

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

CONCEPTION ET REALISATION
D'UNE GENERATRICE DE VAPEUR POUR
L'EXTRACTION DES HUILES ESSENTIELLES
PAR ENTRAINEMENT A LA VAPEUR D'EAU

Proposé par :

Mr Y. BOUMGHAR

Etudié par :

Melle N. BEDDEK

Dirigé par :

Mr Y. BOUMGHAR

PROMOTION : Juin 1990



= DEDICACES =

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A mes très chers parents .

A mon frère .

A mes soeurs .

A mon oncle .

A tous ceux qui me sont chers.

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE GENIE CHIMIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Elève Ingénieur : M^{lle} N, BEDEK,
Promoteur : M^r Y, BOUMGHAR,

الموضوع :

بيّنت التجربة أن لسرعة التّقطير تأثير فعال على مردودية الزيوت الأساسية خلال استخلاصها من المواد النباتية بطريقة الجربخار الماء. هذا ما ارغمتنا على حساب وانجاز مولد للبخر يحتوى على جهاز خاص بتنظيم سرعة التّقطير.

RESUME :

L'experience a montre que le debit de vapeur a une influence certaine sur le rendement en huile essentielle, lors de l'extraction par entrainement à la vapeur d'eau.

Dans ce cadre, une generatrice de vapeur, partie essentielle de la methode d'extraction, dotée d'un systeme de regulation performant du debit de vapeur a ete conçu et réalisé.

ABSTRACT :

It was found that the discharge of steam has a big importance on the yield of essential oils, since we perform an extraction by steam distillation .

To consider this, we have developped and realised a boiler regulator with an appropriate system .

= MEMBRES DU JURY =

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PRESIDENT : M^{me} N. MESBOUA

Maitre de conférence à l'ENP

EXAMINATEURS: M^{me} W. YAICI

Chargée de cours à l'ENP

M^r M. BOURKIZA

Maitre de conférence à l'ENP

M^r Y. BOUMGHAR

Maitre assistant à l'ENP

— REMERCIEMENTS —

C'est avec une émotion pathétique que j'adresse mes chaleureux remerciements à Monsieur Y. BOUMGHAR pour son aide si précieuse, ses encouragements et ses conseils bénéfiques prodigués .

J'exprime ma sincère reconnaissance à Madame MESBOUA pour l'honneur qu'elle me fait de présider le jury. Qu'elle trouve ici toute ma gratitude pour son aide et ses encouragements.

Mes remerciements vont à :

- Mademoiselle YAICI .
- Monsieur BOURKIZA .

pour avoir accepté de participer à la critique de ce travail par leur présence au jury .

Ma profonde gratitude va à MM AMEDEE PACE et RENE POINCHEVAL, responsables de l'entreprise LANDIS & GYR de PARIS, pour leur gentillesse, leur concours efficace et spontané qui m'ont été d'une grande utilité pour la réalisation de ce travail .

Je tiens à remercier vivement mes très chers parents, ma soeur SABIHA, mes oncles: Tonton SALEH et Tonton DJAMEL, mon amie AMINA pour leur soutien moral, leurs encouragements, leur aide et leurs conseils .

Mes remerciements vont également à tous mes camarades et à Monsieur BENSALÉM de l'audio visuel .

Je ne saurais oublier de remercier la famille DEKHLI pour sa gentillesse et sa sympathie .

= SOMMAIRE =

INTRODUCTION

1

ETUDE THEORIQUE

A GENERALITES SUR LES HUILES ESSENTIELLES

I- GENERALITES SUR LES HUILES ESSENTIELLES	2
II- PROCÉDES D'EXTRACTION EN HUILERIE	4
II-1- EXPRESSION	5
II-2- EXTRACTION PAR SOLVANT FIXE	5
II-2-1- Enflourage	5
II-2-2- Macération	6
II-3- HYDRODISTILLATION	6
II-3-1- Hydrodistillation	6
II-3-2- Entraînement a la vapeur d'eau	7
II-3-3- Distillation mixte	8
II-4- EXTRACTION PAR SOLVANTS VOLATILS	8
II-5- EXTRACTION AU DIOXYDE DE CARBONE	9
II-6- EXTRACTION AU FORANE 113	10
III- MATIERE PREMIERE VEGETALE	11
III-1- ETUDE BOTANIQUE DE L'EUCALYPTUS GLOBULUS	11
III-2- TRAVAUX ANTERIEURS RELATIFS A L'EUCALYPTUS GLOBULUS	12
III-2-1- Propriétés physico-chimiques	13
III-2-2- Composition chimique	15

