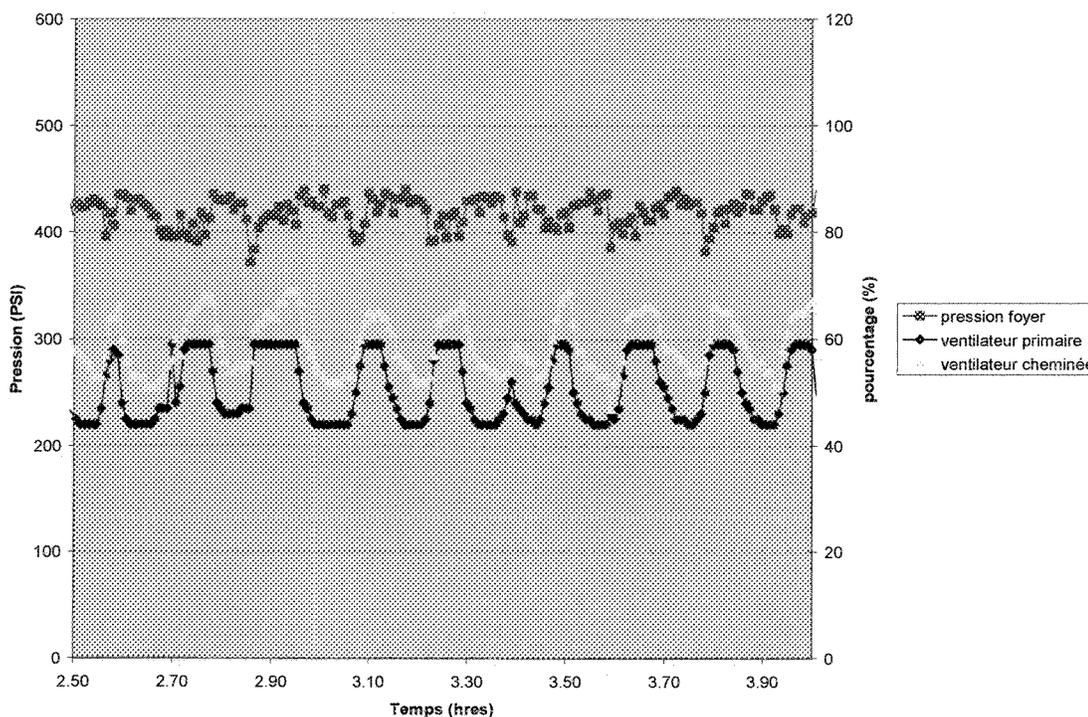


Figure 4.14 : Simulation de la boucle de contrôle de pression foyer

La figure 4.14 montre la variation du ventilateur de cheminée en fonction de la pression foyer. La pression foyer est modifiée à l'aide du ventilateur primaire. Une accélération du ventilateur primaire augmente la pression dans le foyer. On remarque qu'il y a beaucoup de perturbations durant l'acquisition de la pression dans le foyer. En effet, le lit fluidisé génère des bulles à la surface du lit de façon discontinue. Les bulles éclatent chacune à leurs tours et provoquent des brusques variations de pression dans le foyer. C'est pour cette raison que l'on peut observer des variations chaotiques de la lecture de pression. Afin de ne pas détériorer de façon prématurée le ventilateur de cheminée, un filtre électronique est ajouté dans l'automate afin de masquer ces brusques variations.

Ensuite, la gestion des alarmes par le contrôleur est une fonction importante. Si on regarde

encore la régulation du niveau d'eau. Une détection d'un manque d'eau doit stopper l'installation (alimentation, ventilation) et doit déclencher les pompes de secours. Cette vérification est essentielle avant de faire des tests réels. En dernier, on vérifie la configuration de l'interface opérateur.

4.4.2 ESSAIS DES BOUCLES DE CONTRÔLE À CHAUD

Une fois la vérification préopérationnelle terminée, les essais en fonctionnement commencent. L'allumage de la chambre de combustion d'un générateur de vapeur à lit fluidisé est important. En effet, les procédures de démarrage de telles installations préconisent le réchauffement du sable à une température de 700°C environ avant d'introduire le combustible. Le dimensionnement du brûleur de démarrage est sous estimé dans notre cas. La puissance n'est pas suffisante pour réchauffer le sable, il faut ajouter de la biomasse dans la chambre de combustion et un accélération (fuel). La fluidisation requiert un volume d'air important dans le foyer et ne permet pas de fluidiser la biomasse au démarrage sous peine de voir la combustion étouffée. Il faut attendre le réchauffement du sable (1 heure environ) avant de démarrer une fluidisation dans le foyer. Mais la biomasse ne se répartit pas de façon égale dans le foyer pendant la période de réchauffage ce qui rend difficile l'obtention d'une température uniforme. De plus, si un amas de biomasse se forme dans la chambre de combustion, on observe la formation de cheminées au travers de ce dernier. Ces cheminées sont provoquées par un passage prioritaire de l'air et causent une combustion non hétérogène, ce qui développe des points chauds et cause la fusion des cendres. Une méthode d'allumage veut que l'écorce soit mélangée par fluidisation avec le

sable au démarrage. Cette méthode a le même effet qu'un amas d'écorces dans la chambre de combustion. Le démarrage de cette installation est critique. Il faut porter une attention particulière au réchauffement du sable (figure 4.15) et au régime de fluidisation avant de laisser le contrôleur gérer la combustion de biomasse et donc la production de vapeur.

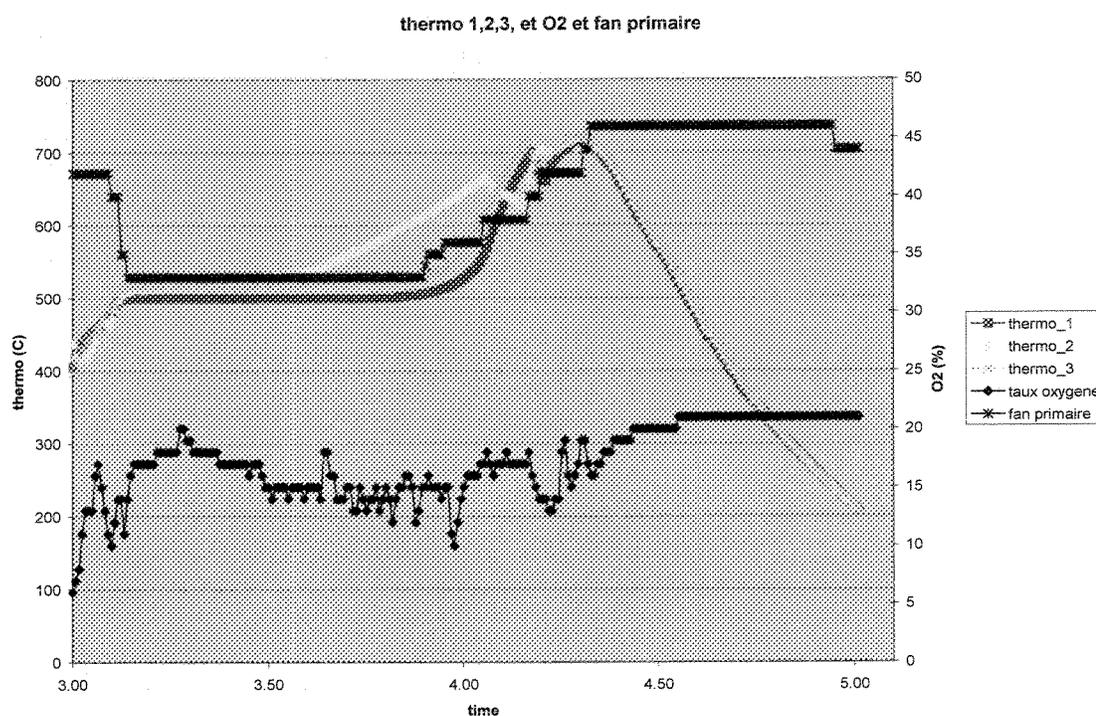


Figure 4.15 : Essai du lit fluidisé au démarrage

La figure 4.15 montre un essai de démarrage de combustion dans le lit fluidisé. On peut remarquer que les températures dans le lit fluidisé sont égales. C'est une preuve que le régime de fluidisation souhaité est atteint. On peut voir que l'augmentation de la température est due à une augmentation de la combustion liée au débit d'air qui augmente avec la vitesse du ventilateur. De plus, on voit que le taux d'oxygène stable durant l'augmentation de température est aussi une preuve que le débit de combustible augmente.

Le démarrage doit être fait en mode manuel et l'opérateur vérifie le régime de

fluidisation atteint dans la chambre de combustion. De plus la biomasse (écorce de sapin) contient du sable et provoque une augmentation de l'épaisseur du lit. Après environ 10h de fonctionnement, il faut vérifier la hauteur de sable (visuellement) et extraire du sable par le système d'extraction placé sous le générateur de vapeur. Car une augmentation de l'épaisseur de sable augmente les pertes de charges dans le lit donc les paramètres de fluidisation sont modifiés et le contrôleur n'a pas la capacité de s'adapter. Et à l'inverse, une vitesse de fluidisation trop grande (supérieure à la vitesse terminale des particules) emporte les particules de sables de petits diamètres et diminue l'épaisseur du lit de sable.

Les essais où les conditions de fluidisation sont réunies (après démarrage) montrent une souplesse quant à l'utilisation du générateur de vapeur. Les comportements de l'installation sont ceux attendus. La combustion se réalise rapidement sur la surface et à l'intérieur du lit fluidisé. Le contrôle de la température du sable avec le ventilateur primaire répond rapidement (figure 4.16).

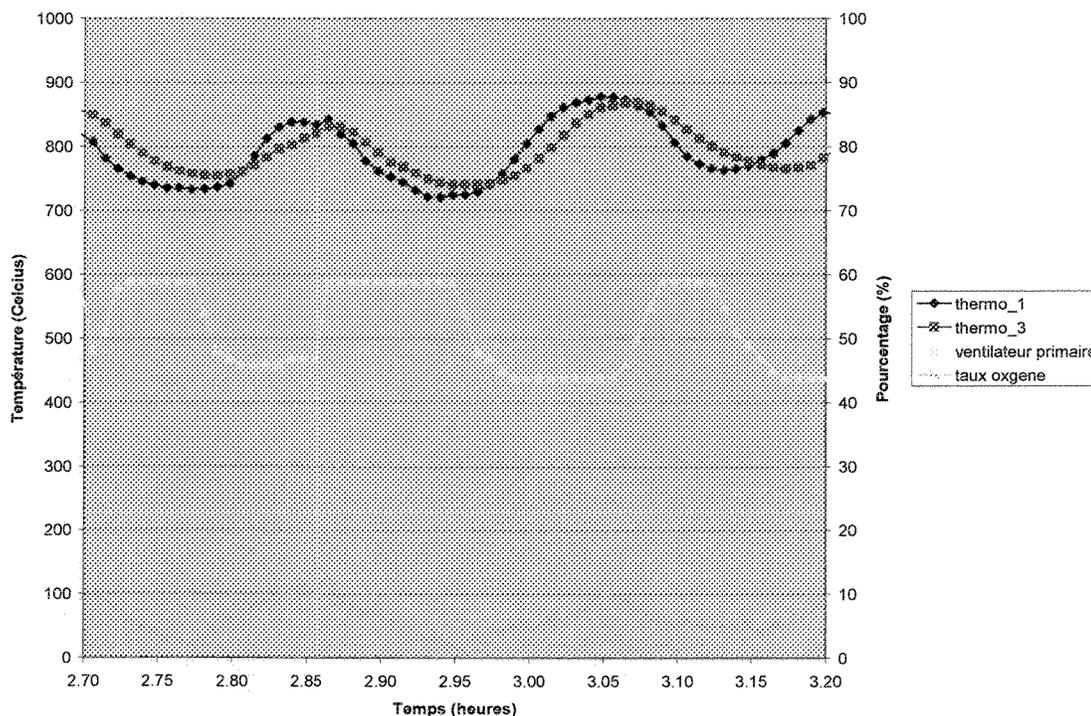


Figure 4.16 : Fonctionnement général du système de combustion

La figure 4.16 montre le fonctionnement général du système de combustion quand les conditions sont atteintes. Le lit fluidisé est chaud et l'on peut observer une variation de la température située entre 730 et 878°C. Le ventilateur primaire permet le contrôle de la combustion ainsi que la température du lit fluidisé. Sa variation est située entre 45 et 59%. Le taux d'oxygène varie entre 1 et 13%. Si le taux d'oxygène se rapproche de 0%, c'est l'indice qu'il y a combustion (admission de combustible dans la chambre) car l'oxygène prend place dans la réaction d'oxydation (comburant). À l'inverse quand le taux d'oxygène se rapproche de 21%, c'est l'indice que la combustion est presque complétée car l'oxygène n'est plus utilisé dans la réaction d'oxydation. Pendant cette période de fonctionnement, la production de vapeur pour répondre au procédé est en moyenne de 4600kg/h (figure 4.17).

