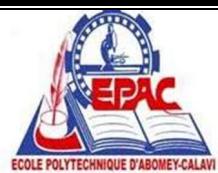




RÉPUBLIQUE DU BÉNIN



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI

ÉCOLE POLYTECHNIQUE D'ABOMEY- CALAVI

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

Option : *Génie Électrique*

MÉMOIRE DE FIN DE FORMATION POUR L'OBTENTION DE LA LICENCE
PROFESSIONNELLE

THÈME :

**Outils d'aide à la sélection d'un brûleur à fuel :
application à la chaudière SEUM NX75 de L'IBCG - SA
Cotonou/Akpakpa.**

Présenté le 30/12/2025 par :

Claude Tankpinou DAA-GOUNON

Sous la Direction de : **Dr. NASSARA Luc**

Enseignant au Département Génie Électrique à l'EPAC

Jury :

Président : Pr. AGBOMAHENA Macaire, Enseignant à l'ÉPAC

Membres 1°) Dr. NASSARA Luc, Enseignant à l'ÉPAC

2°) Dr. ISSIAKO Faras, Assistant à l'ÉPAC

Année académique : 2010 - 2011

DEDICACE :

Nous dédions ce rapport de stage à :

Notre feu père GOUNON D. Martin ;

Notre feuue maman AGOUNMALO Marie Thérèse ;

Notre épouse EKUE K. L. Myrabelle ;

Monsieur AHOUDJINOU Sourou Augustin ;

Madame TEVI Suzanne ;

Madame SIAVI Annie ;

Mademoiselle ABOE Armelle ;

Tous nos frères et sœurs ;

Toute la famille DAA-GOUNON ;

Toute la famille AGOUNMALO ;

Nos camarades de promotion au CAP/EPAC ;

Tous nos amis ;

Tous ceux qui de prêt ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Claude T. DAA-GOUNON.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à l'endroit de :

- Notre maître de mémoire, le Dr Luc **NASSARA** qui n'a ménagé aucun effort pour la réussite de ce mémoire ;*
- Au Chef d'Usine (CU) de l'IBCG-SA en la personne de Monsieur **AHOUDJINOU Sourou Augustin** qui nous a soutenu financièrement, moralement et intellectuellement ;*
- Aux familles **DAA-GOUNOU, AGOUNMALO, EKUE** pour leurs soutiens moraux et autres assistances de tout genre ;*
- Toutes les autorités du Centre Autonome de Perfectionnement (CAP) et de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi (**ÉPAC**), en général, qui par leurs efforts au quotidien, nous ont garanti une formation de très bonne qualité ;*
- Tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation, tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce rapport de stage ;*
- et enfin, à tous les membres du jury pour les précieux temps accordés à la lecture et à l'appréciation de cet œuvre.*

AVANT-PROPOS

Conformément aux exigences du règlement pédagogique de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi (ÉPAC), tout étudiant en fin de formation est astreint à effectuer un stage dans une entreprise. Il devra au terme dudit stage produire un rapport sur les travaux de recherche sur un problème de l'entreprise ou sur une réalisation au laboratoire. Ce rapport est ensuite présenté et soutenu devant un jury.

C'est donc pour satisfaire à ces exigences que nous présentons le présent document qui conclut notre stage au Service des Études et de la Maintenance des Usines de l'IBCG-SA. Stage qui a l'allure d'une vie pratique en entreprise parce qu'il s'est déroulé au même moment que le redémarrage, de la Nouvelle Raffinerie d'Huiles Alimentaires, usine de l'IBCG-SA dans laquelle s'est déroulé notre stage. Cette usine est à Akpakpa dans l'enceinte de l'Huilerie Mixte de Cotonou (HMC).

Deux alternatives se présentaient à l'IBCG-SA. La première est de remplacer simultanément le brûleur et le tube foyer de la chaudière. Solution qui permettrait de continuer à exploiter la chaudière à sa pleine puissance tant qu'elle passera les épreuves hydrauliques et la seconde est de la déclasser en l'utilisant à une pression de service plus basse (exemple 3 barg) et de remplacer le brûleur par un foyer à combustibles solides (le bois par exemple). L'alternative de passer à un combustible solide ne sera pas retenue parce que ce type de combustible ne sera pas continuellement disponible à Cotonou et le procédé de raffinage ne génère pas de déchets solides.

Notre tuteur de stage nous a demandé de travailler sur le thème, car il existe encore sur d'autres sites de l'IBCG-SA des chaudières qui utilisent du fuel ; d'où l'intérêt du sujet.

RÉSUMÉ

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'amélioration du processus de sélection des brûleurs à fuel utilisés dans les installations thermiques industrielles. En effet, le choix d'un brûleur adapté conditionne le rendement énergétique, la fiabilité du fonctionnement et la maîtrise des émissions polluantes.

L'étude a consisté à identifier les paramètres critiques permettant de sélectionner, parmi plusieurs modèles de brûleurs à fuel, celui qui répond le mieux aux exigences techniques et économiques d'une installation donnée. La méthodologie consiste à s'appuyer sur une analyse fonctionnelle des différents types de brûleurs, l'identification des paramètres de choix (puissance calorifique, rendement, type de combustible, pression d'alimentation, conformité normative ...), et la proposition d'un modèle de sélection multicritère.

PROMETHEE et ELECTRE sont particulièrement recommandées en ingénierie industrielle lorsque la décision engage des contraintes techniques, économiques et environnementales. L'application de la méthode PROMETHEE permet de simplifier le processus de choix, de réduire les erreurs de dimensionnement et d'améliorer la performance énergétique globale du système de combustion alors que ELECTRE sert de préfiltre normatif.

Ce travail constituera, nous l'espérons, une contribution utile pour les techniciens et ingénieurs chargés du dimensionnement, de la maintenance ou du renouvellement des équipements thermiques.

Mots-clés : brûleur à fuel – outil d'aide à la décision – sélection – efficacité énergétique – combustion.

ABSTRACT

This dissertation focuses on improving the selection process of fuel oil burners used in industrial thermal systems. Selecting an appropriate burner is essential to ensure energy efficiency, operational reliability, and control of pollutant emissions.

The study consisted of identifying the critical parameters for selecting, from among several models of fuel oil burners, the one that best meets the technical and economic requirements of a given installation. The methodology is based on a functional analysis of the different types of burners, the identification of selection parameters (heat output, efficiency, fuel type, supply pressure, regulatory compliance, etc.), and the proposal of a multi-criteria selection model.

PROMETHEE and ELECTRE are particularly recommended in industrial engineering when the decision involves technical, economic, and environmental constraints. Applying the PROMETHEE method simplifies the selection process, reduces sizing errors, and improves the overall energy performance of the combustion system, while ELECTRE serves as a standard pre-filter.

We hope that this work will be a useful contribution for technicians and engineers responsible for sizing, maintaining, or replacing thermal equipment.

Keywords : fuel burner – decision support tool – selection – energy efficiency – combustion.

TABLE DES MATIÈRES

<i>DEDICACE</i> :	i
<i>REMERCIEMENTS</i>	ii
AVANT-PROPOS.....	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS :	x
LISTE DES FIGURES :.....	xi
LISTE DES TABLEAUX :	xi
LISTE DES PHOTOS :.....	xii
LISTE DES FORMULES	xii
GLOSSAIRE / LEXIQUE :	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1 ^{ère} PARTIE :.....	2
CHAPITRE I :.....	3
PRÉSENTATION DE L'ÉCOLE DE FORMATION :.....	3
CHAPITRE II :.....	4
PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL :	4
INTRODUCTION.....	4

NATURE JURIDIQUE DE L'IBCG	5
CHAPITRE III :	8
DÉROULEMENT DU STAGE DE FIN DE FORMATION	8
2 ^{ème} PARTIE :.....	10
CHAPITRE IV :	11
UTILISATION DE LA VAPEUR D'EAU DANS UNE INDUSTRIE ALIMENTAIRE – CHAUDIÈRE A VAPEUR	11
4.2.1 CHAUDIERES A TUBES D'EAU.....	13
4.2.2 CHAUDIERES A TUBES DE FUMEE	14
4.3.1 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES COMBUSTIBLES LIQUIDES.....	15
CHAPITRE V :	17
5.1 DESCRIPTION DE LA CHAUDIÈRE SEUM DU CHC	17
DESCRIPTION DE LA CHAUDIERE SEUM NX75 ET DU BRÛLEUR À FUEL EXISTANT	17
5.2 QU'EST-CE QU'UN BRULEUR DE CHAUDIÈRE.....	19
5.2.1 DÉFINITION	19
5.2.2 BRULEUR A FUEL EXISTANT	19
5.3 ELECTRODES ET TRANSFORMATEUR D'ALLUMAGE	22
5.4 COFFRET A PROGRAMME ET DE SECURITE.....	22
3 ^{ème} PARTIE :.....	24
CHAPITRES VI :	25
6.1 CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	25
6.2 PROBLÈME PRINCIPAL	25
6.3 CRITERES RETENUS POUR L'ANALYSE DE CHOIX DU BRÛLEUR	25
CHAPITRES VII :	27

OUTILS D'AIDE À LA SÉLECTION.....	27
7.1 OUTILS D'AIDE À LA SÉLECTION : APPROCHE MULTICRITÈRE	27
7.1.1 PROMETHEE (I & II)	27
7.1.2 GAIA (UN COMPLÉMENT DE PROMETHEE).....	29
7.1.3 AHP (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS)	30
7.1.4 ELECTRE (I, II, III...).....	31
7.2 TABLEAU COMPARATIF SYNTHETIQUE.....	32
CHAPITRES VIII :	33
APPLICATION À LA CHAUDIÈRE SEUM NX75, ANALYSE DÉCISION FINALE.....	33
8.1 APPLICATION À LA CHAUDIÈRE SEUM NX75 ET ANALYSE	33
8.2 DONNÉES COMMUNIQUÉES PAR L'ENTREPRISE	36
8.3 ILLUSTRATION PAR LES MÉTHODES AMD	36
8.3.1 FILTRAGE RÉGLEMENTAIRE – ELECTRE (OU LOGIQUE DE VETO).....	36
8.3.2 CLASSEMENT TECHNICO-ECONOMIQUE – PROMETHEE II	36
8.3.3 ANALYSE GÉOMÉTRIQUE ET INTERPRÉTATION (GAIA)	38
8.4 DÉCISION FINALE	39
CONCLUSION GÉNÉRALE	39
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	40
Annexes	41
Annexe1 : Liste de quelques fabricants de brûleur à fuel :	41
Annexe 2 : Caractéristiques d'un fuel lourd.....	42
Annexe 3 : Calcul des flux, des préférences.....	43
Annexe 3 : Cahier des charges fonctionnelle et technique	51
1. Objet du cahier des charges.....	51
2. État des lieux de l'installation existante	51

3. Objectifs du projet	51
4. Exigences fonctionnelles	52
5. Exigences techniques	53
6. Contraintes d'intégration	53

LISTE DES ABRÉVIATIONS :

ACP : Analyse en Composantes Principales ;

BACG : Bureau d'Analyse et de Contrôle de Gestion ;

barg : bars de pression relative (gauge) ;

CPU : Collège Polytechnique Universitaire ;

CU : Chef d'Usine ;

DAF : Direction Administrative et Financière ;

DEP : Direction des Études et de la Production ;

DPFC : Division du Perfectionnement et de la Formation Continue ;

DU : Directeur d'Usine ;

ÉPAC : École Polytechnique d'Abomey-Calavi ;

IBCG : Industrie Béninoise des Corps Gras ;

SC : Service des Comptabilités ;

SCCP : Service Central de Collecte et de Production ;

SET : Service des Études Techniques ;

SEUM : Société d'Exploitation d'Usines Métallurgiques ;

SMU : Service Central de la Maintenance des Usines ;

SONICOG : Société Nationale pour l'Industrie des Corps Gras ;

SPC : Service du Personnel et du Contentieux.