B GENERALITES SUR LA PRODUCTION DE VAPEUR

I- DEFINITION DE LA CHAUDIERE	17
II-CARACTERISTIQUES PRINCIPALES D'UNE CHAUDIERE	18

II-1- PARAMETRES	18
II-2- PUISSANCE THERMIQUE	18
II-3- TIMBRE	19
II-4- RENDEMENT THERMIQUE	20
II-5- CIRCULATION	20
II-5-1- Circulation naturelle	20
II-5-2- Circulation forcee	20
III- CHAUDIERES ELECTRIQUES	21
III-1- INTRODUCTION	21
III-2- ROLE DES CHAUDIERES ELECTRIQUES	22
III-3- AVANTAGES	22
III-4- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	23
III-4-1- Chaudières à thermoplongeurs	23
III-4-2- Chaudières a électrodes	24
IV- CARACTERISTIQUES DE LA VAPEUR D'EAU	25
IV-1- PRESSION DE VAPEUR SATURANTE DE L'EAU	25
IV-2- VOLUME MASSIQUE D'UN LIQUIDE ET D'UNE VAPEUR	26
IV-3- CHALEUR DE VAPORISATION	26
IV-3-1- Chaleur d'echauffement	27
IV-3-2- Chaleur latente de vaporisation	28
 <u>C GENERALITES SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR</u>	
I- INTRODUCTION	30
II-MECANISMES DE TRANSFERT DE CHALEUR	30
II-1- CONDUCTION	30
II-2- CONVECTION	31
II-3- RAYONNEMENT	31
III-FORMULATION DES MECANISMES DE TRANSFERT DE CHALEUR	32

III-1-	CONDUCTION THERMIQUE	
III-2-	CONVECTION THERMIQUE	34
III-3-	DETERMINATION DES COEFFICIENTS D'ECHANGE DE CHALEUR PAR CONVECTION NATURELLE	35
III-4-	RAYONNEMENT THERMIQUE	38
IV-	TRANSMISSION DE CHALEUR PAR CONDUCTION ET CONVECTION POUR DES STRUCTURES COMPOSITES CYLINDRIQUES	38
V-	ETUDE DU CALORIFUGE	41
V-1-	DEPERDITIONS D'UNE CONDUITE AVANT ISOLATION	41
V-2-	DEPERDITIONS DE LA CONDUITE APRES ISOLATION	42
V-3-	ETUDE ECONOMIQUE	43

CONCEPTION ET REALISATION

	<u>CONCEPTION DE LA CHAUDIERE</u>	45
I-	CALCUL DE LA CHALEUR A FOURNIR A LA CHAUDIERE	47
II-	CALCUL DE LA PUISSANCE DE LA CHAUDIERE	49
III-	DIMENSIONNEMENT DE LA CHAUDIERE	50
III-1-	CALCUL DE LA CHALEUR DE LA CHAUDIERE	50
III-2-	CALCUL DES DIAMETRES DES CONDUITES	51
III-2-1-	Conduite de vapeur	51
III-2-2-	Conduite d'eau	52
III-3-	CALCUL DE L'EPAISSEUR DE LA TOLE DE LA CHAUDIERE	54
IV-	CALCUL DES PERTES THERMIQUES DE LA CHAUDIERE	56
IV-1-	ECHANGE DE CHALEUR EAU-MILIEU EXTERIEUR	56
IV-1-1-	Echange de chaleur eau-paroi interne	56
IV-1-2-	Echange de chaleur par conduction à travers la paroi de la chaudiere	60