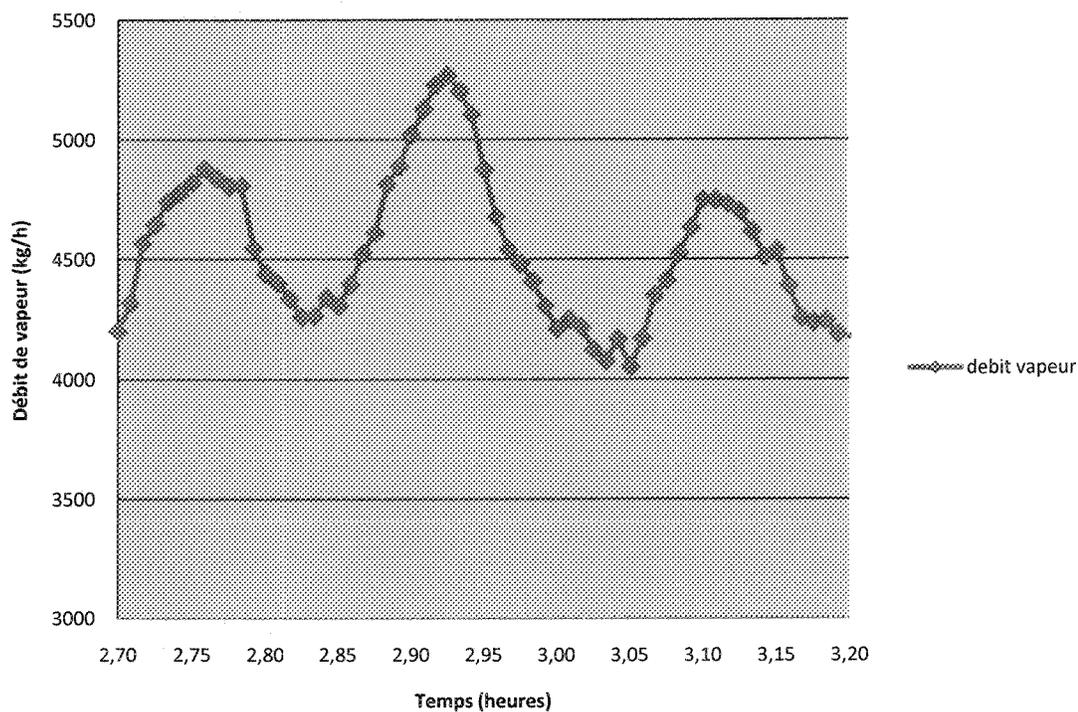


Figure 4.17 : Production de vapeur pour la période correspondant à la figure 4.16

La figure 4.17 montre la production de vapeur pour la période correspondant à la figure 4.16. Le débit de vapeur varie de 4200kg/h à 5500kg/h.

Le système de contrôle de combustion maintient la pression de vapeur constante (figure 4.18).

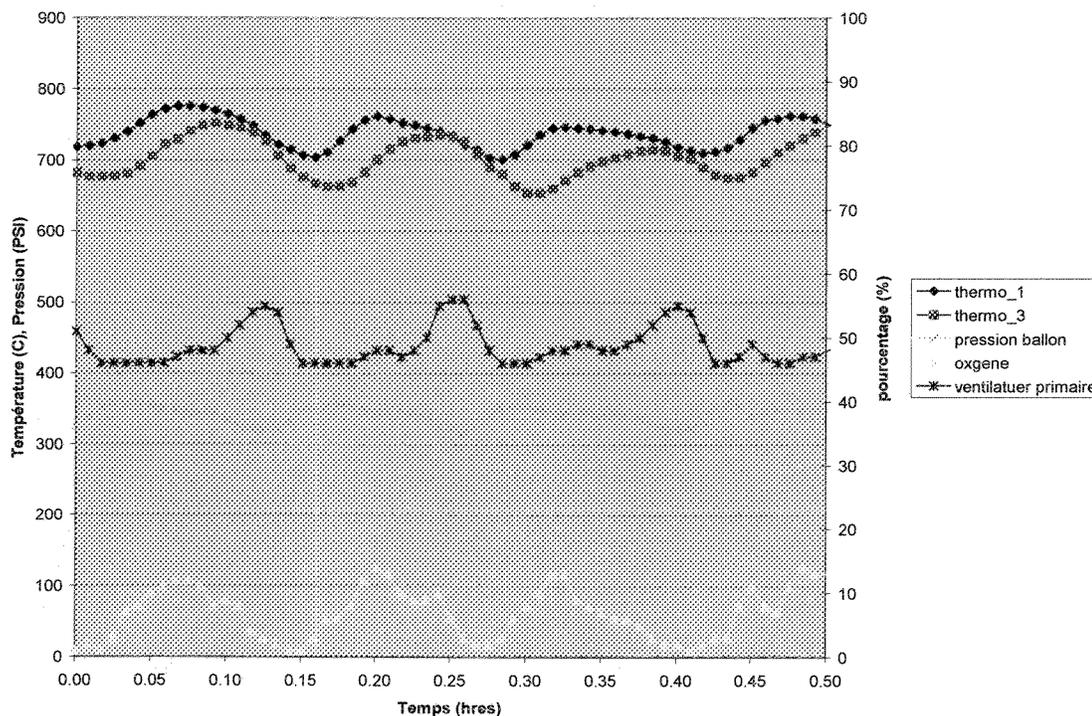


Figure 4.18 : Variation de la pression dans le temps en fonction du taux de combustion (1)

La figure 4.18 montre le maintien de la pression dans le générateur de vapeur en fonction du taux de combustion. La consigne est le maintien de 350PSI. Une baisse de pression a pour effet l'augmentation de la vitesse du ventilateur primaire et une augmentation de la combustion démontrée par une baisse du taux d'oxygène dans les gaz de combustion. On remarque aussi la variation de la température du lit fluidisé (650°C à 785°C). En comparaison avec la figure 4.16, la température du lit fluidisé est plus basse. La production de vapeur doit être moins élevée (Figure 4.19). La température du lit fluidisé représente la température d'équilibre de la combustion. La pression varie entre 356 et 320PSI ce qui représente une variation de plus ou moins 9% de la consigne. Pendant cette période de fonctionnement, la production de vapeur pour répondre au procédé (figure 4.19) est en

moyenne de 4000kg/h ce qui représente 600kg/h de vapeur non produite en comparaison à la figure 4.17.

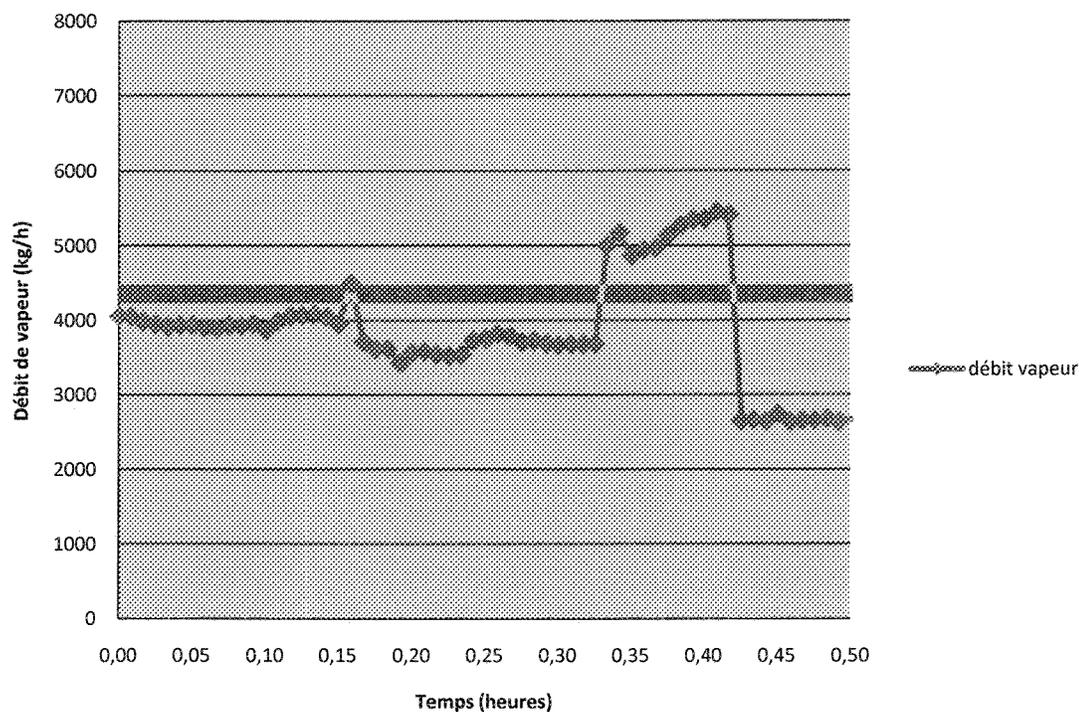


Figure 4.19 : Production de vapeur pour la période correspondant à la figure 4.18

La figure 4.19 montre la production de vapeur pour la période correspondant à la figure 4.17. Le débit de vapeur varie de 2700kg/h à 5400 kg/h. On remarque une forte variation de débit de vapeur pendant cette période. Cette forte variation est due à une ouverture rapide des valves du procédé de lactosérum suivie d'une brusque fermeture. Ce phénomène est une erreur d'opération du système ; cela est fréquent pendant les calibrations et mise en route des nouveaux procédés.

Un autre essai de variation de pression avec le générateur montre les mêmes caractéristiques de fonctionnement (figure 4.20).