LISTE DES FIGURES :

Figure 1 : Organigramme des usines de l'IBCG-SA [1]	6
Figure 2 : Organigramme de l'ensemble de l'IBCG-SA [1].....	7
Figure 3 : Chaudière à tubes d'eau [3].....	13
Figure 4 : Chaudière à tubes de fumée [4]	14
Figure 5 : Vue de face de la chaudière SEUM NX 75 [2]	18
Figure 6 : Vue de la volute du brûleur (couvercle enlevé) [2].....	20
Figure 7 : Vues du moteur ventilateur, du servo-moteur et de la roue de modulation [2]	22
Figure 8 : Coffret de sécurité LAC avec son couvercle [2]	23
Figure 9 : Coffret de sécurité LAC sans son couvercle [2].....	23
Figure 10 : Plan GAIA - Choix d'un brûleur [1]	38

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1 : Les types de chaudière à vapeur utilisées sur les installations de l'IBCG - SA [2]	16
Tableau 2 : Critères retenus pour l'analyse AMD [2].....	26
Tableau 3 : Tableau synthétique comparatif des 4 AMD retenues pour notre étude	32
Tableau 4 : Comparaison des principales approches AMD applicables au choix d'un brûleur à fuel	34
Tableau 5 : Données initiales fournies par IBCG-SA [2]	36

Tableau 6 : Classement obtenu après la pondération des critères et le calcul des flux.....	37
Tableau 7 : Résultats numériques de la normalisations des données.....	44
Tableau 8 : : Calcul de $\pi(A_1, A_2)$	45
Tableau 9 : Matrice complète résumées des préférences $\pi(a, b)$	48
Tableau 10 : Récapitulation des résultats des flux	49
Tableau 11 : Tableau des exigences fonctionnelles [1]	52
Tableau 12 : Tableau des exigences techniques.....	53

LISTE DES PHOTOS :

Photo 1 : Façade principale du bâtiment du CAP [1].	3
Photo 2 : Façade principale du bâtiment de la Direction Générale de l'IBCG - SA [2].	4

LISTE DES FORMULES

Formule 1: Formule de préférence linéaire $P_j(a, b)$:.....	43
Formule 2: Formule de maximisation d'un critère j :	43
Formule 3: Formule de minimisation d'un critère j :.....	44
Formule 4: Formule générale PROMETHEE $\pi(a, b)$:	44
Formule 5: Flux de préférence positif φ^+ :	48
Formule 6 : Flux de préférence négatif φ^-	49
Formule 7 : Formule de calcul du flux net φ :	49

GLOSSAIRE / LEXIQUE :

AHP : Analytic Hierarchy Process.

AMD : Aide Multicritère à la Décision.

Brûleur 2 allures : sur ce type de brûleur, le brûleur s'enclenche en première allure en cas de demande de chaleur, et après un délai programmé, il passe à pleine puissance, sauf si le régulateur signale que cette dernière n'est pas nécessaire. Auquel cas, la première allure est maintenue.

Brûleur modulant : toutes les allures de fonctionnement sont possibles, au-delà d'un minimum de l'ordre de 30% de la puissance nominale du brûleur. Les débits d'air et de fuel sont réglés en continu en fonction de la puissance de chauffage requise.

ELECTRE : Élimination Et Choix Traduisant la RÉalité

GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) C'est une méthode graphique complémentaire à PROMETHEE, développée pour visualiser et interpréter les résultats issus de PROMETHEE sous forme de carte factorielle.

PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'optimisation du rendement des installations thermiques industrielles passe entre autres par le bon choix des composants essentiels, notamment le brûleur. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à la sélection d'un brûleur fuel lourd adaptable à la chaudière d'eau saturée autonome SEUM NX75 de l'IBCG – SA Cotonou / Akpakpa. Le brûleur qui sera retenue, devra garantir un fonctionnement optimal, une consommation énergétique maîtrisée et un meilleur respect des normes environnementales.

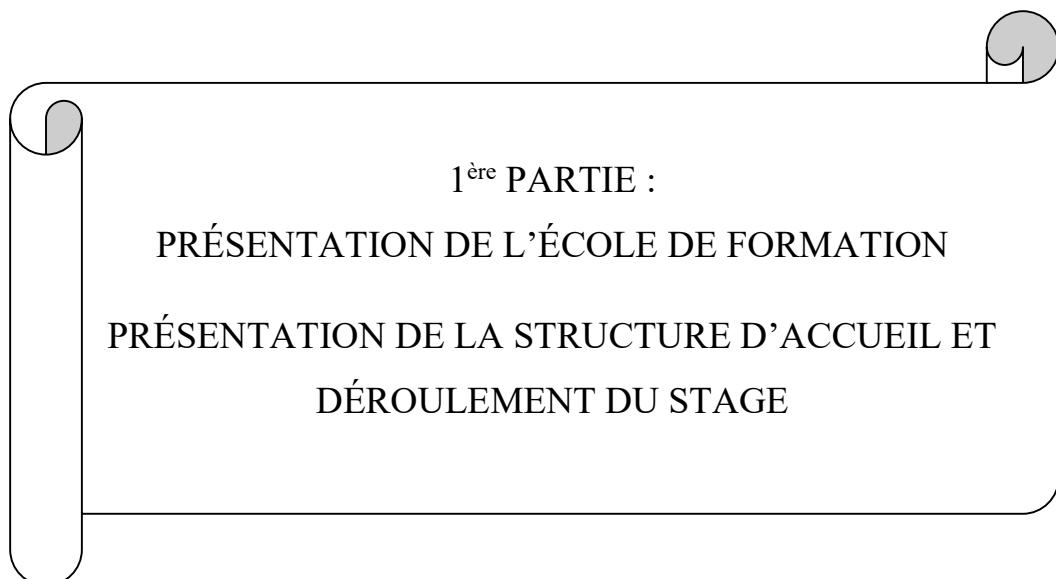
Le matériel actuellement utilisé est un brûleur fuel automatique MAT-KL'O'CKNER défaillant et désuet de modèle **KL 80 RS III**. Il est de type modulant. Le but de notre travail, est de proposer une méthodologie utilisant des outils d'aide de sur classement et de visualisation géométrique pour sélectionner le brûleur le plus approprié selon différents critères techniques, économiques et respectueux du cahier des charges.

Ce document est structuré en huit chapitres groupés en trois parties.

La première partie divisée en trois chapitres (Chapitres 1 à 3) évoquera les exigences pédagogiques en matière de formation au CAP. Elle présentera la structure d'accueil et exposera les travaux effectués pendant notre stage.

La deuxième partie qui regroupe les chapitres 4 et 5 évoquera l'utilisation de la vapeur d'eau dans une industrie alimentaire et présentera une chaudière à vapeur et les différentes parties d'un brûleur fuel.

La troisième partie (chapitres 6 à 8) exposera quelques outils d'aide multicritère (AMD) puis présentera en suivant une démarche méthodologique, la décision finale qui justifie le choix technique du brûleur fuel.



CHAPITRE I :

PRÉSENTATION DE L'ÉCOLE DE FORMATION : LE CENTRE AUTONOME DE PERFECTIONNEMENT (CAP)



Photo 1 : Façade principale du bâtiment du CAP [1].

Le CAP était à l'origine l'ancienne « Division du Perfectionnement et de la Formation Continue (DPFC) » une division de l'ex – Collège Polytechnique Universitaire (CPU). Sa mission était de répondre aux diverses sollicitations des anciens diplômés de cette École, désireux de se renforcer en capacité par la formation continue. A l'avènement de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) suite à la mutation du CPU intervenue en 2004, la DFCP fut érigée en centre, avec la dénomination actuelle de « Centre Autonome de Perfectionnement » (CAP). Ses offres de formation conduisent aux grades de : [2]

Ingénieurs de conception ;

Diplôme Universitaire de Technologies (DUT) ;

Licence ;

Maîtrise ;

Master professionnelle.

CHAPITRE II :

PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL : L'INDUSTRIE BÉNINOISE DES CORPS GRAS (IBCG) SA.



Photo 2 : Façade principale du bâtiment de la Direction Générale de l'IBCG - SA [2].

INTRODUCTION

L'Industrie Béninoise des Corps Gras (IBCG-SA), est créée en 1997 par le groupe L'AIGLON HOLDING. L'IBCG produit de l'huile de palme brute, de l'huile de palmiste brute, du beurre de karité, de l'huile de coton brute, de l'huile de soja brute, des tourteaux en vrac et en pellets, des huiles alimentaires raffinées et des savons de toilette et de ménage dont le Palmida. Elle dispose d'une installation moderne pour le raffinage et le fractionnement des huiles végétales alimentaires appelée "NOUVELLE RAFFINERIE D'HUILES ALIMENTAIRES".

Les huiles alimentaires issues de cette usine sont commercialisées sous le label "Toulor", et les sous-produits des huiles envoyés à la savonnerie. C'est dans cette usine que nous avons eu l'opportunité de faire notre stage de fin de formation qui a pris l'allure d'une vie pratique en entreprise.

L'IBCG s'approvisionne en régimes de palme dans les Unions Régionales de Coopérative d'Aménagement Rural (URCAR) de HINVI et de HOUIN-AGAME. Quant aux graines de coton, d'arachide, de karité et même de palmiste, elles viennent de divers fournisseurs locaux. Pour le volume à traiter dans son installation de la Nouvelle Raffinerie d'huiles alimentaires, l'IBCG s'approvisionnent en matières premières oléagineuses dans la sous-région et en Asie.

NATURE JURIDIQUE DE L'IBCG

L'IBCG-SA., est une Société Anonyme avec Conseil d'Administration avec un capital de trois milliards cinq cent millions (3.500.000.000) de francs CFA dont le siège est à Cotonou, Akpakpa zone Industrielle. Elle est immatriculée à la Chambre de Commerce et d'Industrie du Bénin sous le numéro 22.273-B, son numéro INSAE est le 295 311 966 6139 et son numéro IFU le 320 070 003 3618.