IV-1-3-	Chaleur emise a travers le calorifuge	60
IV-1-4-	Echange de chaleur calorifuge-milieu exterieur	60
IV-1-5-	Evaluation des temperatures	63
IV-1-6-	Calcul des pertes de chaleur eau-milieu extérieur	64
IV-1-6-1-	Pertes par convection eau-chaudiere	65
IV-1-6-2-	Echange de chaleur eau-virole inferieure	67
IV-2-	ECHANGE DE CHALEUR VAPEUR-MILIEU EXTERIEUR	68
IV-2-1-	Echange de chaleur vapeur-chaudiere	68
IV-2-2-	Echange de chaleur vapeur-virole superieure	70
IV-3-	PERTES THERMIQUES TOTALES	71
IV-4-	CALCUL DU CALORIFUGE	71
	<u>REALISATION DE LA CHAUDIERE</u>	73
I-	ASSEMBLAGE DES DIFFERENTS ELEMENTS DE LA CHAUDIÈRE	75
II-	APPAREILS ACCESSOIRES DE LA CHAUDIERE	75
II-1-	MANOMETRE	76
II-2-	SOUPAPE DE SURETE	76
II-3-	INDICATEUR DE NIVEAU D'EAU	77
II-4-	THERMOMETRE	77
III-	APPORT DE CHALEUR	77
IV-	ISOLATION THERMIQUE	78
V-	REGULATION AUTOMATIQUE DU DEBIT DE VAPEUR A LA SORTIE DE LA CHAUDIERE	79
V-1-	INTRODUCTION	79

V-2- PRINCIPE DE LA REGULATION AUTOMATIQUE	79
V-3- ORGANES UTILISES POUR LA REGULATION DE LA PRESSION A LA SORTIE DE LA CHAUDIERE	80
V-3-1- Une sonde de pression	80
V-3-2- Un régulateur	80
V-3-3- Un programmateur digital à 4 étages	81
V-3-4- Une vanne de courant	81
VI- MODE OPERATOIRE	83
<u>TRAITEMENT DE L'EAU ALIMENTANT LA CHAUDIERE</u>	85
I- INTRODUCTION	86
II- INCONVENIENTS DES IMPURETES	86
II-1- ENTARTRAGE	86
II-2- CORROSION	87
II-3- COLMATAGE PAR LES ALGUES	88
II-4- LE PRIMAGE	88
III- CARACTERISTIQUES DE L'EAU	88
III-1- DETERMINATION DU TITRE HYDROTOMETRIQUE	89
III-2- DOSAGE DES CHLORURES	89
III-3- TENEUR EN SILICE	90
III-4- MESURE DU pH	91
IV- TRAITEMENT DE L'EAU DE CHAUDIERE	94
IV-1- DECARBONATATION	94
IV-2- DESILICIAGE	94
IV-3- ADOUCISSEMENT	95
IV-4- DEGAZAGE	96
<u>CONCLUSION</u>	
<u>ANNEXE</u>	
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	

= NOMENCLATURE =

- T : température
 M : débit massique
 P : puissance utile nominale .
 H : enthalpie massique .
 U : tension entre phases
 I : intensité par phase
 ψ : rendement thermique
 v : volume massique
 Q : chaleur totale de vaporisation .
 q : chaleur d'échauffement .
 r : chaleur latente de vaporisation
 C_p : chaleur spécifique à pression constante .
 ϕ : flux thermique .
 S : surface .
 λ : coefficient de conductivité thermique .
 L : longueur .
 r : rayon
 h : coefficient d'échange de chaleur par convection .
 g : accélération de la pesanteur .
 β : coefficient de dilatation .
 μ : viscosité dynamique .
 ρ : masse volumique .
 ϵ : émissivité .
 σ : constante de Stefan-Boltzmann.
 R : résistance
 D : diamètre .

Z : hauteur .
V : debit volumique .
A : section des conduites .
u : vitesse
e : epaisseur .
N : normalite .

= INDICES =

v : vapeur
i : interieur
e : eau
a : air

= OPERATEURS =

exp : *exponentiel* .
Ln : *logarithme neperien* .

INTRODUCTION

L'extraction des huiles essentielles à partir des matières végétales et la construction des appareils distillatoires ont été bien perfectionnées à partir de l'époque où elles furent presque exclusivement pratiquées dans les laboratoires pharmaceutiques .

Les appareils employés pour ce type d'extraction revêtent de nombreuses variétés et leurs dimensions dépendent de l'opération et le type de distillation qu'on utilise .

Toutefois, l'entraînement à la vapeur d'eau reste l'une des méthodes d'extraction la plus utilisée. Elle exige la présence d'une génératrice de vapeur qui, prélevée par une tuyauterie l'emmène vers les appareils utilisateurs .