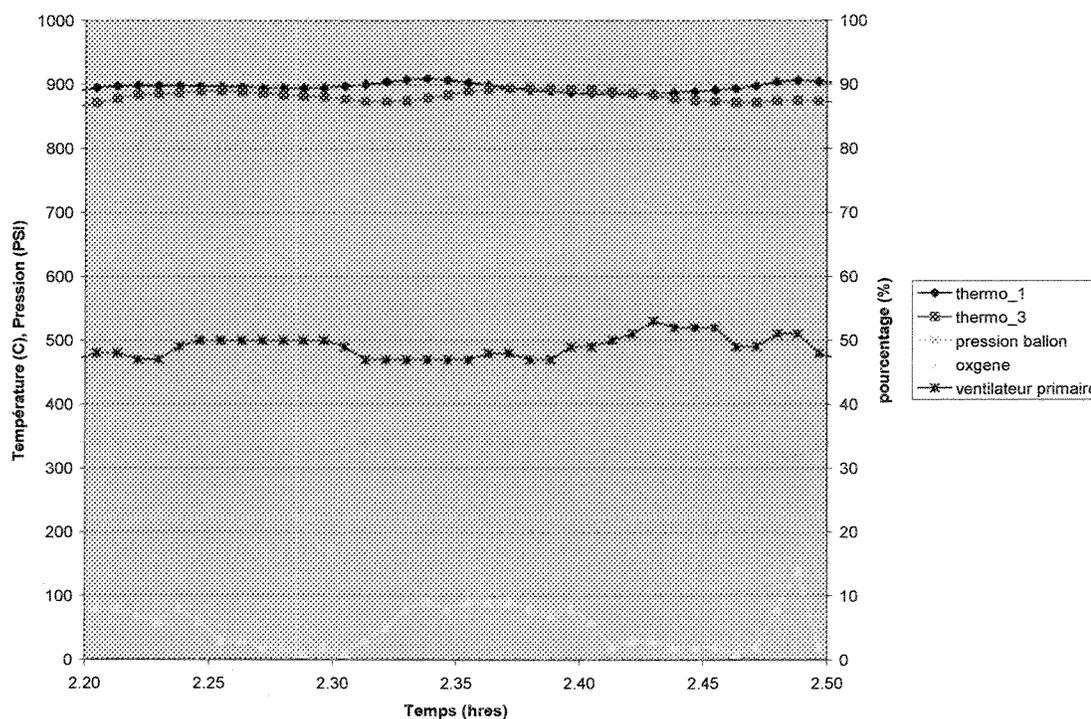


Figure 4.20 : Variation de la pression en fonction du taux de combustion dans le temps (2)

La figure 4.20 montre un deuxième essai de pression dans le temps en fonction du taux de combustion. La température du lit fluidisé varie entre 865°C et 915°C. La température du lit fluidisé résulte de l'équilibre thermodynamique dans la chambre de combustion. En comparaison avec la figure 4.18, les températures sont plus élevées, donc la production de vapeur doit être plus élevée (figure 4.20). La consigne de pression est 340PSI. La pression varie entre 344 et 326PSI ce qui représente une variation de plus ou moins 7% de la consigne. En comparaison au premier essai (figure 4.16), la variation du système autour du point de consigne a diminué (9% contre 7%). En effet, les réglages du contrôleur ont permis une amélioration de la réponse du système. On remarque que l'amplitude des oscillations de la pression du générateur a diminué. Le système est plus stable. Pendant

cette période de fonctionnement, la production de vapeur pour répondre au procédé est en moyenne de 6400kg/h (figure 4.21).

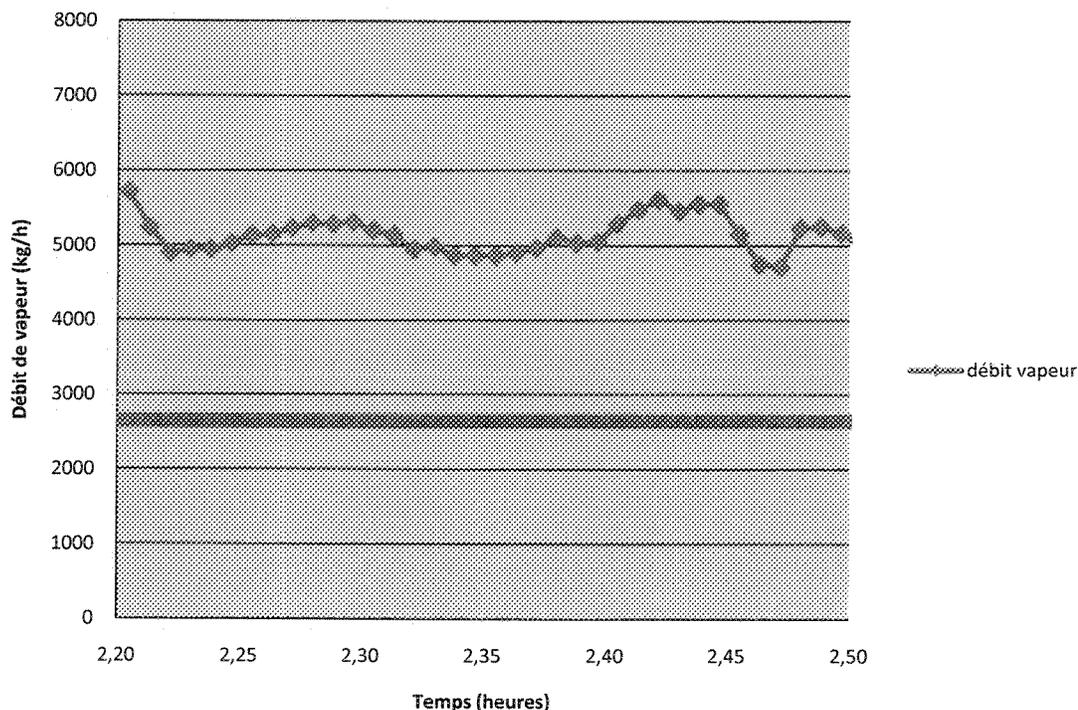


Figure 4.21 : Production de vapeur pour la période correspondant à la figure 4.19

La figure 4.21 montre la production de vapeur pour la période correspondant à la figure 4.20. Le débit de vapeur varie de 4000kg/h à 6000 kg/h.

4.4.3 ANALYSE ET DISCUSSION DU CONTRÔLEUR

Le troisième de nos objectifs, le développement d'un contrôleur nécessite une compréhension du procédé de fluidisation. Le contrôleur fonctionne correctement et actuellement les opérateurs prennent en main l'interface qui permet le contrôle de l'installation. Cette interface est conçue pour une utilisation sécuritaire du procédé et prends la forme d'un ordinateur industriel tactile placé à côté du foyer. Le procédé de la

combustion en lit fluidisé bouillonnant n'est pas maîtrisé par le contrôleur c'est-à-dire que l'opérateur prend une part importante dans la vérification du régime de fluidisation. En effet, l'absence de la mesure des débits d'air de combustion (primaire et secondaire) ne permet pas la détermination de la vitesse d'air de fluidisation dans le lit. De plus, la hauteur de sable n'est pas mesurée. Ces deux paramètres sont essentiels afin de caractériser le régime de fluidisation. Ensuite la granulométrie du sable imposée par la conception est la responsabilité de l'opérateur, car un changement de la taille des grains influence aussi les paramètres de fluidisation. Seul l'opérateur connaît l'état de la fluidisation par la surveillance de la combustion et des températures du lit de sable sur l'interface.

Le contrôleur est capable de répondre à la demande de vapeur. La réponse du système quant à une variation de la demande provient de l'établissement de courbes de combustion. Ces courbes vont varier proportionnellement la vitesse des ventilateurs primaire et secondaire ainsi que la vitesse de la vis sans fin d'alimentation en écorce. Le contrôleur n'a pas connaissance de la quantité d'air (débit) et de la quantité d'écorce prenant part à la combustion. La mesure du débit d'écorce est fonction de son taux d'humidité. Cette mesure peut être réalisée par une mesure du poids avant l'entrée dans le système. L'écorce n'ayant pas toujours la même géométrie (granulométrie) la vis sans fin d'alimentation n'est pas toujours remplie en quantité égale. Le contrôleur assume par commande proportionnelle la réaction de combustion. Les courbes de combustion sont établies par essais et erreur à l'intérieur du contrôleur et elles peuvent être modifiées en temps réel. Chaque changement discuté plus haut modifie les performances et le contrôleur n'a pas d'outil pour conserver le régime de fluidisation bouillonnant. Le contrôleur corrige

la combustion en temps réel avec la mesure du taux d'oxygène et ajuste la vitesse du ventilateur secondaire, mais les paramètres importants (débit d'air, débit de combustible) dépendent de l'opérateur et des courbes de combustion. Le développement de plusieurs courbes de combustion en fonction du type d'écorce (essence, humidité) facilite l'opération et cette option fait partie du contrôleur actuel.

L'importance du démarrage du procédé a été négligée lors de la conception de l'installation. On remarque qu'un préchauffage du sable à la température d'allumage de la biomasse permet une répétitivité du phénomène de combustion en lit fluidisé. Et une fois le lit à sa température de fonctionnement, on observe une combustion stable et rapide à des températures faibles diminuant la formation de polluants. Le démarrage de l'installation n'est pas totalement automatisé. Le contrôleur autorise le démarrage de l'installation après vérification des conditions initiales (niveau d'eau, pression vapeur, pression cheminée, température foyer) et la séquence de démarrage peut commencer. Cette séquence se résume à l'ignition de la flamme au propane dans la chambre de combustion, le combustible et le comburant sont gérés en mode manuel par l'opérateur. La puissance du brûleur de démarrage est sous estimée et ne permet pas le réchauffage du lit jusqu'à la température d'allumage de 750°C [24]. C'est pour cette raison que le démarrage ne peut pas être entièrement automatisé. Le brûleur au propane permet l'allumage de l'écorce dans le foyer mais en aucun cas le réchauffage du sable. Dans le but d'accélérer le pré chauffage du sable, l'ajout d'accélérateur (huile) dans le foyer avant la mise en route du brûleur auxiliaire diminue d'une heure le temps de démarrage.

La réponse du contrôleur face à la demande de vapeur est gérée par une boucle

fermée de type proportionnel, intégral et dérivé (PID). Les paramètres de cette boucle n'ont pas été déterminés par la méthode de calcul de la fonction de transfert mais par essais et erreurs. Le contrôleur offre une interface permettant de modifier les paramètres de tous les régulateurs de type PID en temps réel. Le calcul de ces paramètres avec la fonction de transfert nécessite une précision dans les valeurs utilisés (débits, chaleur spécifique de réaction de combustion, pouvoir calorifique, coefficient d'échange de chaleur,...). La détermination de ces valeurs résulte d'une estimation et n'a pas permis un calcul des valeurs des régulateurs.

Les résultats présentés au chapitre 4 sur le fonctionnement du contrôleur démontrent la souplesse d'utilisation d'un générateur à lit fluidisé pour la combustion des résidus forestiers. En effet, la variation de pression de vapeur se situe aux alentours de 7%. La réponse du système est rapide et stable une fois que l'installation est en régime permanent. La boucle de contrôle du taux de combustion a été ajustée par essais erreurs. Les variations du système (température, pression, etc.) ont été diminuées.

4.5 COMPARAISON DES ESSAIS DE L'INSTALLATION AVEC LE SIMULATEUR

Le simulateur est le deuxième objectif de cette maîtrise. Les valeurs calculées dans ce dernier sont les températures attendues dans le lit fluidisé. Après le démarrage de l'installation, une vérification des calculs est possible.

Le simulateur prédit la température du lit fluidisé d'environ 850°C pour un débit de vapeur se situant autour de 8000kg/h (critère de conception) (Figure 4.6). On remarque à la

figure 4.16 que la température de fonctionnement se situe entre 730°C et 878°C et le débit de vapeur moyen pour cette période d'essai est de 4850kg/h (Figure 4.17). Le simulateur prédit une température de 750°C (Figure 4.7).

À la figure 4.18, la température de fonctionnement du lit fluidisé se situe entre 650°C et 785°C et le débit de vapeur produit moyen est de 4000kg/h (Figure 4.19). Le simulateur prédit une température de 675°C (obtenu par interpolation à la Figure 4.7).

À la figure 4.20, la température de fonctionnement se situe entre 865°C et 915°C et le débit de vapeur produit moyen est de 5000kg/h. Le simulateur prédit une température de 810°C (Figure 4.7). On retrouve ces résultats compilés dans le tableau suivant (Figure 4.22) :

	CAS 1	CAS 2	CAS 3
Débit de vapeur mesuré	4850kg/h	4000kg/h	5000kg/h
Température prédite simulateur	750°C	675°C	810°C
Température mesurée	730°C entre 878°C	650°C entre 785°C	865°C entre 915°C

Figure 4.22 : Compilation des résultats (comparaison)

Le cas 1 et le cas 2 montre des résultats satisfaisant. Les températures prédites sont comprises dans l'échelle de variation mesurée. Le cas 3 montre un écart de 55°C entre la température minimum mesuré et la valeur prédite par le simulateur. Un combustible avec taux inférieur à 55% peut expliquer cette différence. Une température se situant entre 865°C et 915°C calculé par le simulateur supposerait un combustible avec un taux d'humidité pouvant varier de 40 à 55%. Pendant les essais de fonctionnement du générateur de vapeur, la détermination de l'humidité de la biomasse n'est pas simple. Un

échantillon prélevé dans la réserve d'écorce suivie d'une analyse dans un laboratoire permettrait la déduction du taux d'humidité.