L'organigramme que nous présentons ci-dessous est celui de l'IBCG au moment où toutes les activités industrielles marchaient. Aujourd'hui, l'effectif de la société est considérablement réduit, mais les fonctions principales sont toujours exécutées par application de cumul de fonctions. Pour raison de clarté, nous présentons ci-dessous la structure de chacune des unités de production industrielle de la société et celle de toute l'entreprise à la page suivante :

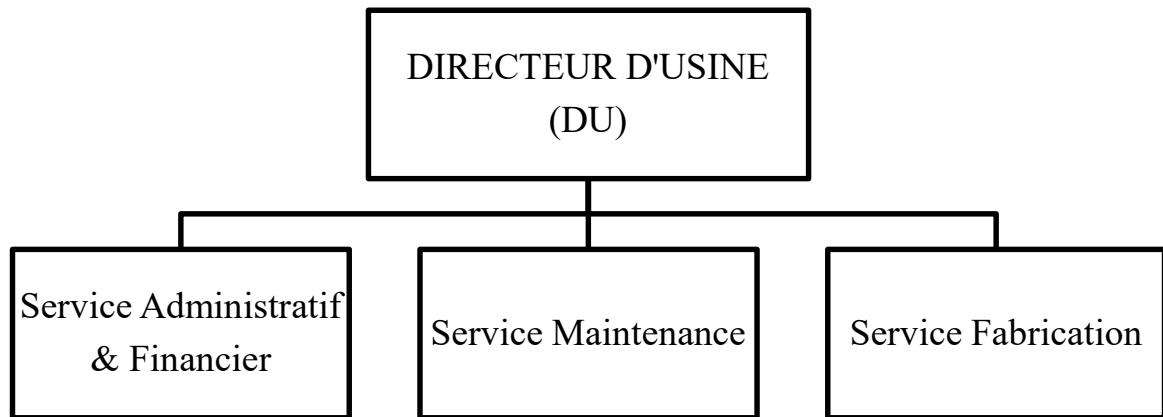
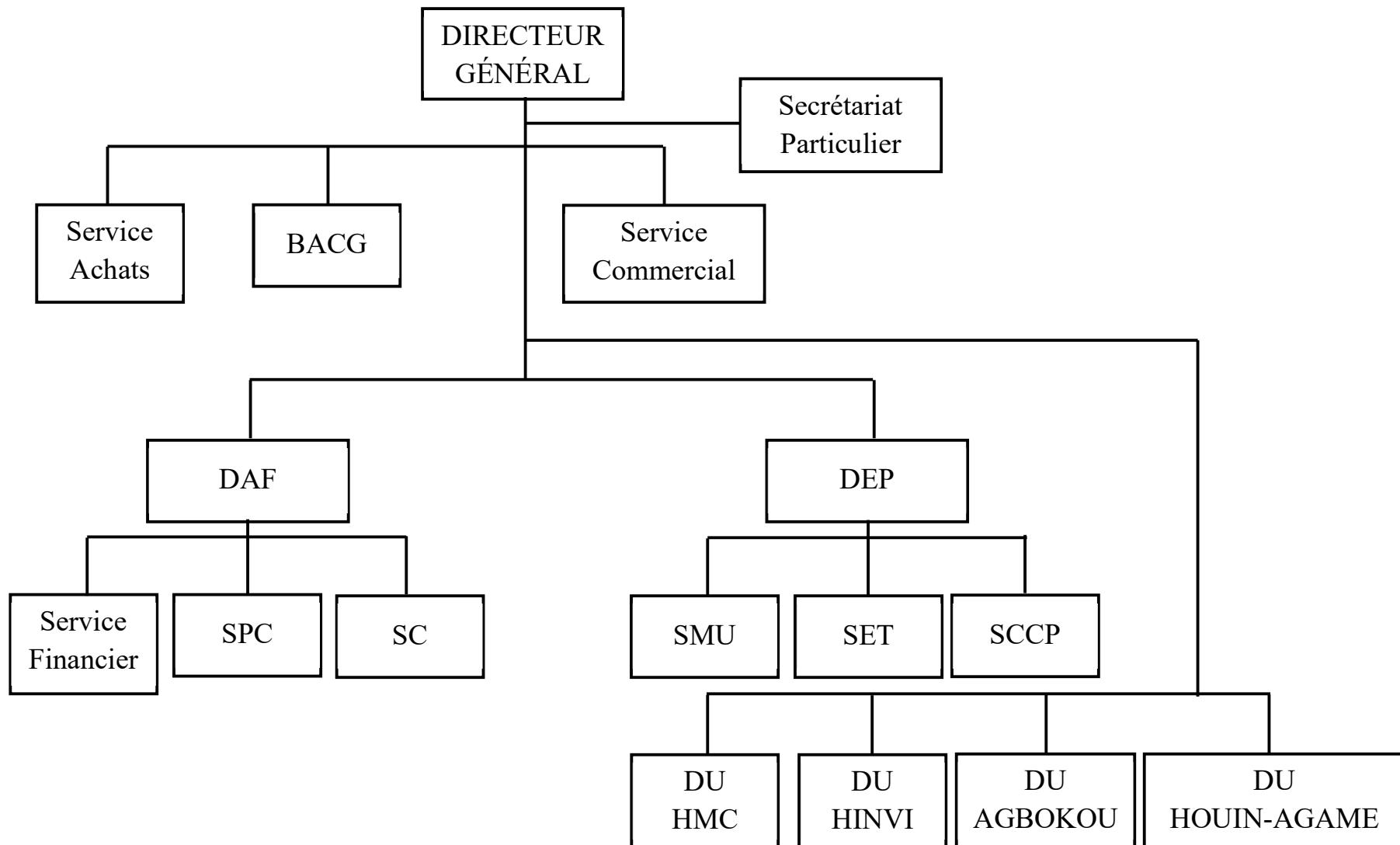


Figure 1 : Organigramme des usines de l'IBCG-SA [2]



CHAPITRE III :
DÉROULEMENT DU STAGE DE FIN DE FORMATION

Le stage est l'occasion pour un étudiant, d'acquérir d'une part, une expérience pratique en milieu de travail, et d'autre part de mesurer sa compétence dans des situations réelles.

Il permet de :

- Découvrir quelques aspects du fonctionnement d'une entreprise ;
- Favoriser l'intégration humaine et professionnelle d'un étudiant à une équipe de travail ;
- Évaluer ses compétences quant à la pratique de la profession ;
- Participer à des projets, sous la supervision de personnes - ressources.

Notre période de stage coïncidant avec le redémarrage de la Nouvelle Raffinerie d'huiles alimentaires, nous avons exécuté seul ou ensemble avec d'autres personnes (collègues, responsables techniques de l'IBCG-SA), plusieurs tâches pour la relance de la production de cette ligne. Citons ici, quelques-unes de ces tâches :

- L'entretien de tous les moteurs électriques de la ligne ;
- L'entretien de tous les coffrets et armoires de distribution électriques de l'usine ;
- L'entretien du Tableau Général Basse Tension (TGBT) ;
- L'entretien des tableaux de commande des équipements des procédés de l'usine ;
- Lecture de plans électriques ;
- Le suivi du fonctionnement de la chaudière à vapeur d'eau SEUM NX75 ;

- L'entretien mécanique et électrique du brûleur de la chaudière NX75.

C'est par rapport à cette dernière tâche, que nous nous sommes vu confier le thème du présent rapport de fin de stage, à savoir : "**Outils d'aide à la sélection d'un brûleur à fuel : application à la chaudière SEUM NX75 de IBCC-SA Cotonou/Akpakpa**".

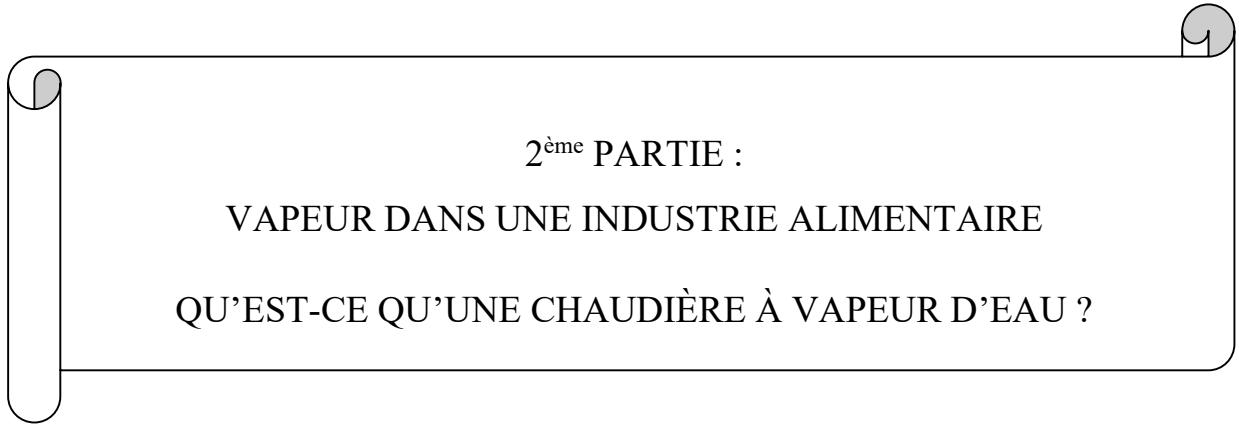
Ce travail nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement d'une chaudière à combustible liquide, d'identifier des paramètres critiques pour la sélection d'un brûleur à fuel, et de proposer une méthodologie de décision efficace.

La poursuite du travail pourrait intégrer des aspects dynamiques de régulation, des tests de performance, la prise en compte de combustibles alternatifs, tels que le gasoil, du gaz de pétrole liquéfié, en abrégé GPL, du combustible solide, de la biomasse ...

À partir des besoins exprimés par l'entreprise, nous avons travaillé :

- Avec la documentation qu'elle a mise à notre disposition ;
- Nos recherches personnelles ;
- L'encadrement de notre maître de mémoire ;
- Les conseils de notre tuteur de stage,

Puis proposé un outil qui conduise à un choix objectif basé sur des critères prédéfinis, parmi des modèles existants. Ainsi, le brûleur à combustible liquide retenu, sera le mieux qui soit compatible avec la chaudière SEUM NX75 et à même de satisfaire les besoins en vapeur d'eau du procédé.



2^{ème} PARTIE :
VAPEUR DANS UNE INDUSTRIE ALIMENTAIRE
QU'EST-CE QU'UNE CHAUDIÈRE À VAPEUR D'EAU ?

CHAPITRE IV :
UTILISATION DE LA VAPEUR D'EAU DANS UNE
INDUSTRIE ALIMENTAIRE – CHAUDIÈRE A VAPEUR

4.1 UTILISATION DE LA VAPEUR D'EAU DANS UNE INDUSTRIE ALIMENTAIRE

L'utisation de la vapeur d'eau est courante dans les industries alimentaires. La vapeur d'eau est produite dans un équipement appelé chaudière à vapeur ou générateur de vapeur.

La vapeur d'eau peut être utiliser comme force motrice, lorsquelle est surchauffée, on l'utilise alors pour actionner une turbine à vapeur, laquelle entraîne un alternateur qui produit de l'énergie électrique. C'est le cas dans toutes les huileries de palme de l'IBCG -SA.

La vapeur d'eau peut être utilisée comme source de chaleur directe et indirecte. Le chauffage direct se réfère aux procédés où la vapeur d'eau, entre en contact direct, avec le produit à chauffer. Citons ici : la cuisson des aliments (exemple "ablo", boules d'akassa ...), la stérilisation (exemple des régimes de palme dans les huileries), le barbotage (exemple des désodoriseurs sous vide) Cette vapeur qui est de qualité alimentaire, est injectée dans la masse de la matière à chauffer tout en l'hydratant.

Le chauffage indirect fait référence aux procédés où la vapeur n'entre pas en contact direct avec le produit à chauffer. Cette méthode utilise un dispositif appelé échangeur de chaleur (serpentin, plaque, double paroi ...) pour chauffer le produit. Ayant transféré sa chaleur, la vapeur se transforme en condensat qui est évacué par un purgeur. Ce condensat peut-être récupérer et réintroduit dans la chaudière.

Voyons sommairement, ce qu'est une chaudière à vapeur.

4.2 QU'EST - CE QU'UNE CHAUDIÈRE À VAPEUR D'EAU ?

Une chaudière est un équipement (voire une installation industrielle, selon sa puissance), permettant de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (le plus généralement de l'eau).

L'énergie thermique (source de chaleur) peut provenir soit de la chaleur dégagée par la combustion (de charbon, de fioul, de gaz, de bois, de déchets, etc.), soit de la chaleur contenue dans un autre fluide (chaudière de récupération sur gaz de combustion ou gaz de procédés chimiques, chaudière « nucléaire » recevant la chaleur du circuit primaire, etc.), soit encore d'autres sources de chaleur (chaudières électriques, par exemple). C'est donc un appareil dans lequel, par apport de chaleur, un fluide caloporteur subi un chauffage et éventuellement un changement d'état (vaporisation). Notre travail sera sur une chaudière dans laquelle l'énergie thermique provient de la combustion d'un liquide en occurrence du fuel pour la vaporisation de l'eau.