Les expériences ultérieures d'essais d'optimisation du rendement en huile essentielle ont montré l'importance et l'influence du taux de débit de vapeur .

Comme contribution au développement et l'approfondissement de l'axe de recherche ayant pour thème la valorisation des espèces végétales, notre travail a porté sur la conception et la réalisation d'une chaudière dotée d'un système de régulation adéquat .

**Etude
theorique**

Partie A

**GENERALITES
SUR LES
HUILES ESSENTIELLES**

I- GENERALITES SUR LES HUILES ESSENTIELLES :

Depuis l'antiquité, les parfums et les arômes furent parmi les premiers signes de reconnaissance qui marquèrent la vie des hommes [1]. Plusieurs documents témoignent de leurs usages dans l'antiquité, en Orient principalement. Outre le culte des divinités, les parfums servaient à soigner les maladies, à exalter l'individu .

L'art de la parfumerie semble avoir été connu des Egyptiens, des Chinois, des Hindous, des Hébreux, des Assyriens, des Grecs et des Romains .[2].

Le terme d'"huiles essentielles" désigne des produits huileux, volatils et odorants qu'on extrait des végétaux par différents procédés.[3].

Autrefois, considérées comme des espèces définies, les huiles essentielles livrent peu à peu leurs secrets depuis l'avènement de la chimie organique à la fin du XIX^e siècle. Elles ne les ont toutefois pas encore révélés dans leur intégralité. Elles nous offrent, écrit le docteur TAYLOR, de l'université d'Austin (Texas), plus de composés nouveaux que tous les chimistes du monde ne pourraient jamais en synthétiser pendant mille ans d'efforts .

On sait maintenant que ce sont des mélanges de nombreux constituants : on y trouve la plupart des fonctions chimiques des matières organiques telles que les carbures d'Hydrogène ou

Terpènes, les Alcools, les Aldéhydes, les Esters, les Cétones et les Phénols .

Par leur richesse en ces composés, les essences aromatiques sont pour de nombreux chercheurs, devenues des vedettes en matière thérapeutique .

Les huiles essentielles sont solubles dans l'alcool, l'éther, les huiles fixes; insolubles dans l'eau à laquelle elles communiquent leur odeur. Leur point d'ébullition varie de 160°C à 240°C et leur densité de 0,759 à 1,096. Elles sont *dextrogyres* ou *levogyres*, rarement inactives sur la lumière polarisée. Elles dissolvent les graisses, l'Iode, le Soufre, le Phosphore. Elles se distinguent des huiles grasses, qui sont fixes et tâchent le papier d'une manière permanente, en ce sens qu'elles se volatilisent par la chaleur et que leur tâche sur le papier est passagère. Généralement incolores, il en est de colorées : en rougeâtre (essence de Cannelle), en bleu (essence de Camomille), en vert (essence d'Absinthe) .

La qualité des huiles essentielles dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels le procédé d'extraction, l'état de maturation et de conservation de la substance, sa provenance,...

Il convient de mentionner que les essences naturelles sont susceptibles d'être toxiques. Les ouvriers chargés de manipuler et d'emballer les gousses de Vanille par exemple sont sujets à des accidents groupés sous le nom de Varilline consistant en maux de têtes intenses, en troubles gastro-intestinaux, en chute des sourcils,...

Il importe enfin de conserver les essences dans des flacons bien bouchés et de les maintenir à l'abri de l'air et de la lumière (verres colorés) afin d'éviter leur oxydation, leur polymérisation, et leur résinification .[4].

II- PROCÉDES D'EXTRACTION EN HUILERIE

Nous ne possédons aucun témoignage sur l'invention des premiers procédés d'élaboration des parfums. Cependant, grâce à la chimie moderne, les méthodes d'extraction des principes odorants des matières végétales ont considérablement progressé.[2].

Divers procédés sont actuellement utilisés pour l'extraction de ces produits aromatiques et selon la technique utilisée, l'extraction permet d'obtenir des huiles essentielles, des pommades, des *concrètes*, des *absolues*, des *résinoïdes* ou des infusions.[3,5].

Plusieurs procédés d'extraction sont utilisés de longue date [3], toutefois les normes liées à l'utilisation industrielle des extraits limitent en général le choix du procédé .