Le simulateur ne prend pas en compte le rapport air primaire/air secondaire. L'air primaire étant l'air de fluidisation et l'air secondaire est l'air permettant de compléter la combustion au dessus du lit fluidisé. Le simulateur calcule la réaction de combustion avec un excès d'air de 30%. Une analyse approfondie des résultats devrait prendre en compte l'excès d'air mesuré par la sonde dans la cheminée. En effet, un excès d'air améliore la combustion dans le but de compléter la réaction. En contre partie, un fort excès d'air (supérieur à 40% de l'air théorique dans le cas d'une combustion d'écorce [30]) refroidi la température de combustion et par conséquent le lit fluidisé.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Les présents travaux de recherche se sont intéressés au développement d'une technologie de combustion des résidus forestiers. La combustion en lit fluidisé a été retenue pour ses caractéristiques d'un point de vue performance et efficacité. Cette technologie n'est pas assez utilisée pour permettre la réalisation d'une installation sans recherche ni développement. Les résultats directs de ces travaux de recherche ont permis une meilleure compréhension du phénomène de combustion en lit fluidisé ainsi que le développement d'une installation de 6MWth dans la région du Saguenay Lac St Jean.

Dans un premier temps, la conception d'un lit fluidisé pour la combustion de biomasse a été étudiée. La compréhension du phénomène de fluidisation a permis d'apporter les connaissances nécessaires à une application pratique : la réalisation d'une grille de fluidisation pour la combustion. L'importance de la forme des buses de fluidisation afin d'assurer une fluidisation homogène a mis en évidence la complexité de la conception d'un tel système de combustion. Les essais en laboratoire sur le mélange du sable et de la biomasse ont montré l'importance de la hauteur de sable pour assurer une bonne

fluidisation et non un mélange (la combustion est réalisée sur une couche supérieure). Ainsi les pertes de charges sont diminuées, les dimensions du ventilateur d'air de fluidisation aussi. De plus, le volume d'air assurant la combustion est directement lié au calcul de vitesse de fluidisation qui elle-même définit le régime de fluidisation. Une fluidisation homogène est le critère clé d'une bonne conception. L'apparition de points chauds témoigne d'une mauvaise fluidisation et on observe la formation d'un mélange de sable et de cendres fondues (eutectique) dans le lit. Ces eutectiques déstabilisent la fluidisation et diminuent fortement l'efficacité d'une telle installation. Le logiciel utilisé pour la conception de la grille de fluidisation (Ergun [28]) a allégé les séries de calculs pour le dimensionnement. L'utilisation d'un tel logiciel montre l'importance de maîtriser les connaissances de la fluidisation pour interpréter correctement les résultats. L'utilisation du matériau granulaire (sable) doit aussi faire partie des hypothèses. L'utilisation d'un lit fluidisé dépend directement du matériau granulaire disponible localement : le régime de fluidisation est influencé par le diamètre des particules. Dans le cas d'une application pour la combustion, l'utilisation de particules ayant toutes le même diamètre accroît les coûts de gestion d'une telle installation. L'utilisation d'un matériau à granulométrie variable nécessite l'approfondissement des calculs. Les objectifs quant au fonctionnement du lit fluidisé ont été atteints : dimensionnement des buses, homogénéisation de la fluidisation et l'application à la combustion.

Dans un deuxième temps, le développement d'un simulateur de transfert de chaleur, permet de vérifier la capacité de la chaudière pour la production de vapeur. Une particularité de ce projet provient de l'existence du squelette de la chaudière avant la

conception du système de combustion. Les attentes de production de vapeur étaient déjà fixées et la vérification du bilan thermique de l'installation était nécessaire. Le débit de résidus forestiers comme combustible est directement lié à la performance de la combustion et donc du fonctionnement du lit fluidisé. De plus, le dimensionnement des équipements périphériques (système d'alimentation) dépend de ce bilan. L'étude des transferts thermiques à l'intérieur de la chaudière a été effectuée. Les échanges sont complexes et démontrent que les variations des grandeurs thermophysiques doivent être prises en compte pour diminuer les erreurs de calculs liées leurs variations en fonction de la température. Le phénomène de rayonnement dans la chambre de combustion a été approché en fonction du mélange des gaz dû à la combustion. Cette méthode offre une précision supérieure par rapport à une méthode ne prenant en compte que les températures en jeu. Ensuite, le phénomène de convection dans la chaudière a lui aussi été approché de manière à obtenir une précision dans les calculs : le calcul des nombres adimensionnels liés aux échanges de chaleurs par convection (Reynolds, Nusselt, Prandtl) à chaque itération. Le développement d'un simulateur de calcul dans lequel les propriétés thermophysiques (chaleur spécifique, conductivité, etc) des fluides (air, gaz de combustion, eau) ont pris la forme de base de données, permet une précision dans les itérations. La variation des températures pendant les calculs nécessite de modifier la valeur des grandeurs thermophysiques et est rendu possible avec ce simulateur. Le phénomène de transfert de chaleur dans un lit fluidisé demeure complexe mais il doit être pris en compte dans la réalisation d'un bilan thermique. La convection, la conduction et le rayonnement prennent part à l'intérieur de celui-ci. Il existe des corrélations afin de quantifier les échanges à l'intérieur d'un lit fluidisé bouillonnant et

les résultats ont été introduits dans le simulateur afin de compléter le bilan. Dans notre cas, l'absence d'échangeur à l'intérieur du lit fluidisé n'améliore pas de façon significative la précision du simulateur. Par contre, la conduction et la convection dans le foyer (sable/réfractaire) doivent être prises en compte. Les résultats du simulateur ont pu être comparés avec le fonctionnement réel de l'installation. Les températures d'équilibre dans le lit fluidisé étaient des inconnues avant la réalisation du simulateur. Les différences entre le fonctionnement de l'installation et les résultats du simulateur sont acceptables (6%). Les résultats de la consommation de biomasse comme combustible évalués par le simulateur ne sont pas comparables car la mesure de la consommation n'est pas faite réellement dans l'installation. La réalisation de ce simulateur a montré la complexité des calculs d'échanges de chaleur dans une chaudière. Le rayonnement des gaz de combustion, la convection dans les échangeurs spécifiques (surchauffeur, économiseur) ainsi que les inconnues quant à une combustion en lit fluidisé ont été étudiés et appliqués.

Dans un troisième et dernier temps, le développement d'un contrôleur nécessite une compréhension du procédé de fluidisation. Le contrôleur est capable de répondre à la demande de vapeur et assure une pression de vapeur stable (7%). Le contrôle de la combustion des résidus forestiers en lit fluidisé diffère des installations plus classiques (grilles). Ces différences (régime de fluidisation, granulométrie, vitesse minimum de fluidisation...) ont été intégrées avec succès au système de gestion d'un tel procédé. L'importance du démarrage du procédé a été négligée lors de la conception de l'installation. On remarque qu'un préchauffage du sable à la température d'allumage de la biomasse permet une répétitivité du phénomène de combustion en lit fluidisé. Et une fois le

lit à sa température de fonctionnement, on observe une combustion stable et rapide à des températures faibles diminuant la formation de polluants. Le contrôleur a été développé de façon à répondre aux exigences de sécurité liées à l'exploitation d'installations sous pression.

Finalement, ce projet de maîtrise a permis l'étude du phénomène de combustion en lit fluidisé bouillonnant et le développement d'un système de combustion adapté. Certains aspects (le démarrage, le contrôle de l'installation et la modification du simulateur) doivent être approfondis par des études et analyses additionnelles et sont recommandés et discutés dans le chapitre suivant.

Ce projet permet l'implantation d'une technologie peu connue en Amérique du Nord. Les défis de conception d'un système de combustion en lit fluidisé démontrent la volonté d'une entreprise à investir dans la recherche et le développement et à prendre une place importante dans le nouveau marché des résidus forestiers. Ceci contribue sans aucun doute à étendre l'expertise régionale du Saguenay Lac Saint Jean.

Enfin, ce projet est de mise avec les préoccupations actuelles de protection de l'environnement et de développement durable.

CHAPITRE 6

RECOMMANDATIONS

Les travaux effectués dans le développement d'une technologie de combustion des résidus forestiers ont permis de fournir une bonne compréhension du phénomène de la fluidisation appliquée à la combustion et une méthode de conception d'un tel système. Cependant, une étude plus approfondie du phénomène de fluidisation permettrait une optimisation de la conception. Dans un premier temps, un montage expérimental permettrait de réaliser une série de mesures afin d'approfondir la compréhension du rôle de la vitesse de fluidisation, la hauteur du lit, le diamètre des particules ainsi que les pertes de charge au travers du lit. Ainsi, une optimisation pourrait être réalisée comme le dimensionnement des ventilateurs et des buses de fluidisation. Dans un deuxième temps, l'étude du transfert de chaleur dans le lit fluidisé permettrait une précision dans les calculs de bilan thermique. Le développement d'un simulateur afin d'évaluer les capacités thermique de la chaudière a permis une approche par bilan énergétique dans le but d'optimiser la conception. Cependant, le simulateur pourra faire l'objet de modifications. L'étude de la cinétique de la combustion en lit fluidisé devrait être effectuée afin d'évaluer

la part de la réaction se réalisant au-dessus du lit et la part de la réaction prenant place à l'intérieur du lit. Cette étude viendrait compléter les essais expérimentaux de transfert de chaleur dans le lit et permettrait l'amélioration du simulateur ainsi que les calculs de conception. De plus, la prise en compte des rapports air primaire sur air secondaire ne fait pas partie du simulateur. L'air primaire pour la fluidisation est supposé l'air nécessaire pour la combustion. La présence d'un ventilateur secondaire permet d'ajuster la combustion en complétant celle-ci. La part de la combustion prenant place au-dessus du lit est complétée par le ventilateur secondaire dans la réalité mais pas dans le simulateur. L'ajout de cette option améliorera les calculs en vue d'une meilleure conception.

Le développement du contrôleur du système pourrait quant à lui faire aussi l'objet de modifications. L'étude expérimentale du lit fluidisé ainsi que l'étude de la réaction de combustion permettrait un contrôle plus global de l'installation. En effet, le contrôleur n'a pas d'indice pour le régime de fluidisation et l'étude expérimentale du lit le permettrait. L'étude du transfert de chaleur dans le lit ajouterait les possibilités de préchauffer le lit fluidisé au démarrage de l'installation. De plus, le contrôle et le maintien de la température du lit fluidisé permettrait l'amélioration du contrôle de l'installation et ainsi de garantir une combustion efficace à n'importe quel régime de production de vapeur.