4.2 APPROCHE TECHNOLOGIQUE

Le fonctionnement d'une chaudière à combustible liquide fait intervenir essentiellement trois paramètres :

- La combustion du combustible ;
- Le passage des fumées dans la chaudière depuis le foyer jusqu'à la cheminée ;
- Le transfert de chaleur des produits de combustion au fluide de la chaudière.

Toutes ces catégories de chaudière sont actuellement du type « tubulaire ». Selon la nature du fluide qui circule dans les tubes on distingue :

- Les chaudières à « tubes d'eau » ;
- Les chaudières à « tubes de fumée ».

On retrouve aussi des chaudières qui combinent ces deux types de technologie ; c'est le cas de la chaudière de l'IBCG installée sur le site industriel de Houin-Agamè (dans le Mono). Elle est désignée simplement par « chaudière tubulaire ».

4.2.1 CHAUDIERES A TUBES D'EAU

Dans ces types de chaudière, flammes et gaz portés à haute température sont mis au contact des tubes dans lesquels circule de l'eau. La combustion s'effectue dans un four souvent tapissé de tubes raccordés à un ballon ou deux ballons. Le ballon supérieur est celui d'où part la vapeur d'eau pour les utilisations.

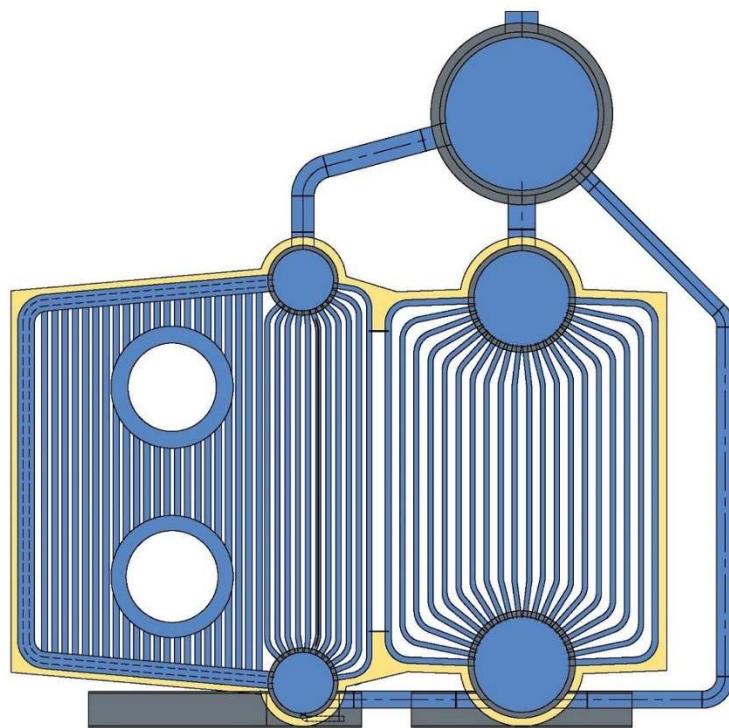


Figure 3 : Chaudière à tubes d'eau [3]

4.2.2 CHAUDIERES A TUBES DE FUMEE

Ici, les gaz chauds sont envoyés dans un faisceau de tubes immergés dans le corps de la chaudière, et la vapeur est évacuée par une tuyauterie située dans la partie supérieure de la chaudière.

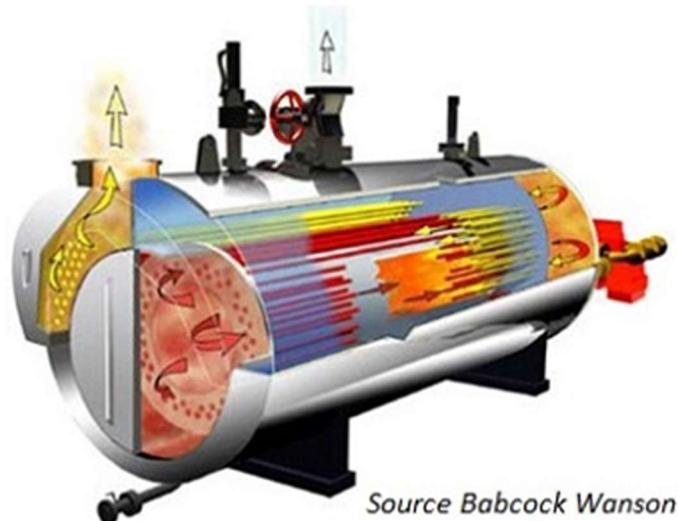


Figure 4 : Chaudière à tubes de fumée [4]

4.3 COMBUSTIBLES LIQUIDES UTILISES DANS UNE CHAUDIERE

Il existe quatre sortes de combustibles liquides utilisés en thermie industrielle pour le chauffage du fluide caloporteur :

1. Fuel-oil domestique encore appelé ou FOD ;
2. Fuel-oil léger
3. Fuel-oil lourd n°1
4. Fuel-oil lourd n°2

Ce sont des combustibles issus du raffinage des produits pétroliers.

4.3.1 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES COMBUSTIBLES LIQUIDES

Les diverses variétés de fuel sont définies par des caractéristiques (physiques, chimiques ou physico-chimiques) qui permettent de les différentier très nettement. Les caractéristiques du fuel qui nous intéresse ici sont présentées en annexe 2.

Selon la classification faite plus haut, nous vous présentons à la page suivante les types de chaudière installatés à l'IBCG – SA.

Tableau 1 : Les types de chaudière à vapeur utilisées sur les installations de l'IBCG - SA [2]

Type	Combustible	Vapeur produite			Site
		Débit ou puissance	Nature	Usages	
Tubes de fumée	Liquide (fuel-oil lourd n°2)	5t/h	Saturée	Procédés et production vide	Savonnerie (Porto-Novo)
Tubes de fumée	Liquide (fuel-oil lourd n°2)	3t/h	Saturée	Procédés	CHC (Cotonou)
Tubes de fumée	Liquide (fuel-oil lourd n°2)	7,5t/h	Saturée	Procédés et production vide	CHC (Cotonou)
Tubes d'eau	Liquide (gas-oil)		Saturée	Désodorisation	CHC (Cotonou)
Tubes d'eau	Liquide (fuel + gas-oil)		Eau chaude	Chauffage réservoirs	Centre de stockage et des expéditions (Cotonou)
Tubes d'eau	Solides (Déchets de palmier)		Surchauffée	Turboalternateur + procédé	Huilerie de palme de Hinvi
Tubulaire	Solides (Déchets de palmier)		Surchauffée	Turboalternateur + procédé	Huilerie de palme de Houin

CHAPITRE V :
DESCRIPTION DE LA CHAUDIERE SEUM NX75 ET
DU BRÛLEUR À FUEL EXISTANT

5.1 DESCRIPTION DE LA CHAUDIÈRE SEUM DU CHC

Il s'agit d'une chaudière autonome construite à Corbehem (France) en 1979 par la Société d'Exploitation d'Usines Métallurgiques (SEUM). Elle est équipée d'un brûleur à fuel lourd type KL80RS – III (SAFMAT-KLÖCKER). Elle a passé ses premières épreuves le 16 novembre 1979 avant d'être envoyée à la SONICOG qui l'a mise en exploitation en 1980.

C'est une chaudière à double parcours de fumée, à tube-foyer et à grand volume d'eau. Elle est alimentée en eau traitée de qualité alimentaire ce qui justifie par ailleurs l'usage direct de la vapeur produite pour le chauffage manufacturier.

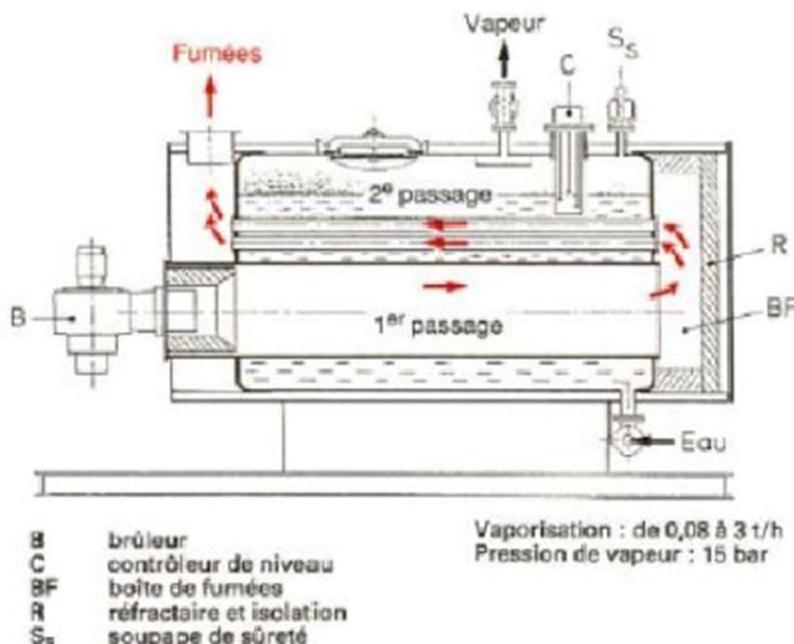


Figure 6 : Schéma de circulation des produits de combustion dans une chaudière à double parcours de fumée [5]

Le corps cylindrique de la chaudière SEUM NX 75 est calorifugé à l'extérieur avec un revêtement en tôle galvanisée, ce qui réduit à un minimum les pertes par rayonnement.

La régulation automatique de l'équipement de chauffe (brûleur) adapte la production calorifique à la demande ; en cas de panne, le brûleur est mis à l'arrêt automatiquement et ne peut être remis en marche – manuellement – qu'après élimination du défaut. Cet équipement de chauffe est dépassé actuellement d'où des difficultés d'approvisionnement en pièces de rechange.

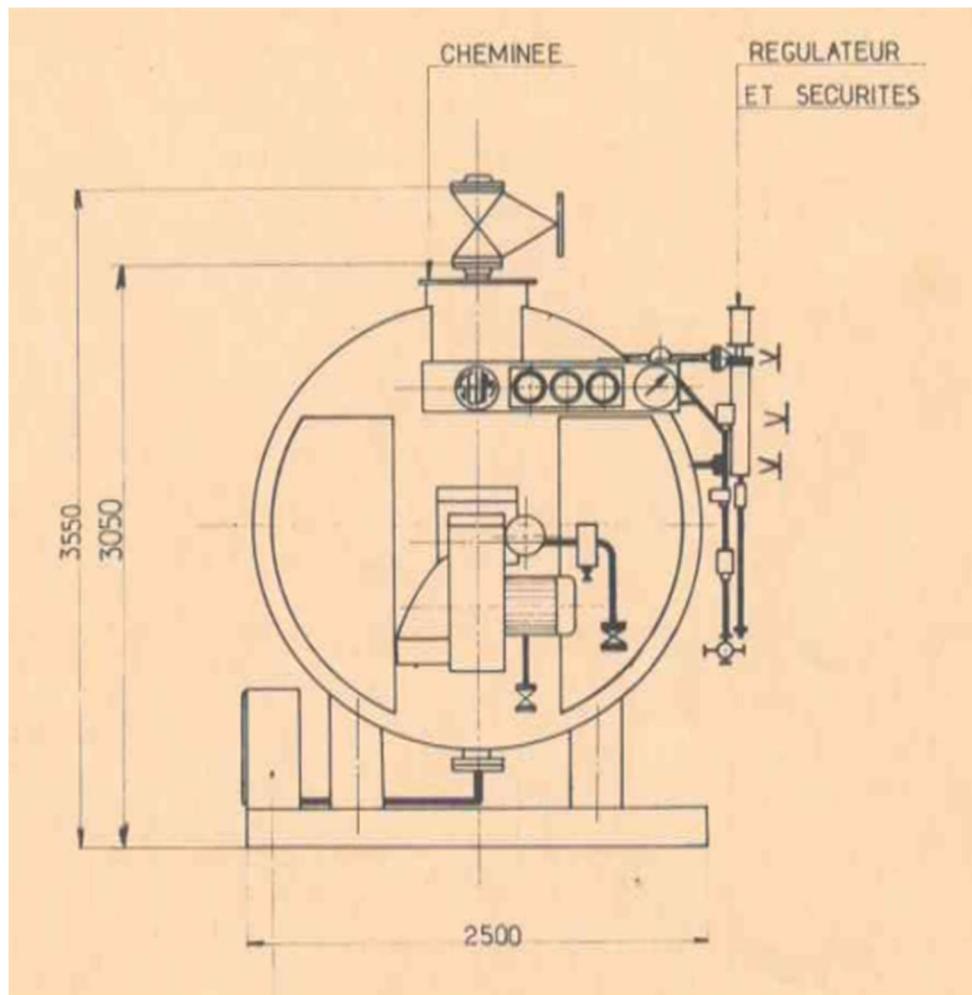


Figure 5 : Vue de face de la chaudière SEUM NX 75 [2]

5.2 QU'EST-CE QU'UN BRULEUR DE CHAUDIÈRE.

5.2.1 DÉFINITION

Incorporé au fonctionnement d'une chaudière, le brûleur est l'élément mécanique où vient se mélanger le combustible avec de l'air comburant chargé d'oxygène [6]. Ce procédé, sous une certaine condition, permet la production de chaleur par un effet de combustion alimenté par du gaz ou par du fioul. L'équilibre entre les deux éléments mélangés doit être le plus précis possible afin d'éviter que les imbrûlés provoquent une baisse de rendement du brûleur.

Un brûleur est équipé d'un ventilateur chargé d'alimenter l'élément mécanique en air. Ce principe de fonctionnement lui vaut d'ailleurs le nom de brûleur pulsé. Ce ventilateur a un double rôle :

- d'une partie, il permet à l'air nécessaire pour la combustion d'entrer dans l'appareil ;
- d'autre part, il assure l'évacuation des fumées liées à la combustion.

Le fioul ou le gaz nécessaire à la combustion arrivent au sein du brûleur depuis leur lieu de stockage : une cuve pour le fioul ou une rampe à gaz.

5.2.2 BRULEUR A FUEL EXISTANT

Il s'agit d'un brûleur qui pulvérise mécaniquement le fuel préchauffé d'une façon aussi complète que possible, et le mélange à l'air, pour assurer une combustion parfaite. Il est équipé d'un réchauffeur mixte électrique/vapeur d'eau sélectionnable, monté sur une aile du châssis de la chaudière. Le rôle de cet élément est de chauffer le combustible et de permettre le premier démarrage de la chaudière. Au démarrage à froid, on sélectionne le mode de chauffage électrique puis on met le brûleur en marche. Une fois de la vapeur d'eau obtenue dans le

ballon d'eau et de vapeur, on coupe le chauffage électrique, puis on ouvre la vanne d'admission de la vapeur vers le réchauffeur pour passer au chauffage à la vapeur.

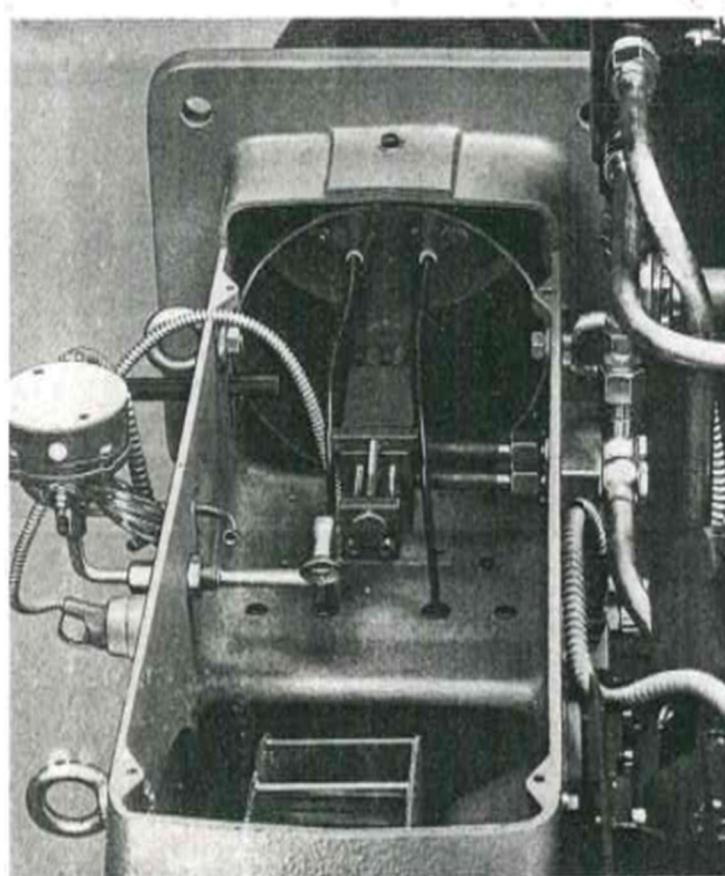


Figure 6 : Vue de la volute du brûleur (couvercle enlevé) [2]

Le brûleur fonctionne automatiquement, en liaison avec le pupitre de commande installé au pied de la chaudière. La régulation de la charge se fait en fonction de la pression de la vapeur de la chaudière par mise en marche et arrêt du brûleur à fuel. Le brûleur est un ensemble d'éléments qui se compose principalement, d'un bloc creux en aluminium coulé appelé volute. A l'intérieur de la volute sont logés :

- ⇒ Un ventilateur ;
- ⇒ Deux électrodes d'allumage ;
- ⇒ Des câbles haute tension ;

⇒ Une ligne de gicleur à retour.

La partie arrière de la volute comporte un regard circulaire en plexiglass permettant l'observation de la flamme pendant la marche de la chaudière. La partie avant est terminée par une bride pour la fixation de la volute sur la chaudière. Le dessus de la volute est fermé par un couvercle maintenu en position par des vis d'assemblage.

Sur le côté gauche de la volute, se trouve l'ouïe d'aspiration dirigée vers le bas pour l'admission de l'air de combustion. Un manostat d'air surmonte l'ouïe d'aspiration à l'intérieur de laquelle se trouvent des ventelles dont les réglages d'ouverture et de fermeture sont ajustables grâce à une roue à doigts encore appelée roue de modulation. Elle est située du côté opposé à l'ouïe d'aspiration. C'est à ce même endroit que se trouvent :

- ⇒ Le moteur du ventilateur qui puise l'air ambiant de la chaufferie via l'ouïe d'aspiration pour la combustion ;
- ⇒ Le servo-moteur à deux sens de rotation qui contrôle le mouvement des ventelles suivant les différentes allures de chauffe.

La circulation du fuel dans les réchauffeurs et le réservoir tampon du fuel, se fait par une pompe de gavage (une seconde est en stand-by). Une pompe à engrenage haute pression assure l'alimentation de la ligne de gicleur. Cette pompe a pour mission de maintenir, via un régulateur, une pression suffisante du fuel pour permettre sa pulvérisation en des milliards de gouttelettes, donc un mélange parfait avec l'air comburant. Ce mélange est enflammé par des étincelles produites par des électrodes d'allumage.

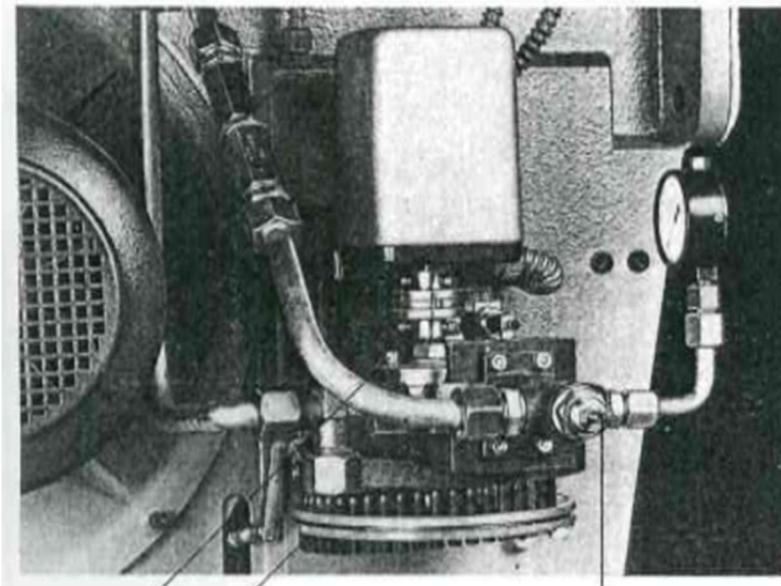


Figure 7 : Vues du moteur ventilateur, du servo-moteur et de la roue de modulation [2]

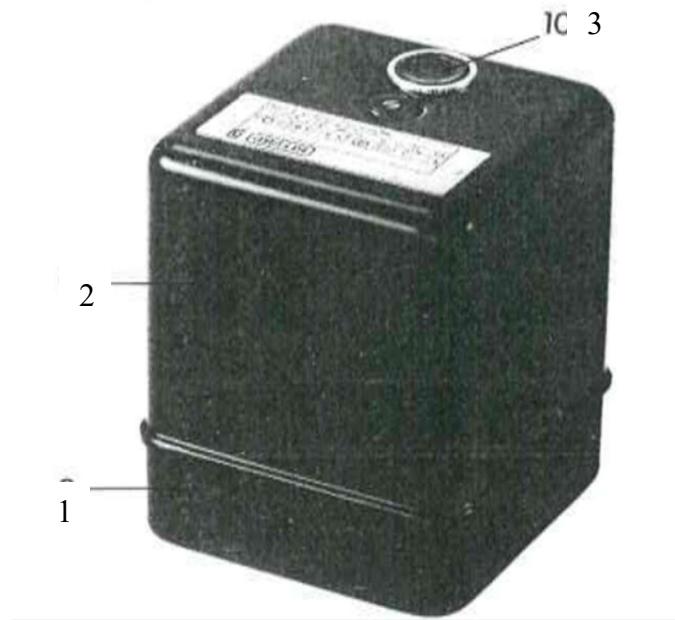
5.3 ELECTRODES ET TRANSFORMATEUR D'ALLUMAGE

Les électrodes d'allumage ont pour rôle de produire séquentiellement des étincelles pour enflammer le mélange goulettes de fuel + air. Elles sont connectées aux bornes du secondaire du transformateur d'allumage par des fils à haute isolation.

Le primaire du transformateur d'allumage est alimenté en 220 V alternatif et son secondaire génère ponctuellement une haute tension (14.000V ou 2x5.000V) au moment déterminé par le coffret à programme et de sécurité.

5.4 COFFRET A PROGRAMME ET DE SECURITE

Appelé couramment programmateur, le coffret de sécurité sert pour la surveillance, la mise en service et la commande du brûleur en service intermittent.