La formation d'eutectique dans le lit (fusion des cendres) pose un réel problème quant à la stabilité de l'installation en provoquant un arrêt de la fluidisation localement. Les recommandations discutées plus haut diminueraient de façon significative ce problème sans pour autant l'éliminer totalement. Plusieurs solutions existent déjà et pourraient faire l'objet d'une étude quant à leurs utilisations et réalisations.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] http://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9ron_d%27Alexandrie
- [2] http://www.azprocede.fr/com_gc/combustion_chaudiere.html
- [3] Department of the army, *Technical manual, Central Boiler Plants*, Octobre 1989
- [4] Yunus A. Cengel, *Heat and Mass Transfer*, 3^{ème} édition
- [5] Khali Shakourzadeh, *Calcul des réacteurs à lit fluidisés*, Technique de l'ingénieur, J4100-2
- [6] D. Geldart, *Large particle fluidisation*, John Wiley & Son. 1973
- [7] G.F. Gilman, *Boiler Control Systems Engineering*, 2005
- [8] Prabir Basu, *Combustion and gasification in fluidized bed*, Taylor&Francis, 2006
- [9] S.N Oka, *Fluidized Bed Combustion*, Marcel Dekker, Inc., New York 2004.
- [10] R. Gadiou, *La combustion en lit fluidisé*, juin 2002
- [11] S. Ergun, *Chem. Eng. Prog.*, 48:89, 1952
- [12] Wen, C.Y. and Yu, C.H., *Generalized method for predicting the minimum fluidisation velocity*, *AIChEJ*, 12, 612, 1966
- [13] Simeon N. Oka, *Fluidized Bed Combustion*, Marcel Dekker, 2004
- [14] Khali Shakourzadeh, *Techniques de fluidisation*, J 3 390
- [15] Varygin, N.N. and Martyushin, I.G., *Calculation of the heat transfer surface in fluidised bed equipment*, 5,6-9, 1959
- [16] Baskakov, A.P. and Al, *Heat transfer to objects immersed in fluidised beds*, *powder technol.* 8, 273-282, 1973
- [17] Baskakov, A.P., *Radiative heat transfer in fluidised bed*, in *fluidisation*, Davidson, J.F., Ed., Academic press, London, 1985, chap. 13B

- [18] Grace, J.R., *Fluidised bed hydrodynamics*, in handbook of Multiphase systems, Hetsroni., G., Ed., Hemisphere Press, Washington, 1982, Sect.8.1
- [19] Darton and al., *Bubble growth due to coalescence in fluidised beds*, Trans. Inst. Chem. Eng., 55, 274, 1977
- [20] Guadalupe Ramos Caicedo, Monica Garcia Ruiz, Juan J. Prieto Marqués, Jesus Guardiola Soler, *Minimum fluidization velocities for gas-solid 2D beds*, Chemical Engineering and Processing 41 (2002) 761-764
- [21] Merry, J.M.D., *Penetration of a horizontal gas jet into a fluidised bed*, Trans. Inst. Chem. Eng., 49, 189, 1971
- [22] Geldart, D., *Gas fluidization technology*, Ed. John Wiley & sons, 1986
- [23] G.F. Gilman, "*Boiler Control Systems Engineering*", 2005
- [24] Stulz et Kitto, *Steam-its generation and use Babcock and Wilcox*, 40th edition, pp.16-17, 1992
- [25] A.J Croxford, M.A. Gliberton, *Control of the state of a bubbling fluidized bed*, Chemical Engineering Science 61 (2006) 6302-6315
- [26] Laszlo Kiss, Géza Walter and al, *Heating patterns produced by different industrial flame types*, Université du Québec à Chicoutimi
- [27] NQ 3650-900, "*Code d'installation de appareils sous pressions*", Bureau des Normalisation du Québec, 1989
- [28] Khali Shakourzadeh, *Ergun Software*, Université de compiègne (UTC), Paris, France.
- [29] NFPA 85, "*Boiler and Combustion Systems Hazards Code*", 2007 Edition
- [30] Basu, P., Kefa, C. and Jestin, L., *Boilers and Burners Design and Theory*, Springer, New-York, 2000
- [31] Everett, B. Woodruff, Herbert, B. Lammers, Thomas F. Lammers, *Steam Plant Operation*, eight edition, Mc Graw Hill, 2005
- [32] Bernard Eyglument, *Thermique théorique et pratique*, Hermes, Paris, 1994

ANNEXE 1 : GRAPHIQUE DE L'ÉMISSIVITÉ DU CO₂ ET H₂O DANS UN
MÉLANGE DE GAZ NON PARTICIPANT

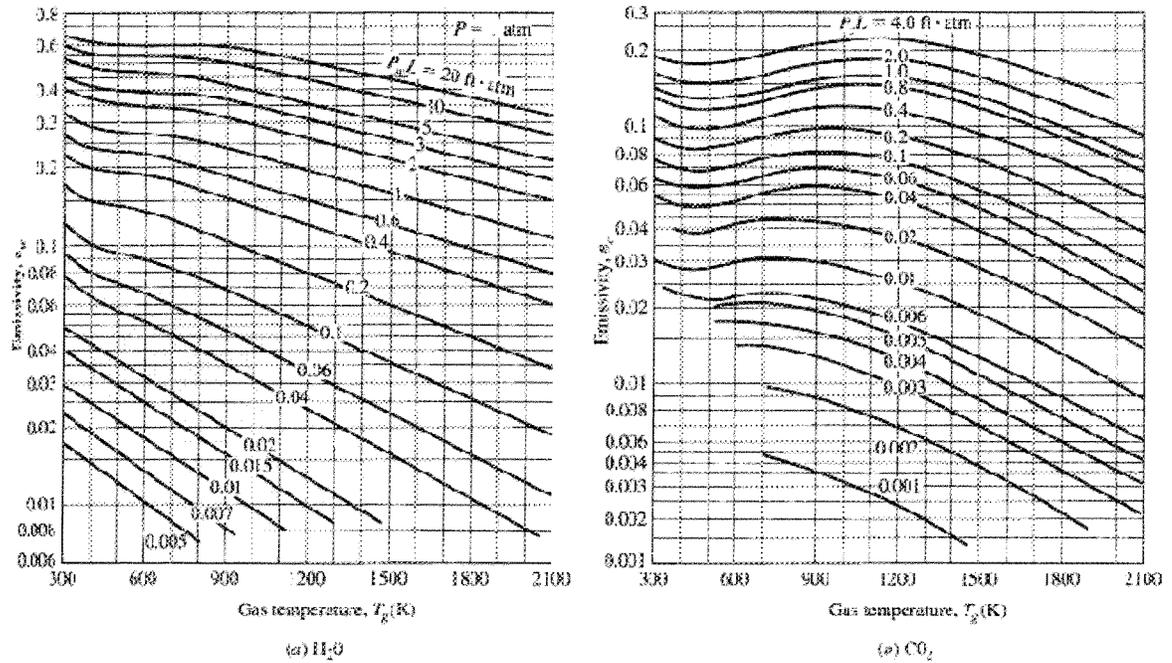


Figure A1.1 : Graphique de l'émissivité du CO₂ et H₂O [4]

ANNEXE 2 : GRAPHIQUE DE CORRECTION DE L'ÉMISSIVITÉ QUAND CO₂
ET H₂O SONT PRÉSENTS DANS UN MÉLANGE DE GAZ

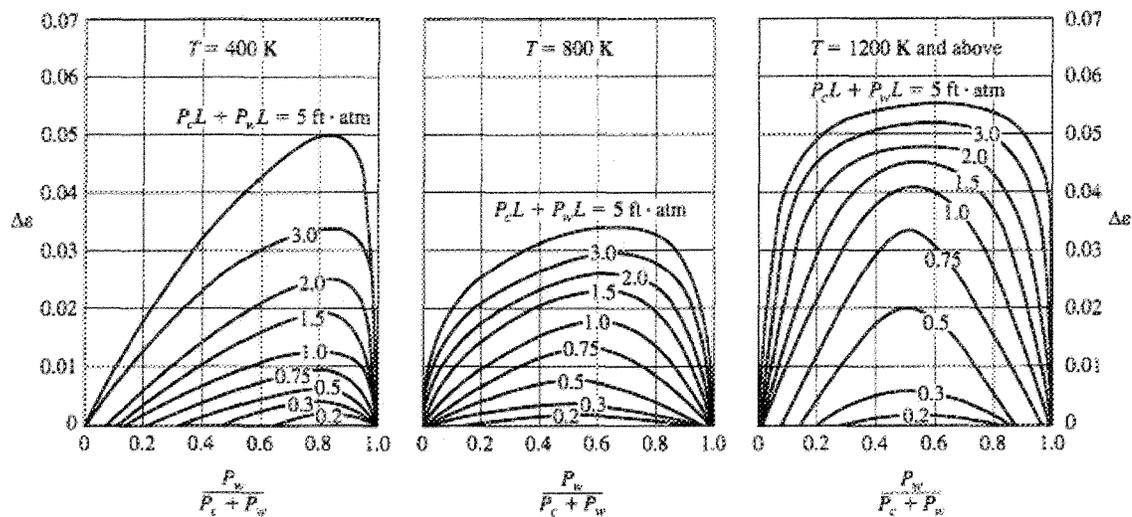


Figure A2.1 : Graphique de correction de l'émissivité [4]

ANNEXE 3 : CALCUL DE L'ÉMISSIVITÉ EFFECTIVE POUR DES TUBES AVEC DES AILETTES

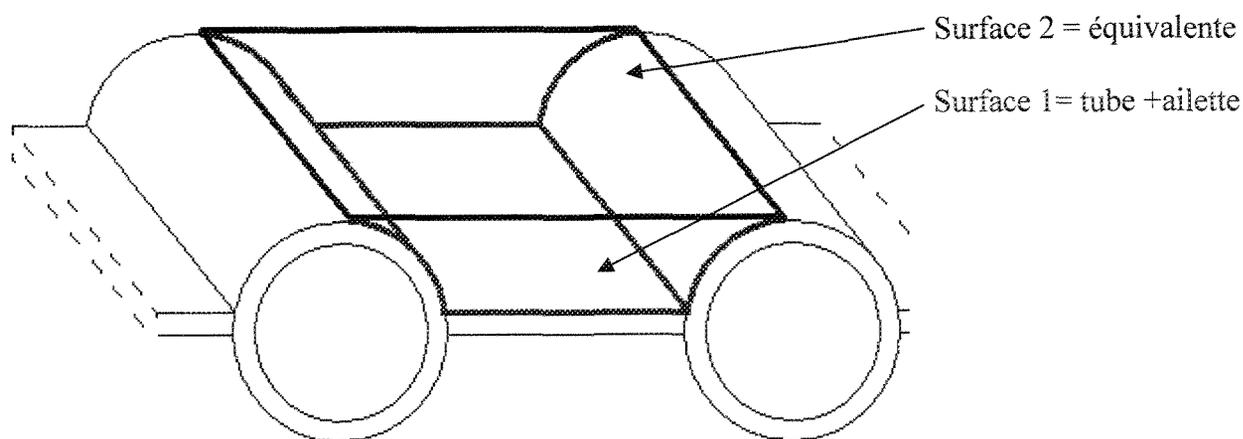


Figure A3.1 : Échangeur tubes ailettes

Le transfert de chaleur par rayonnement entre plusieurs surfaces dépend de l'orientation des surfaces entre elles, de leurs propriétés radiatives (émissivité) et de leurs températures. Pour prendre en compte cet effet, on définit le facteur de forme qui est fonction uniquement de la géométrie. Dans le cas des surfaces d'un générateur de vapeur (tube et ailettes) (Figure A-26), une fraction du rayonnement quittant les tubes rayonnent sur les ailettes et sur l'environnement. Cette géométrie rend la détermination du facteur de forme complexe. Dans le but de simplifier et d'obtenir une émissivité effective équivalente de la surface, on définit une nouvelle surface équivalente (fictive), et obtient l'émissivité de la manière suivante :

$$A_2 * E_{eff} = A_1 * F_{12} \quad (A3-1)$$

L'équation A3-1 met en évidence la relation entre la surface 1 et la surface équivalente en

fonction du facteur d'échange total. Dans cette équation, la détermination de l'émissivité effective dépend du facteur F12. Le facteur F12 est égal à :

$$F_{12} = \frac{1}{\frac{1-E_1}{E_1} + \frac{A_1}{A_2}} \quad (\text{A3-2})$$

Ensuite on remplace dans A3-1 et on obtient l'expression de l'émissivité effective de la surface équivalente (fictive) :

$$E_{ff} = \frac{\frac{A_1}{A_2}}{\frac{1-E_1}{E_1} + \frac{A_1}{A_2}} \quad (\text{A3-3})$$

L'équation A3-3 permet le calcul de l'émissivité de la surface équivalente et simplifie le calcul de l'échange radiatif sur des parois de chaudière.