- 1 Base du coffret de sécurité
- 2 Couvercle du coffret de sécurité
- 3 Bouton d'acquittement des défauts

Figure 8 : Coffret de sécurité LAC avec son couvercle [2]

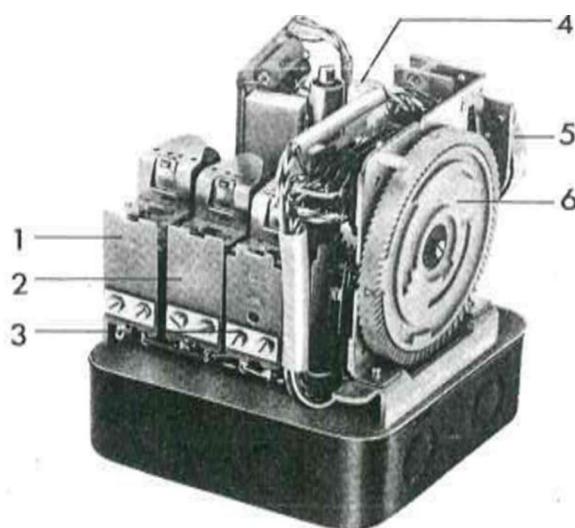
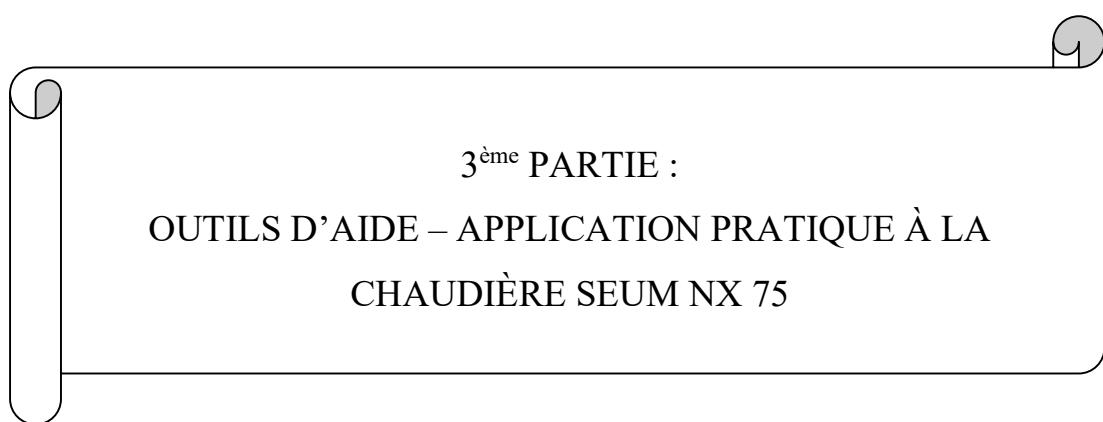


Figure 9 : Coffret de sécurité LAC sans son couvercle [2]

Coffret de sécurité LAC sans le couvercle

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1 Relais de travail AR | 5 Moteur d'entraînement du programmeur SM |
| 2 Relais de flamme FR | 6 Disque de programmation |
| 3 Relais de blocage BR | |
| 4 Lampe de signalisation L1 | |



3^{ème} PARTIE :
OUTILS D'AIDE – APPLICATION PRATIQUE À LA
CHAUDIÈRE SEUM NX 75

CHAPITRES VI : CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE - CRITERES DE CHOIX

6.1 CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Le brûleur actuellement utilisé est un modèle KL 80 RS III de marque SAFMAT, un brûleur modulant automatique à fuel lourd. Le but de notre étude est de proposer une méthodologie, un outil, permettant de sélectionner le brûleur à fuel le plus approprié selon différents critères techniques, économiques, environnemental, ...

D'après une étude technique préalablement réalisée par l'entreprise, trois solutions commerciales (A1, A2 et A3) [2] sont présélectionnées ; il s'agit de :

- A1 : Brûleur 1 ;
- A2 : Brûleur 2 ;
- A3 : Brûleur 3.

6.2 PROBLÈME PRINCIPAL

Quel outil ou quelle méthode pourrait-on utiliser pour guider efficacement dans le choix d'un brûleur à fuel pour une chaudière, tout en garantissant efficacité énergétique, fiabilité, respect des normes environnementales ... ?

6.3 CRITERES RETENUS POUR L'ANALYSE DE CHOIX DU BRÛLEUR

Le choix d'un brûleur à fuel pour une chaudière à vapeur est typiquement un problème d'aide multicritère à la décision (AMD). Plusieurs alternatives techniques doivent être évaluées simultanément selon des critères parfois contradictoires. Parmi les critères possibles, citons :

1. Puissance thermique nominale (kW)
2. Rendement énergétique (%)
3. Émissions polluantes (NOx, CO₂)
4. Facilité de maintenance / disponibilité du service après-vente
5. Coût d'achat et d'exploitation (€)
6. Fiabilité / durée de vie estimée

Pour notre étude, nous retenons les cinq critères suivants tirés du cahier des charges (Cf. Tableau 12 : Tableau des exigences techniques de l'annexe).

Tableau 2 : Critères retenus pour l'analyse AMD [2]

Critère	Symbole	Observations
Rendement énergétique (%)	C ₁	A maximiser
Coût d'investissement (€)	C ₂	A minimiser
Temps de maintenance (h/an)	C ₃	A minimiser
Émissions NOx	C ₄	A minimiser
Fiabilité (heures)	C ₅	A maximiser

CHAPITRES VII :
OUTILS D'AIDE À LA SÉLECTION

7.1 OUTILS D'AIDE À LA SÉLECTION : APPROCHE MULTICRITÈRE

L'analyse multicritère est un outil d'aide à la décision développé pour résoudre des problèmes multicritères complexes qui incluent plusieurs aspects qualitatifs et quantitatifs dans le processus décisionnel. Le domaine de l'optimisation multicritère connaît une évolution importante. Cette évolution s'est traduite par le développement d'un grand nombre de méthodes multicritères.

Nous présentons dans ce mémoire, quatre approches pertinentes applicables à notre choix en précisant sommairement, pour chacune :

- la famille méthodologique ;
- les objectifs ;
- les conditions d'application ;
- et l' intérêt concret dans ce cas d'étude.

Enfin, une application pratique sera réalisée sur le choix d'un brûleur fuel pour illustrer les développements théoriques.

7.1.1 PROMETHEE (I & II)

7.1.1.1 Famille

La méthode d'analyse multicritère PROMETHEE (ou **P**reference **R**anking **O**rganisation **M**ETHOD for **E**nrichment **E**valuations), fait partie de la famille des méthodes de surclassement (ou outranking methods), pour lequel deux traitements

mathématiques particuliers sont proposés ; le rangement partiel par (PROMETHEE I) et le rangement complet par (PROMETHEE II)

Une relation de surclassement est une relation binaire dont la signification est la suivante : une action a surclasse une action b si des arguments convaincants permettent d'affirmer que « a est au moins aussi bonne (ou pas pire) que b ». Relation que l'on peut traduire mathématiquement par : $a > b$ si, globalement, l'action a est jugée meilleure ou égale à b.

Elle se base sur des critères pondérés et utilise des seuils (indifférence, préférence) pour gérer l'incertitude et construire des "graphes de surclassement" (comme dans les méthodes PROMETHEE ou ELECTRE (à voir plus loin) qui hiérarchisent les options, permettant de trier, classer ou sélectionner le meilleur compromis.

7.1.1.2 Objectif :

- Comparer les alternatives deux à deux sur chaque critère,
- Établir :
 - un classement partiel (PROMETHEE I),
 - ou un classement total (PROMETHEE II).

7.1.1.3 Principe :

- Définition de fonctions de préférence par critère,
- Pondération des critères,
- Calcul des flux de préférence (φ^+ , φ^- , φ).

7.1.1.4 Conditions d'application

- Données quantitatives ou qualitatives codées,
- Critères hiérarchisables par poids,
- Décideur capable d'exprimer des préférences relatives.

7.1.1.5 Intérêt pour un brûleur fuel

Très adapté pour :

- Arbitrer entre rendement ↔ coût ↔ émissions ↔ maintenance,
- Justifier un choix technique auprès d'un maître d'ouvrage ou d'un auditeur.

7.1.2 GAIA (UN COMPLÉMENT DE PROMETHEE)

La méthode GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) ne sert pas à classer (c'est PROMETHEE qui classe), mais elle sert à : représenter géométriquement les alternatives et les critères afin de comprendre les compromis ayant conduit au classement.

Autrement dit :

- PROMETHEE → « *qui est le meilleur ?* »
- GAIA → « *pourquoi est-il le meilleur ?* »

Le GAIA permet de justifier visuellement le choix auprès d'un décideur non spécialiste. GAIA est une projection géométrique du problème multicritère, fondée sur une ACP (Analyse en Composantes Principales), appliquée aux performances normalisées et pondérées.

7.1.2.1 Famille

Méthodes géométriques / factorielles d'aide à la décision

7.1.2.2 Objectif :

- Visualiser les résultats issus de PROMETHEE,
- Comprendre les conflits, compromis et cohérences entre critères.

7.1.2.3 Principe :

- Projection des alternatives et critères dans un plan factoriel,

- Représentation d'un vecteur de décision global.

7.1.2.4 Conditions d'application

- Résultats PROMETHEE déjà calculés,
- Nombre de critères modéré (≈ 5 à 10).

7.1.2.5 Intérêt pour un brûleur fuel

Très utile pour :

- Montrer visuellement pourquoi un brûleur est préféré,
- Mettre en évidence les oppositions techniques (ex. coût vs rendement).

7.1.3 AHP (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS)

7.1.3.1 Famille

Méthodes de hiérarchisation et d'agrégation additive

7.1.3.2 Objectif :

- Structurer un problème complexe en hiérarchie,
- Déterminer les poids des critères par comparaisons par paires.

7.1.3.3 Objectif :

- Arbre décisionnel : objectif \rightarrow critères \rightarrow sous-critères \rightarrow alternatives,
- Matrices de comparaison pairee,
- Vérification de la cohérence des jugements.

7.1.2.4 Conditions d'application

- Nombre limité de critères et alternatives,
- Décideur disponible pour effectuer des comparaisons subjectives.

7.1.3.5 Intérêt pour un brûleur fuel

Particulièrement adapté lorsque :

- Les critères sont partiellement qualitatifs (SAV, facilité d'exploitation),
- La décision est collégiale (bureau d'études, exploitant, financeur).

7.1.4 ELECTRE (I, II, III...)

7.1.4.1 Famille

Méthodes de sur classement (comme PROMETHEE)

7.1.4.2 Objectif :

- Éliminer les alternatives non acceptables,
- Gérer explicitement les seuils d'indifférence, de préférence et de veto.

7.1.4.3 Principe :

- Analyse de concordance / discordance,
- Une alternative peut être rejetée si elle viole un critère critique.

7.1.4.4 Conditions d'application

- Critères avec exigences minimales strictes,
- Données fiables et seuils bien définis.

7.1.4.5 Intérêt pour un brûleur fuel

Très pertinent lorsque :

- Certaines normes sont non négociables (NOx, sécurité, réglementation),
- Un seul critère peut disqualifier un brûleur.

7.2 TABLEAU COMPARATIF SYNTHETIQUE

Rassemblons dans un tableau la synthèse des quatre méthodes énoncées ci-haut suivant leur famille, leur type de résultat attendu, et leur niveau de robustesse (c'est-à-dire, leur capacité à s'adapter à des variations du protocole tout en garantissant la validité du résultat et de l'analyse).

Tableau 3 : Tableau synthétique comparatif des 4 AMD retenues pour notre étude

Méthode	Famille	Type de résultat	Niveau de robustesse
PROMETHEE	Sur classement	Classement	Élevé
GAIA	Géométrique	Visualisation	Complémentaire
AHP	Hiérarchique	Score + classement	Moyen
ELECTRE	Sur classement	Sélection / rejet	Très élevé

CHAPITRES VIII :
APPLICATION À LA CHAUDIÈRE SEUM NX75, ANALYSE
DÉCISION FINALE

8.1 APPLICATION À LA CHAUDIÈRE SEUM NX75 ET ANALYSE

Pour le choix d'un brûleur à fuel pour une chaudière à vapeur, la meilleure pratique d'ingénierie suit généralement les étapes suivantes :

ELECTRE (filtrage réglementaire) → PROMETHEE II (classement) → GAIA (interprétation)

Cela permet :

- une conformité normative,
- un choix techniquement justifié,
- et une communication claire de la décision.

Résumons dans un tableau les principales approches AMD applicables au choix d'un brûleur à fuel.

Tableau 4 : Comparaison des principales approches AMD applicables au choix d'un brûleur à fuel

Méthode AMD	Famille méthodologique	Objectif principal	Type de résultats	Conditions d'application	Avantages	Limites
PROMETHEE I & II	Méthodes de sur classement	Établir un classement partiel (I) ou total (II) des alternatives	Flux de préférence (φ^+ , φ^- , φ) et classement	Critères pondérables, données quantitatives ou qualitatives codées, préférences exprimables	Robustesse, transparence, bien adaptée aux compromis techniques	Choix des fonctions de préférence parfois délicat
GAIA	Méthode géométrique / factorielle	Visualiser et interpréter les résultats PROMETHEE	Carte factorielle (plan GAIA)	Résultats PROMETHEE disponibles, nombre de critères modéré	Compréhension intuitive des conflits entre critères	Ne produit pas de classement autonome

Méthode AMD	Famille méthodologique	Objectif principal	Type de résultats	Conditions d'application	Avantages	Limites
AHP	Méthodes hiérarchiques	Pondérer les critères et classer les alternatives	Poids, scores globaux, classement	Nombre limité de critères et alternatives, jugements humains cohérents	Très pédagogique, structuration claire	Subjectivité, sensibilité aux incohérences
ELECTRE	Méthodes de sur classement non compensatoires	Éliminer ou sélectionner des alternatives acceptables	Relations de sur classement	Existence de seuils (veto, préférence), critères critiques	Gestion rigoureuse des contraintes normatives	Résultats parfois difficiles à interpréter

Remarque :

PROMETHEE et ELECTRE sont particulièrement recommandées en ingénierie industrielle lorsque la décision engage des contraintes techniques, économiques et environnementales.

8.2 DONNÉES COMMUNIQUÉES PAR L'ENTREPRISE

Tableau 5 : Données initiales fournies par IBCG-SA [2]

Brûleur	Rendement (%)	Coût (€)	Maintenance (h)	NOx (mg)	Fiabilité (h)
A ₁	92	15 000	120	120	20 000
A ₂	90	13 000	150	100	18 000
A ₃	94	17 000	100	140	22 000

8.3 ILLUSTRATION PAR LES METHODES AMD

8.3.1 FILTRAGE REGLEMENTAIRE – ELECTRE (OU LOGIQUE DE VETO)

- Si la réglementation impose un seuil NOx ≤ 150 \rightarrow tous les brûleurs restent admissibles.
- Si un seuil NOx $\leq 120^1$ \rightarrow A₃ serait éliminé.

8.3.2 CLASSEMENT TECHNICO-ECONOMIQUE – PROMETHEE II

D'après les résultats finaux des calculs présentés à l'annexe 3, nous reportons le tableau suivant.

¹ Limite européenne : 120 mg/kWhPCS pour le fioul (56 mg/kWhPCS pour le gaz naturel)

Tableau 6 : Classement obtenu après la pondération des critères et le calcul des flux.

Brûleur	Φ^+	Φ^-	Φ net	Rang
A ₃	élevé	faible	+0,143	1
A ₁	moyen	moyen	+0,015	2
A ₂	faible	élevé	-0,157	3

A₃ est globalement le meilleur compromis, malgré son coût élevé, grâce à :

- son rendement supérieur,
- sa fiabilité élevée,
- une maintenance réduite.

8.3.3 ANALYSE GÉOMÉTRIQUE ET INTERPRÉTATION (GAIA)

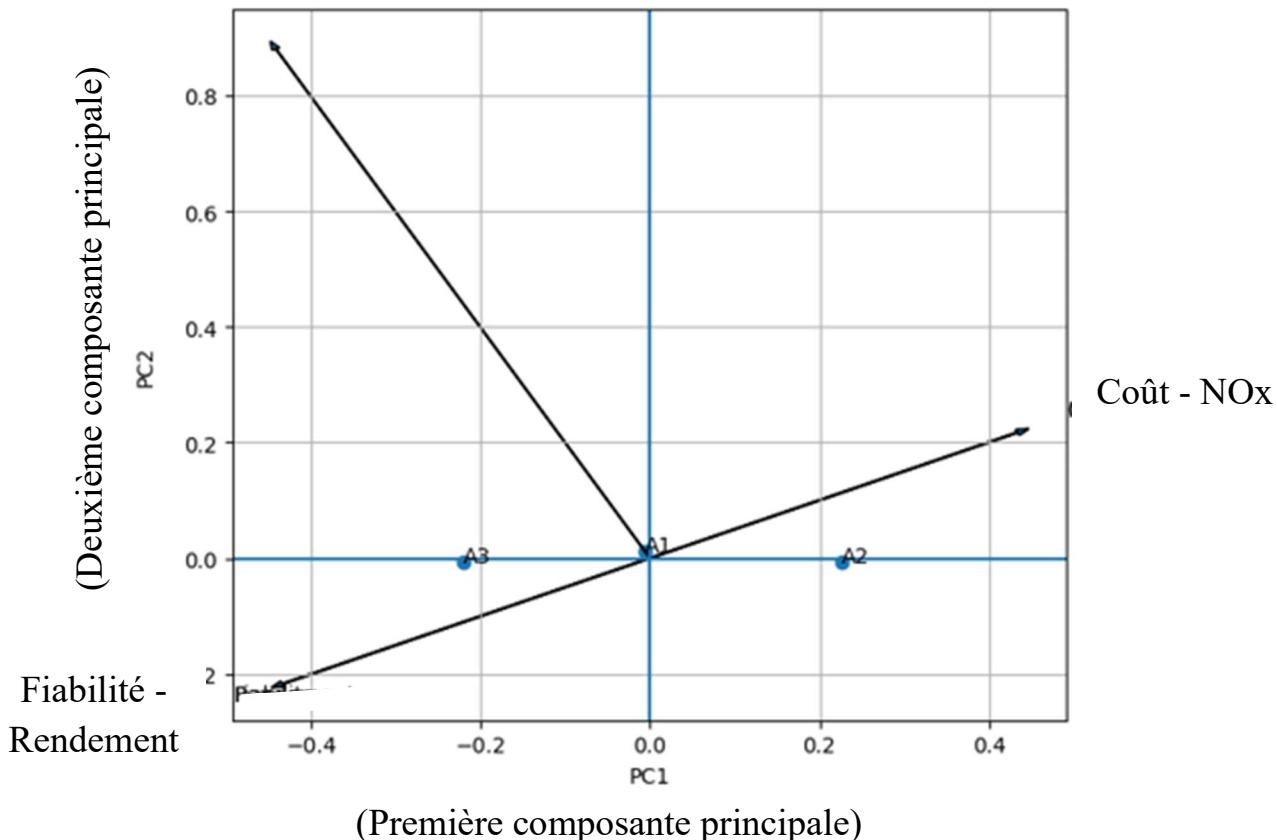


Figure 10 : Plan GAIA - Choix d'un brûleur [2]

Sur le plan GAIA :

- Les vecteurs **rendement** et **fiabilité** sont proches → critères cohérents.
- Les vecteurs **coût** et **NOx** sont en opposition → conflit économique/environnemental.
- Le brûleur **A₃** est projeté dans la direction du vecteur de décision global.

Le plan GAIA met en évidence une opposition marquée entre les critères de performance technique et les critères économiques et environnementaux. Le brûleur A₃, situé dans la direction du vecteur de décision global, confirme graphiquement son classement en tête selon PROMETHEE II.

8.4 DÉCISION FINALE

L'approche combinée ELECTRE–PROMETHEE–GAIA permet d'assurer successivement la conformité réglementaire, le classement objectif des alternatives et l'interprétation des compromis entre critères. Dans le cas étudié, le brûleur A₃ apparaît comme la solution globalement la plus performante malgré un coût d'investissement plus élevé.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail nous a permis d'identifier les paramètres critiques pour la sélection d'un brûleur à fuel, et de proposer une méthodologie de décision efficace. En suivant les étapes décrites plus haut, on est en mesure de sélectionner un brûleur à fuel approprié pour la chaudière.

La démarche que nous avons utilisée, repose sur une phase de définition du problème et des critères, suivie d'un filtrage normatif par la méthode ELECTRE, d'un classement des alternatives par PROMETHEE II et d'une analyse géométrique par GAIA permettant d'interpréter les compromis entre critères avant la prise de décision finale.

Nous notons que la combinaison des méthodes ELECTRE, PROMETHEE et GAIA constitue une approche robuste et cohérente pour la sélection d'équipements énergétiques complexes, en intégrant simultanément les contraintes réglementaires, les compromis technico-économiques et l'interprétation graphique des préférences.

La poursuite du travail pourrait intégrer des aspects dynamiques de régulation, des tests de performance sur site, et la prise en compte de combustibles alternatifs. La chaudière n'étant plus en place, nous ne pouvons pas poursuivre d'avantage nos recherches.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] <https://cap-epac.online/A%20propos/presentation>
- [2] : Archives de l'IBCG – SA ;
- [3] : <https://thermotech.ca/produit/chaudiere-industrielle-modulaire-tubes-a-eau/>
- [4] : <https://formation.xpair.com/cours/chaudieres-tubes-eau-tubes-fumee.htm>
- [5] : <https://direns.minesparis.psl.eu/Sites/Thopt/fr/co/chaudieres.html>
- [6] <https://www.xpair.com/lexique/definition/brleur.htm>

Annexes

Annexe1 : Liste de quelques fabricants de brûleur à fuel :

Babcock Wanson ;

Ecostar ;

Oertli ;

Riello ;

Viessman ;

Weshaupt.

Annexe 2 : Caractéristiques d'un fuel lourd

Caractéristiques du fioul lourd TBTS 21S Fiche technique fioul lourd

La présente fiche technique rassemble les valeurs des différentes caractéristiques des fiouls lourds TOTAL TBTS 21S ($\leq 1\%$ en soufre)



Caractéristique	Unité	Méthode	Valeurs		Observations ou recommandations
			Garantis ¹	Indicatives ²	
Teneur en soufre	% masse	NF EN 24260 NF EN ISO 14596 NF EN ISO 8754	≤ 1	≤ 1	Fixé par l'application de la réglementation
Viscosité à 20 °C	cSt	NF EN ISO 3104	$\geq 9,5$	$\geq 9,5$ ≤ 23	La grande fluidité du fioul lourd TOTAL TBTS 21S autorise des réchauffages très faibles
Point éclair	°C	NF EN ISO 2719	≥ 70	≥ 70	Surveiller les températures de stockage (50 à 60 °C) ; ne jamais approcher une flamme nue
Volume distillé à 250 °C Volume distillé à 350 °C	%	NF EN ISO 3405	< 65 < 85	≤ 65 ≤ 85	Spécification administrative, la connaissance de ces valeurs n'est pas requise pour une bonne utilisation du produit
Masse volumique à 15°C	kg.m ⁻³	NF EN ISO 12185 NF EN ISO 3675	-	860 à 990	Pour conversion des mesures de débit volumique en débit massique
Teneur en eau	% masse	NF EN ISO 12937 NF ISO 6396 NF ISO 3733	$\leq 0,6$	$\leq 0,5$	Purger régulièrement les bacs de stockage
Teneur en insolubles	% masse	NF M 07 063	$\leq 0,25$	$\leq 0,10$	
Teneur en insolubles après vieillissement chimique et thermique	% masse	ISO 10 307-2A 2B	-	$\leq 0,10$	Nettoyer régulièrement les filtres ou les filtres autonettoyants
Pouvoir calorifique inférieur	kcal/kg ¹	NF M 07-030 (calculé)	-	# 9 800	Quantité de chaleur libérée par la combustion complète du combustible
Résidu Conradson	% masse	NF ISO 6615	-	≤ 2	Leur faible taux entraîne une diminution des imbrûlés dans les gaz de combustion.
Teneur en asphalténies	% masse	NFT 60 115	-	≤ 1	
Point d'écoulement	°C	NFT 60 105	-	≤ -6 °C	Assure une pompage à basse température

¹ spécifications douanières, administratives et intersyndicales

² valeurs relevées sur les différents points de ressources (raffineries et dépôts) de TOTAL Raffinage Marketing (données : analyses 2008-2009)

➤ Sécurité

- Produits extincteurs recommandés : poudre, CO₂, mousse.
- Épandages sur le sol à traiter avec des produits absorbants
- Fiche de données sécurité téléchargeable sur Quick-FDS : <http://www.quickfds.fr/>

Annexe 3 : Calcul des flux, des préférences

A1 = Brûleur 1, A2 = Brûleur 2, A3 = Brûleur 3.