**ANNEXE 4 : VALEUR DES COEFFICIENTS DU NOMBRE DE NUSSOLT POUR
UN ÉCHANGEUR À FLUX CROISÉ AVEC PLUSIEURS SÉRIES DE TUBES**

Nusselt number correlations for cross flow over tube banks for $N > 16$ and $0.7 < Pr < 500$ (from Zukauskas, 1987)*

Arrangement	Range of Re_D	Correlation
In-line	0-100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	100-1000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000- 2×10^5	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	2×10^5 - 2×10^6	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Staggered	0-500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500-1000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000- 2×10^5	$Nu_D = 0.35 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	2×10^5 - 2×10^6	$Nu_D = 0.031 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

*All properties except Pr_s are to be evaluated at the arithmetic mean of the inlet and outlet temperatures of the fluid (Pr_s is to be evaluated at T_s).

Figure A4.1 : Coefficient du nombre de Nusselt pour un échangeur [4]

Remarques : dans ce tableau, il faut lire « in line » pour un échangeur dont les tubes sont en lignes et « staggered » pour un échangeur dont les tubes sont croisés.

ANNEXE 5 : DIAGRAMME DES PERTES DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT D'UNE CHAUDIÈRE SELON LES NORMES DE L'ABMA

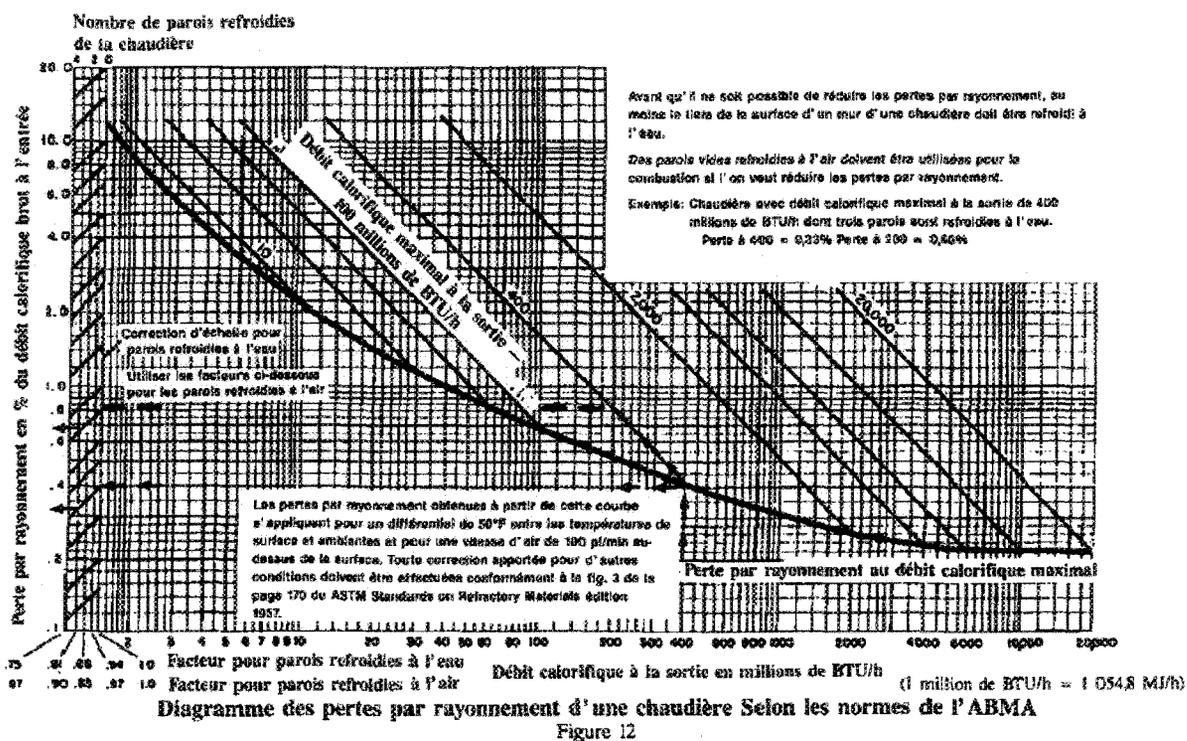


Figure A5.1 : Tableau des pertes pour un générateur de vapeur

ANNEXE 6 : FONCTIONNEMENT DÉTAILLÉ DU SIMULATEUR

Un schéma de principe du générateur est présenté à la figure A6.1.

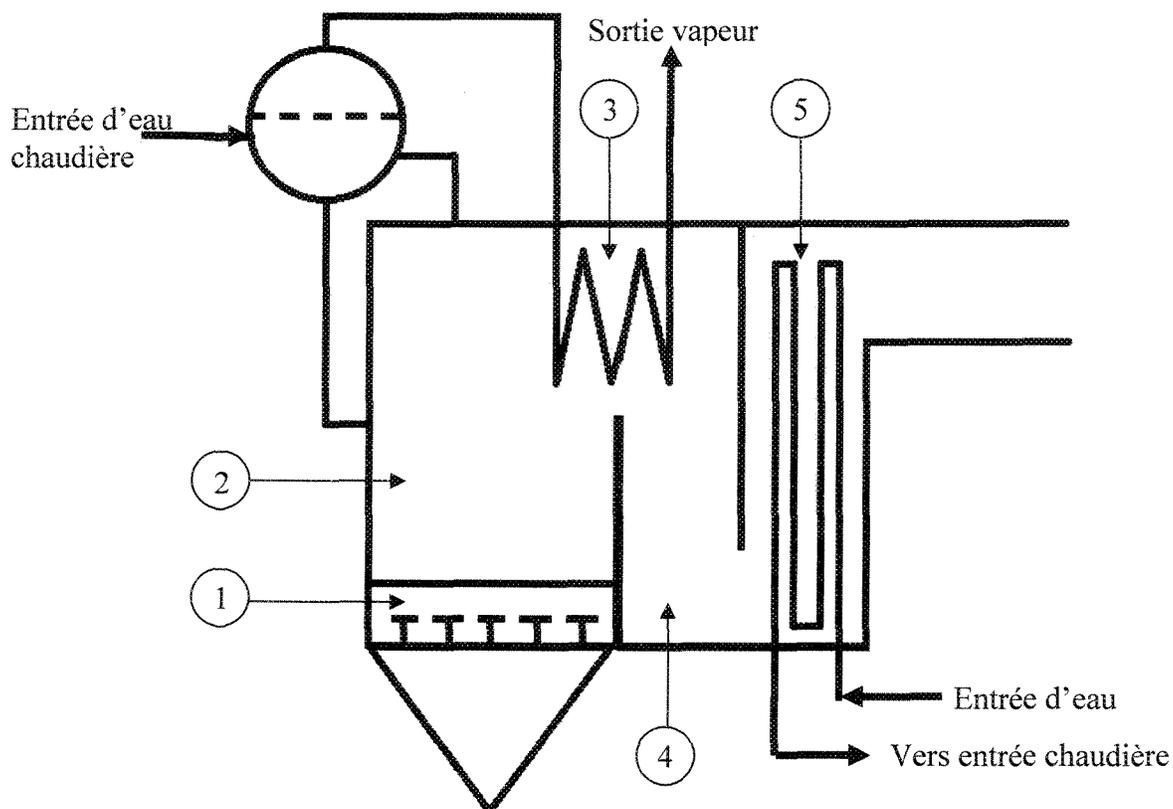


Figure A6.1 : Schéma de principe du générateur de vapeur

La figure A6.1 représente un schéma de principe du générateur de vapeur installé à la Fromagerie Boivin. Le simulateur est séparé en cinq (5) sections :

1. le lit fluidisé;
2. la chambre de combustion;
3. le surchauffeur de vapeur;
4. la chambre de convection;
5. l'économiseur.

Chaque section est divisée en huit (8) sous sections dans lesquelles le simulateur réalise les itérations. Cette démarche est un bilan d'énergie dans un volume (sous section) et permet l'équilibre entre les sections (volume). Le bilan sur un volume tient compte de l'état avant et après, soit les températures. Cet équilibre nous conduit aux températures nécessaires pour respecter les conditions. Par exemple, si on regarde la chambre de combustion (section 2) (figure A6.2).

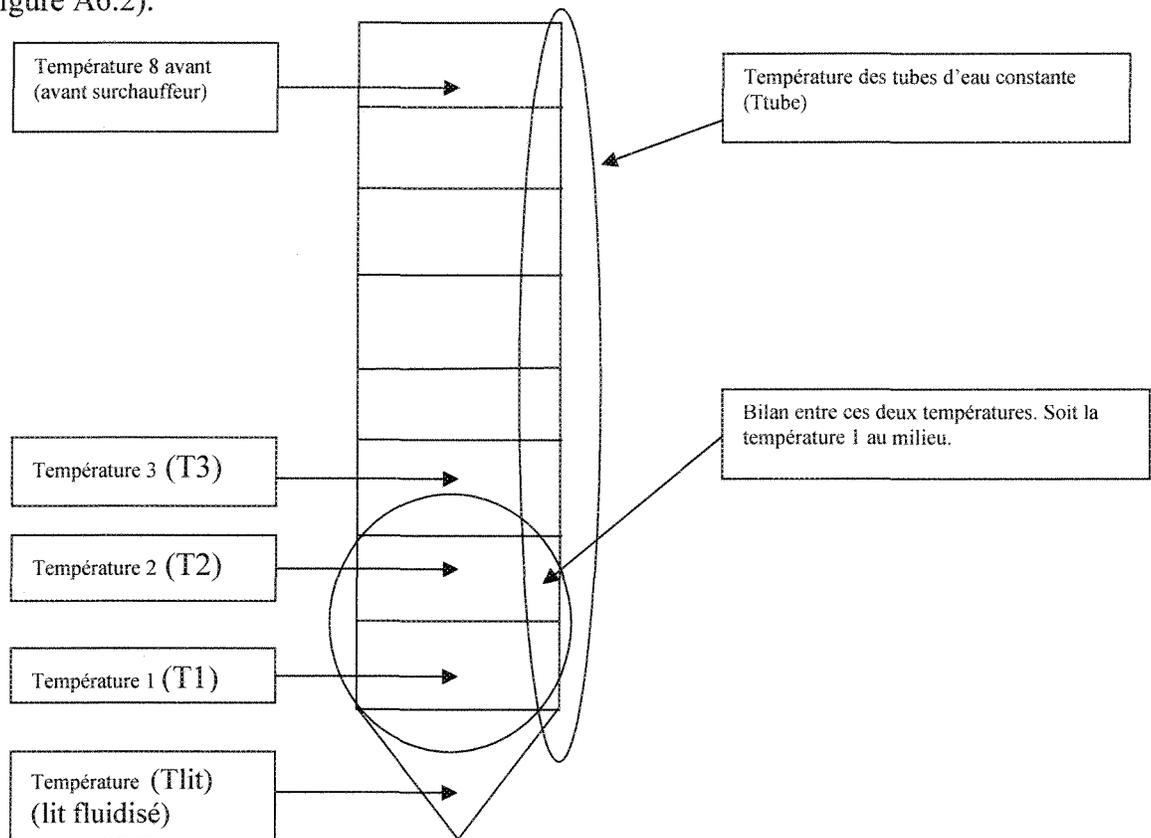


Figure A6.2 : Schéma du principe itératif du simulateur

Le simulateur calcule une température d'équilibre du lit fluidisé en fonction d'un débit de combustible supposé. Le simulateur possède une base de données avec les caractéristiques du combustible (pouvoir calorifique, volume des gaz de réactions, caractéristiques des gaz) permettant le calcul de la température d'équilibre du lit fluidisé ainsi que les calculs des coefficients d'échanges de chaleurs (chapitre 2.4). Soit le bilan d'énergie est de la forme :

l'énergie qui entre dans le volume est égal à l'énergie sortant du volume. Selon la figure A6.2 le bilan serait :

$$m * Cp * (T1 - T2) = h * S * \left[\left(\frac{T1 + T2}{2} \right) - T_{tube} \right] \quad (\text{eq A6.1})$$

Avec m débit massique des fumées en kg/s, cp chaleur spécifique des fumées en J/kg.°C, h coefficient d'échange convectif en W/m².°C, S surface d'échange en m². La figure A6.3 montre l'arbre de décision du simulateur.