Nombre d'alternatives :

$n = 3$ et $n - 1 = 2$

➤ Pondérations

Pour la pondération, nous avons considéré que tous les critères sont également importants : c'est le principe d'indifférence à priori, aucun critère n'est privilégié. Comme il en existe 5, alors $w_j = 1 \div 2 = 0,2$.

➤ Fonction de préférence retenue (fonction de préférence type I PROMETHEE)

Pour un critère j , la formule de préférence linéaire simple s'écrit :

Formule 1: Formule de préférence linéaire $P_j(a, b) = \max(0, x'_j(a) - x'_j(b))$ $P_j(a, b)$:

où x'_j est la valeur normalisée du critère.

➤ Normalisation des critères

✓ Critère à maximiser :

Pour un critère j à maximiser, la formule s'écrit :

Formule 2: Formule de maximisation d'un critère j :

$$x'_j(a) = \frac{x_j(a) - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

- ✓ Critère à minimiser :

Pour un critère j à minimiser, la formule s'écrit :

Formule 3: Formule de minimisation

d'un critère j :

$$x'_j(a) = \frac{\max(x_j) - x_j(a)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

Les résultats numériques sont consignés dans le tableau

Tableau 7 : Résultats numériques de la normalisations des données

Brûleur	Rendement	Coût	Maintenance	NOx	Fiabilité
A_1	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50
A_2	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
A_3	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00

- Calcul des préférences agrégées $\pi(a, b)$

- ✓ Formule générale PROMETHEE

Formule 4: Formule générale

PROMETHEE $\pi(a, b)$:

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^5 w_j P_j(a, b)$$

Formule qui signifie que chaque $\pi(a, b)$ est la somme pondérée de micro-préférences.

✓ Calcul de la préférence $\pi(A_1, A_2)$

Tableau 8 : : Calcul de $\pi(A_1, A_2)$

Critère	$x'(A_1)$	$x'(A_2)$	Différence	$P_j(A_1, A_2)$
Rendement	0,50	0,00	+0,50	0,50
Coût	0,50	1,00	-0,50	0
Maintenance	0,60	0,00	+0,60	0,60
Nox	0,50	1,00	-0,50	0
Fiabilité	0,50	0,00	+0,50	0,50

$$\pi(A_1, A_2) = 0,2 \times (0,50 + 0 + 0,60 + 0 + 0,50)$$

$\pi(A_1, A_2) = 0,32$

✓ Calcul de la préférence $\pi(A_1, A_3)$

Critère	$x'(A_1)$	$x'(A_3)$	Différence	$P_j(A_1, A_3)$
Rendement	0,50	1,00	-0,50	0
Coût	0,50	0,00	+0,50	0,50
Maintenance	0,60	1,00	-0,40	0
Nox	0,50	0,00	+0,50	0,50
Fiabilité	0,50	1,00	-0,50	0

$$\pi(A_1, A_3) = 0,2 \times (0 + 0,50 + 0 + 0,50 + 0)$$

$\pi(A_1, A_3) = 0,20$

✓ Calcul de la préférence $\pi(A_2, A_1)$

Critère	$x'(A_2)$	$x'(A_1)$	Différence	$P_j(A_2, A_1)$
Rendement	0,00	0,50	-0,50	0
Coût	1,00	0,50	+0,50	0,50
Maintenance	0,00	0,60	-0,60	0
NOx	1,00	0,50	+0,50	0,50
Fiabilité	0,00	0,50	-0,50	0

$$\pi(A_2, A_1) = 0,2 \times (0 + 0,50 + 0 + 0,50 + 0)$$

$$\boxed{\pi(A_2, A_1) = 0,20}$$

✓ Calcul de la préférence $\pi(A_2, A_3)$

Critère	$x'(A_2)$	$x'(A_3)$	Différence	$P_j(A_2, A_3)$
Rendement	0,00	1,00	-1,00	0
Coût	1,00	0,00	+1,00	1,00
Maintenance	0,00	1,00	-1,00	0
NOx	1,00	0,00	+1,00	1,00
Fiabilité	0,00	1,00	-1,00	0

$$\pi(A_2, A_3) = 0,2 \times (0 + 1,00 + 0 + 1,00 + 0)$$

$$\boxed{\pi(A_2, A_3) = 0,40}$$

✓ Calcul de la préférence $\pi(A_3, A_1)$

Critère	$x'(A_3)$	$x'(A_1)$	Différence	$P_j(A_3, A_1)$
Rendement	1,00	0,50	+0,50	0,50
Coût	0,00	0,50	-0,50	0
Maintenance	1,00	0,60	+0,40	0,40
NOx	0,00	0,50	-0,50	0
Fiabilité	1,00	0,50	+0,50	0,50

$$\pi(A_3, A_1) = 0,2 \times (0,50 + 0 + 0,40 + 0 + 0,50)$$

$$\boxed{\pi(A_3, A_1) = 0,28}$$

✓ Calcul de la préférence $\pi(A_3, A_2)$

Critère	$x'(A_3)$	$x'(A_2)$	Différence	$P_j(A_3, A_2)$
Rendement	1,00	0,00	+1,00	1,00
Coût	0,00	1,00	-1,00	0
Maintenance	1,00	0,00	+1,00	1,00
NOx	0,00	1,00	-1,00	0
Fiabilité	1,00	0,00	+1,00	1,00

$$\pi(A_3, A_2) = 0,2 \times (1,00 + 0 + 1,00 + 0 + 1,00)$$

$$\boxed{\pi(A_3, A_2) = 0,60}$$

Résumons dans un tableau la matrice complète des préférences $\pi(a, b)$

Tableau 9 : Matrice complète résumées des préférences $\pi(a, b)$

$\Pi (a, b)$	A_1	A_2	A_3
A_1	—	0,32	0,20
A_2	0,20	—	0,40
A_3	0,28	0,60	—

➤ Calcul des flux PROMETHEE

- ✓ Calcul des flux de préférence positif ϕ^+

Formule 5: Flux de préférence positif ϕ^+ :

Calculs numériques

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(a, b)$$

- ✓ Brûleur A_1

$$\phi^+(A_1) = \frac{0,32 + 0,20}{2} = 0,26$$

- ✓ Brûleur A_2

$$\phi^+(A_2) = \frac{0,20 + 0,40}{2} = 0,30$$

- ✓ Brûleur A_3

$$\phi^+(A_3) = \frac{0,28 + 0,60}{2} = 0,44$$

- ✓ Calcul des flux de préférence négatif ϕ^-

Formule 6 : Flux de préférence négatif ϕ^-
$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(b, a)$$

Calculs numériques

- ✓ Brûleur A₁

$$\phi^-(A_1) = \frac{0,20 + 0,28}{2} = 0,24$$

- ✓ Brûleur A₂

$$\phi^-(A_2) = \frac{0,32 + 0,60}{2} = 0,46$$

- ✓ Brûleur A₃

$$\phi^-(A_3) = \frac{0,20 + 0,40}{2} = 0,30$$

- ✓ Calcul des flux nets ϕ (PROMETHEE II)

Formule 7 : Formule de calcul du flux net ϕ :
$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

Récapitulons dans un tableau les résultats des différents flux

Tableau 10 : Récapitulation des résultats des flux

Brûleur	ϕ^+	ϕ^-	ϕ net
A ₁	0,26	0,24	+0,02
A ₂	0,30	0,46	-0,16

Conclusion partielle du classement PROMETHEE II :

Le tableau ci-dessus des flux de préférence selon la méthode PROMETHEE II conduit à un flux net maximal pour le brûleur A_3 ($\varphi = 0,14$), suivi du brûleur A_1 ($\varphi = 0,02$), tandis que le brûleur A_2 présente un flux net négatif ($\varphi = -0,16$).

Annexe 3 : Cahier des charges fonctionnelle et technique

1. Objet du cahier des charges

Ce cahier des charges a pour objectif de définir les **exigences techniques et fonctionnelles** relatives à la proposition d'outils pour la sélection d'un **brûleur à fuel lourd** devenu défaillant et dont les pièces de rechange deviennent de plus en plus rares.

2. État des lieux de l'installation existante

- **Chaudière** : SEUM NX75 ;
- **Puissance thermique** : 750 kW ;
- **Timbre** : 15 bars ;
- **Pression de service** : 12 bars ;
- **Date de première épreuve** : 16/11/1979 ;
- **Fluide caloporteur** : vapeur d'eau saturée ;
- **Brûleur actuel** : Marque : SAFMAT Type : KL 80 RS III, fonctionnement modulant (RS) par gicleur à retour ;
- **Combustible** : fuel lourd n°2 ;
- **Alimentation** : 380 V triphasé, 50 Hz ;

3. Objectifs du projet

- Permettre de d'identifier un ou plusieurs modèles de brûleurs à fuel lourd compatibles avec la chaudière SEUM NX75.

Dans le cadre de son travail, l'étudiant n'aura pas à comparer les performances du brûleur existant avec des modèles alternatifs proposés. Le choix définitif et la décision d'acquisition seront faits par l'IBCG.

4. Exigences fonctionnelles

Tableau 11 : Tableau des exigences fonctionnelles [1]

Fonction à assurer	Niveau d'exigence	Commentaires
Alimentation en fuel lourd N°2	Obligatoire	Viscosité conforme aux normes
Fonctionnement modulant	Fortement souhaité	Pour optimiser la régulation
Démarrage/arrêt automatique	Obligatoire	Pour conserver le caractère autonome de son fonctionnement
Sécurité d'allumage et de flamme	Obligatoire	Détection flamme.

5. Exigences techniques

Tableau 12 : Tableau des exigences techniques

Caractéristiques	Valeur cible / intervalle	Tolérance / précision	Observations
Plage de puissance	500 – 900 kW	$\pm 5\%$	
Type de modulation	Modulant	À défaut : deux allures	
Rendement combustion	$\geq 88\%$	Mesuré PCI fuel lourd	A maximiser
Température maximale fuel	Jusqu'à 130°C (préchauffé)	-	
Emissions Nox	< 250 mg/Nm ³	Norme EN 676	A minimiser
Bruit	< 85 dB à 1 m	-	
Coût d'investissement			A minimiser
Fiabilité			A maximiser
Temps de maintenance			A minimiser

6. Contraintes d'intégration

- **Dimensions du brûleur** : compatibles autant que possible, l'orifice existant ;

- **Poids** : admissible par la structure de la porte chaudière ;
- **Diamètre de la tête de combustion (gueulard)** : compatible avec la découpe de la plaque foyère
- **Accessibilité** : maintenance aisée sur site ;
- **Alimentation électrique** : 400 V – 50 Hz triphasé ;
- **Interface de commande** : armoire de commande électrique séparée.

Moufoutaou BOURAIMA,

(Chef des Service Études et de la Maintenance
des Usines, Responsable Service des Achats à
IBCG-SA.)