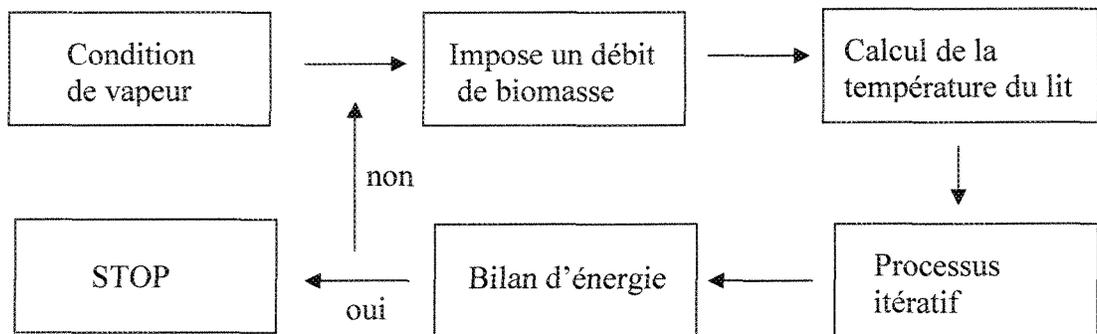


Figure A6.3 : L'arbre de décision du simulateur

On impose au simulateur un besoin en vapeur (débit). Ensuite, le simulateur utilise le résultat de la température du lit (eq A6.1) pour faire une première itération et obtenir un bilan total dans la chaudière. Le code vérifie que l'énergie transféré à l'eau ainsi que les pertes sont égales à l'énergie introduites. Ensuite, il vérifie que l'énergie nécessaire au besoin de vapeur est respectée. Dans le cas où le bilan n'est pas respecté, il suppose un nouveau débit de combustible (figure A6.3) et recommence le processus jusqu'à l'équilibre du système.

ANNEXE 7 : DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU GÉNÉRATEUR DE VAPEUR

(Ce document est présenté dans sa forme originale)

INTRODUCTION

Dans le cadre du projet de la *Fromagerie Boivin* située à la ville de *LaBaie* réalisé en partie par *BFI* et en coopération avec *l'Université du Québec à Chicoutimi* nous devons déterminer les caractéristiques de fonctionnement de l'installation.

Le but de ce document vise la description complète de la marche de la chaudière afin de comprendre et de permettre le codage informatique de la régulation. Nous commencerons par définir le matériel nécessaire et ensuite une explication détaillée rendra la compréhension facilitée.

Ce document restera confidentiel, et appartient en totalité au rédacteur soit *Anthony Goncalves* et à l'UQAC. L'utilisation par *BFI* (et uniquement) du présent document est autorisée.

GENERALITES

La régulation des équipements sous pression nécessite une précaution particulière dans le choix des équipements et du câblage de ceux-ci. Pour une plus grande sécurité, il existe une technologie de capteur dit « autocontrôle » qui coupe l'installation dans le cas où c'est l'appareil de mesure ou de contrôle qui ne fonctionne plus. De plus cette technologie permet une gestion plus efficace de la maintenance, réduction des coûts et temps d'arrêt.

Ensuite, le câblage de l'installation devra être réalisé en *normalement ouvert*, ce qui permet en cas de coupure d'énergie, un arrêt total des équipements. Il faudra aussi protéger l'installation contre les surintensités et courts-circuits, mise à la terre des masses et une protection contre les démarrages intempestifs des appareils.

Puis il faudra prendre des dispositions particulières quant aux règles et lois régissant les sécurités de la gestion des équipements sous pression de la législation canadienne et/ou québécoise.

DESCRIPTION DU MATÉRIEL

MATERIELS DE SECURITE

Dans un premier temps, la chaudière devra être équipée avec l'équipement suivant dans le but de protéger son environnement ainsi que l'installation.

- Soupape de sécurité (une ou deux) et avec thermostat optionnel ;
- Pressostat de sécurité maximum (un ou deux) ;
- Capteur de niveau très bas (un ou deux) ;
- Capteur de niveau très haut ;
- Un indicateur de niveau visuel ;
- Pressostat sur l'air comburant ;
- Un indicateur manque de combustible provenant de la gestion du combustible ;
- Pressostat sur le combustible (mini et/ou maxi, électrovanne, dans notre cas pour l'allumage) ;
- Niveau bas dans le ballon de réserve d'eau (dérive ou sécurité) ;

- Capteur de pression dans le lit.

MATERIELS DE CONTRÔLE ET DE REGULATIONS

Régulation de niveau d'eau :

- Sonde capacitive 4-20mA ;
- Régulateur type PID ;
- Vanne modulante ;

Régulation sur la combustion :

- un programmeur pour les courbes de combustions ;
- une action sur le débit de combustible ;
- une action sur le débit d'air primaire et secondaire ;
- une sonde de présence de flamme ;
- un thermocouple immergé dans le lit ;
- un capteur transmetteur de pression 4-20mA ;
- un régulateur faisant appel à la courbe de combustion.

ARCHITECTURE DE LA LOGIQUE DE L'INSTALLATION

CHAINE DE SECURITES

Une chaîne de sécurité permet une dominance sur la régulation. Si la régulation dépasse ces limites, (dépassement de pression, niveau trop bas...) c'est la chaîne de sécurité qui permet de stopper le système et la mise en sécurité de ce dernier.

Une chaîne de sécurité *électromécanique* est mise en œuvre pour provoquer un *arrêt*

verrouiller de l'installation.

L'ensemble est protégé par une chaîne de mise à l'arrêt volontaire.

CHAINE DE SECURITE ELECTROMECHANIQUE

La chaîne de sécurité électromécanique devra être actionnée par la mise en série des contrôles suivants :

- niveau bas chaudière (un ou deux) ;
- excès de pression ;
- seuil de tension (électricité) ;
- pression air comburant ;
- combustible plus disponible (manque ou panne gestion carburant) ;
- manque gaz d'allumage au démarrage (pression) ;
- niveau haut chaudière ;
- excès température sable ;
- pression chambre de combustion ;
- température de vapeur surchauffée dépassée.

Ces contrôles devront stopper le fonctionnement de la chaudière et nécessiteront une intervention humaine de validation d'alarme et de remise en fonctionnement de l'installation.

CHAINE DE MISE A L'ARRET VOLONTAIRE

La chaîne de mise à l'arrêt volontaire sera actionnée par des boutons poussoirs de type urgence, et devront agir de la même façon et sur les mêmes organes que la chaîne de

sécurité électromécanique.

REMARQUE

On devra aussi prendre en compte la gestion de l'alimentation en carburant dans l'architecture de sécurité. La gestion du carburant ne sera pas détaillée dans le présent document.

DESCRIPTION FONCTIONNELLE DE L'INSTALLATION

On va maintenant détailler le fonctionnement de l'installation, en passant par le démarrage jusqu'à la mise en mode automatique de l'installation.

DÉMARRAGE DE L'INSTALLATION

Au démarrage, la séquence débutera si et seulement si :

- le niveau d'eau dans la chaudière est comme souhaité ;
- la chaîne électromécanique est fermée ;
- aucun défaut provenant de la gestion du combustible n'est enregistré ;
- aucun capteur « autocontrôle » ne fait défaut (pas d'alarmes) ;
- la pression de gaz d'allumage est correcte ;
- présence de sable dans la chambre de combustion (pression dans le lit).

La demande de démarrage de l'installation devra être manuelle, et possible seulement si les éléments vus ci haut sont vérifiés. Une commande actionnera la séquence.

La séquence débutera par la mise en marche du/des ventilateur(s) et la vérification du fonctionnement de ceux-ci par l'acquisition du/des pressostat(s) d'air qui sera(ont)

connecté(s) sur les conduits d'air. Celui-ci donnera l'indication que les ventilateurs sont en fonctionnement. Simultanément, on vérifiera que le ventilateur de cheminée est en fonctionnement en validant une pression négative dans la chambre de combustion.

On laissera l'installation fonctionner plusieurs minutes afin d'évacuer toutes fumées ou gaz résiduels dans la chaudière. (Risque d'explosion)

Puis il faudra amener entre 15 et 20% du volume de sable en combustible dans la chambre de combustion et donc commander l'ouverture de la porte ainsi que la vis d'alimentation. Ensuite on approchera de manière automatisé la lance d'allumage.

Remarque : la commande de la vis sans fin de combustible est toujours accompagnée de l'ouverture de la porte.

La lance d'allumage devra être commandé comme suit : on ouvrira l'électrovanne de propane (ou autre) et simultanément on commandera le transformateur d'allumage. L'air de combustion provient de l'air primaire et secondaire de la chambre de combustion. *On souhaitera une flamme riche en combustible permettant l'ignition aisément.* On vérifiera le cycle en contrôlant la présence d'une flamme avec la cellule de détection.

Le foyer devra être enflammé pendant plusieurs minutes. Puis l'indication de la température du lit permettra d'évaluer si on peut retirer la lance de la chambre et si le démarrage est effectué correctement. On retirera la lance d'allumage, et simultanément on commandera le débit de combustible et d'air correspondant à la plus petite capacité.

Une flamme devra toujours être présente. On fera fonctionner la chaudière à sa plus

petite capacité. (Débit de combustible minimum et débit d'air minimum).

Dans le cas d'un démarrage à froid, l'installation devra fonctionner à « petite allure » jusqu'à atteindre la pression de fonctionnement et le réchauffage total de celle-ci. (À évaluer, mais certainement une heure environ.) Il faudra alors « forcer » la régulation en mode réchauffage.

FONCTIONNEMENT EN MODE AUTOMATIQUE

En mode automatique, la chaudière doit remplir ces fonctions de la manière suivantes : « La combustion doit être régulée en fonction de la demande ». La variation de la demande est observée par une variation de la pression dans le ballon d'eau principal. Si une baisse de pression survient, c'est le témoin que le débit de vapeur augmente et vice versa. Il faut alors augmenter ou diminuer la puissance de feu dans la chambre de combustion.

Le régulateur de combustion sera préréglé pour faire coïncider le rapport comburant/carburant en tout temps. Le régulateur de combustion doit agir sur la quantité d'air et de carburant. (Débit d'air, débit de la vis d'alimentation en combustible).

Le régulateur de combustion reçoit comme information la pression dans la chaudière (capteur transmetteur de pression 4-20mA), et il adapte la puissance de feu en fonction de celle-ci. En admettant que la chaudière est une capacité de fonctionnement de 40% à 100%, le régulateur transformera l'information du capteur de pression proportionnellement à une puissance de feu située entre 40% et 100%. En suivant les courbes de combustion la chaudière adaptera les débits de combustible et de comburant.

Il faudra créer ces courbes de combustion dans le régulateur. Ainsi, si le régulateur donne comme information un pourcentage de feu, il commandera l'air et le combustible de manière préétabli. Les courbes de combustion devront être établies le jour de la mise en fonctionnement.

On pourra intégrer au régulateur de la combustion, le cycle de démarrage de l'installation. Car le régulateur contrôle les sorties nécessaires au démarrage.

De plus, on permettra au régulateur de corriger la performance de combustion en lui donnant comme information la quantité d'oxygène et/ou d'oxyde de carbone présent dans les fumées. Ainsi, en plus de connaître la quantité de carburant et de comburant dans la chambre de combustion, on lui permettra une optimisation due à l'instabilité du combustible ainsi que la dégradation des équipements.

Ainsi la combustion peut être contrôlée par un seul et même régulateur, commandant l'alimentation en carburant et comburant et recevant comme information la pression dans la chaudière.

Il faut aussi prendre en compte le niveau d'eau. On conseillera un régulateur différent. La sonde capacitive mesure le niveau d'eau et transmet un signal 4-20mA au régulateur (type PID) qui commandera la vanne modulante d'alimentation en eau. Ce fonctionnement est simple et efficace.

Remarque : La régulation de la combustion est dépendante de la marche normale de la chaudière. Si un défaut survient, on devra stopper la combustion.

On suppose qu'une demande de vapeur fait baisser la pression dans la chaudière et inévitablement le niveau d'eau dans le ballon aussi. La réponse du système sera :

augmentation de la puissance de feu par le régulateur de combustion qui augmentera le mélange carburant/comburant en suivant les courbes. Et simultanément ouverture de la vanne modulante pour augmenter le débit d'eau d'alimentation. Si la demande de vapeur est supérieure à la capacité en temps réel avec l'ouverture de la vanne modulante au maximum, on observera une diminution du niveau d'eau qui déclenchera le capteur de niveau d'eau bas critique et stoppera la combustion mais pas la régulation d'eau. *A l'inverse, si la pression dans la chaudière dépasse le seuil minimal critique, on stoppera la combustion mais pas la régulation d'eau.*

Avec cet exemple, on comprend que le contrôle du niveau d'eau stoppera la combustion, mais la combustion ne stoppera pas la régulation du niveau d'eau.

Une chaudière doit toujours être rempli d'eau, et ainsi la régulation d'eau est unidirectionnelle avec la régulation de la combustion.

Regardons cet exemple dans l'autre sens. Si une diminution de la demande de vapeur est observée, la pression va subitement augmenter dans la chaudière, et le niveau d'eau aussi. Dans ce cas le capteur transmetteur de pression va envoyer l'information au régulateur qui sera transformé par une baisse de la puissance de feu et la sonde capacitive commandera la fermeture de la vanne modulante d'eau. Mais si le niveau d'eau dépasse le seuil maximal détecté par le capteur de niveau haut d'eau alors la combustion sera stoppée. Cette action nécessitera une purge du ballon pour faire diminuer le niveau d'eau dans le ballon.

Dans l'autre sens, si la pression atteint le seuil maximal, on stoppera la combustion aussi.

La régulation d'eau sera toujours en fonctionnement.

CONTRÔLE DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE

Afin d'obtenir un contrôle optimal de la température de vapeur surchauffée sans risque pour le matériel (surchauffeur, installation aval...), il faudra agir sur celle-ci. Le risque majeur est la détérioration du surchauffeur. On opérera de la manière suivante :

Un contrôle de la température de la vapeur sera fait à la sortie du surchauffeur. À la moitié du parcours entre le début et la fin du surchauffeur, on placera un pulvérisateur d'eau liquide. Ainsi l'injection de l'eau en amont aura pour influence une diminution de la température de vapeur en aval. Ce système possèdera son propre régulateur, et sera soumis à la dominance de la chaîne de sécurité électromécanique.

Remarque : cette injection d'eau aura pour influence l'augmentation du débit de vapeur total, et devra faire l'objet de vérification quant aux limites de ce dernier.

LE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ D'EAU

La durée de vie d'une chaudière dépend en partie de la qualité d'eau. Un contrôle journalier devra être effectué afin de s'assurer du taux de sel, d'oxygène, de dioxyde de carbone... il existe plusieurs solutions techniques pour automatiser cette fonction.

On retrouve souvent un contrôle manuel et un traitement manuel. On pourra rajouter un contrôle de la déconcentration d'eau, par une mesure de la conductivité à l'intérieur même du ballon. La sonde sera connectée à un régulateur autonome et commandera l'ouverture d'une vanne à faible débit afin d'évacuer le plan d'eau dans le ballon. (Formation de

mousse due à une forte teneur en sel et hautement corrosive.)

CONCLUSION

La démarche proposée n'inclut pas les calculs nécessaires pour obtenir les caractéristiques de chaque élément de contrôle. Mais la logique présentée est très valide.

La régulation de chaudière sera toujours établie de la même façon. Les différences entre plusieurs systèmes de régulation seront démarquées par une volonté d'optimisation du système. On remarque la complexité d'un tel système n'ont pas par la quantité de matériel, mais par la pertinence de la réponse des régulateurs.

Cette démarche omet aussi d'autres aspects comme l'extraction de fond (blowdown), la gestion des cendres et du sable, une sécurité si le niveau de sable augmente dangereusement ainsi que toutes les normes en vigueur.

Une attention particulière devra être portée sur les lois et règlements dans le but de dégager les responsabilités de l'installateur.

ANNEXE 8 : NARRATIF DE FONCTIONNEMENT EN LIEN AVEC LE SCHÉMA D'INSTRUMENTATION ET DE CONTRÔLE

(Ce document est présenté dans sa forme originale et il est lié avec le schéma d'instrumentation et de contrôle, annexe 8)

Définition de la gestion du programme

Urgence et sécurité

1-niveau d'eau (NTB1, NTB2, NB, NH, NTH1)

NB et NH, déclenche un arrêt *momentané de l'alimentation* jusqu'au retour de la consigne, si la consigne revient, retour en automatique à l'état d'avant. Et affiche une alarme.

NTB1 et NTB2, stop l'alimentation, stop le primaire et le secondaire, stop la régulation eau pompe principale.

Déclenche les pompes de secours, (solénoïde valve (hardware)), jusqu'à la consigne de niveau d'eau normale.

Fan de cheminée, garde sa consigne.

Affichage du défaut et reset opérateur.

NTH1, stop l'alimentation, stop le primaire et le secondaire, stop la régulation eau pompe principale.

Fan de cheminée, garde sa consigne.

Affichage du défaut et reset opérateur.

PSH1 et PSH2, (valeur 430PSI), stop l'alimentation, stop le primaire et le secondaire

Fan de cheminée, garde sa consigne.

Régulation d'eau continue.

Affiche défaut et reset opérateur.

2-niveau d'eau réservoir condensat (ou dégazeur thermique).

Une détection de seuil bas niveau dans le réservoir, affiche une alarme et provoque l'arrêt des pompes principales.

3-pression mesurée dans la cheminée

Une détection de pression positive (0 Pa) dans la chambre de combustion, arrête momentanément l'alimentation et le primaire et le secondaire, jusqu'au retour de la consigne. Ne stop pas la régulation d'eau. Si la consigne revient, retour en automatique à l'état d'avant. Et affiche une alarme.

Si la pression reste positive pendant plus de 10sec, la bouilloire restera arrêter, et affiche un défaut et reset opérateur.

4-manque de combustible

Information provenant du pont ou du capteur de la réserve. Affichage alarme. Nécessite Reset Opérateur. Bouilloire en mode attente. Arrête mode attente après reset opérateur.

Définition du « RESET OPERATEUR ».

Si l'opérateur décide d'un reset, la bouilloire repartira en mode automatique. L'opérateur devra faire l'acquisition qu'il y a présence de flamme dans le foyer. (Essayer d'utiliser le capteur de flamme du brûleur de démarrage)

On permettra à l'opérateur un certains temps pour faire cette acquisition. Sinon on arrête l'alimentation, le primaire et le secondaire, on laisse la cheminée sur la consigne et la régulation d'eau, on affiche l'alarme et reset opérateur

Définition du « MODE ATTENTE ».

La bouilloire se placera dans ce mode en cas de manque de combustible. Elle devra maintenir son sable en 600 et 700°C en faisant varier le fan primaire. La cheminée suivra sa consigne et la régulation d'eau aussi.

Ajout d'une boucle : Régulation en oxygène avec le fan secondaire.

On donnera comme consigne au fan secondaire une bande morte entre 10 et 15%.

Remarques :

Les chartres de combustion seront ajustées pendant le fonctionnement de la bouilloire. Elles décideront de la vitesse de la vis d'alimentation et de l'ajustement du fan primaire.

(Le fan secondaire s'ajustera lui-même.)

Il faut attacher une grande importance au temps de réponse de la boucle de régulation de la combustion (très lente).

La température du lit sera pour l'automate la moyenne des trois températures. On permettra au fan primaire une correction de sa vitesse dans le but de refroidir le sable. Consigne 750°C, variation de sa vitesse entre 1 et 2 % de sa vitesse. Si la consigne est trop précise, on ajustera une bande morte.

ANNEXE 9 : SCHÉMA D'INSTRUMENTATION ET DE CONTRÔLE

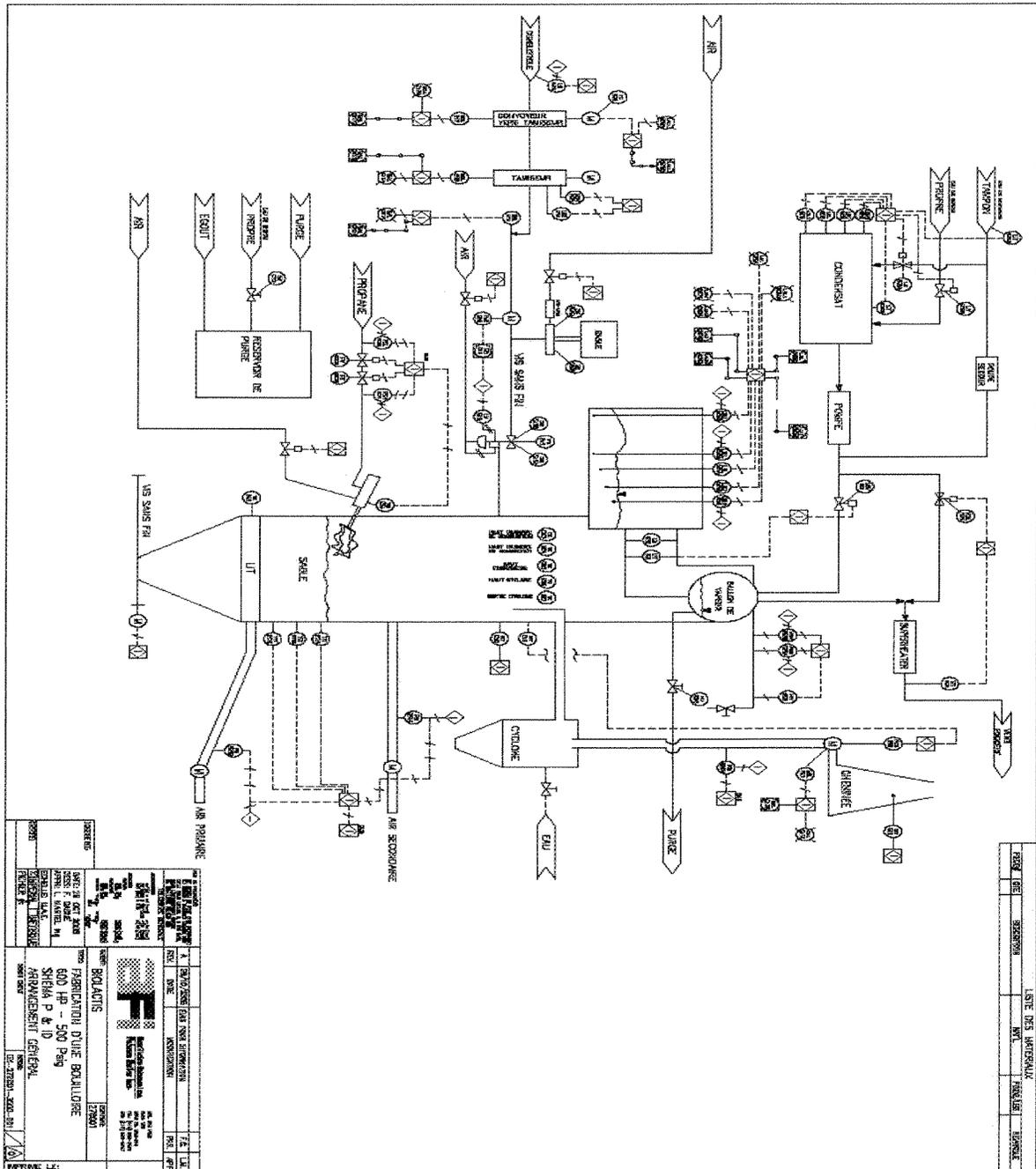


Figure A8.1 : Schéma d'instrumentation et de contrôle