Ces dernières années, deux nouveaux procédés ont vu le jour, il s'agit de l'extraction au Dioxyde de Carbone et de l'extraction au Forane 113.[6].

II-1- EXPRESSION :

Ce procédé ne s'emploie que pour les écorces fraîches très riches en essence, comme les écorces d'oranger et de citron .

La matière première est fortement pressée, à froid, dans des sacs solides, au moyen de presses hydrauliques ou bien à nu dans des presses spécialement aménagées .

Les essences ainsi préparées ont généralement un parfum d'une grande finesse.[7].

II-2- EXTRACTION PAR SOLVANT FIXE :

Les solvants fixes sont principalement les matières grasses. L'extraction peut se faire, soit à froid par enflourage soit à chaud par macération .

II-2-1- ENFLEURAGE :

Cette technique est réservée aux organes végétaux particulièrement fragiles que sont les fleurs .Elle consiste en une extraction à froid par contact sans immersion en utilisant des corps gras, généralement le Saindoux ou l'Axonge.[3]

Les fleurs sont délicatement déposées une à une sur des plaques de verre recouvertes de graisse.Celle-ci est recueillie, ensuite fondue au bain-marie, décantée et enfin filtrée. Après refroidissement, une pommade qui restitue fidèlement l'odeur de la fleur est obtenue.[3,5]

Cependant, en raison du prix prohibitif de cette matière première, et de l'importante main d'oeuvre que cette technique requiert, celle-ci n'est quasiment plus pratiquée. [3]

II-2-2- MACERATION :

A l'inverse de l'enfleurage où l'extraction s'effectuait à température ambiante, la macération utilise les mêmes graisses mais à chaud, ce qui a pour effet d'augmenter leur pouvoir absorbant. Ce procédé fut longtemps utilisé pour l'obtention du parfum de rose, de violette, de mimosa, ... avant l'avènement du procédé d'extraction au moyen de solvants volatils. [3].

II-3- HYDRODISTILLATION: [8]

La majorité des huiles essentielles est obtenue par entraînement à la vapeur d'eau. Une terminologie a été développée, pour distinguer trois types de distillation :

- hydrodistillation ;
- entraînement à la vapeur d'eau;
- distillation mixte: hydrodistillation couplée à l'entraînement à la vapeur .

II-3-1- HYDRODISTILLATION :

La matière végétale à distiller est en contact direct avec l'eau bouillante.

Elle peut flotter sur l'eau ou être complètement immergée selon sa densité et la qualité à traiter. La vapeur formée au sein de l'eau bouillante entraîne les constituants de l'huile essentielle .

II-3-2- ENTRAINEMENT A LA VAPEUR D'EAU :

L'entraînement à la vapeur d'eau est un procédé industriel d'extraction de l'huile essentielle à partir de la matière végétale. Cette technique d'extraction est très ancienne. En effet, au cours d'un voyage récent, le Docteur *PASLO ROVESTI* a découvert au musée de Taxila, au Pakistan, un appareil de distillation en terre cuite, qui aurait été utilisé dans la vallée de l'Indus il y a cinq mille ans.[9].

Le procédé d'entraînement à la vapeur est basé sur le fait que la plupart des composés odorants contenus dans les végétaux sont susceptibles d'être entraînés par des aérosols de vapeur d'eau, du fait de leur point d'ébullition relativement bas et de leur caractère *hydrophobe*. Pour ce faire, la plante ou organe de la plante est placé dans un appareil de distillation, traversé par un courant de vapeur d'eau. Les principes volatils, peu solubles dans l'eau, sont entraînés et après condensation, séparés du distillat par décantation.[10].

Ce mode d'extraction est souvent employé pour l'extraction des essences car il présente les avantages suivants :[7]

- Il permet avec un matériel assez simple de traiter de grandes quantités de matières premières .

- Il fournit directement une essence assez pure .
- Il donne en général de bons rendements .

Toutefois, il ne peut être appliqué dans tous les cas car :

- Certaines substances sont altérées à la température d'ébullition de l'eau .
- Certains constituants des essences étant solubles dans l'eau, ne se retrouveront pas dans l'essence ou tout au moins n'y seront que partiellement représentés .

II-3-3- DISTILLATION MIXTE :

La matière végétale est déposée sur une grille perforée, insérée à une certaine distance au dessus du fond d'un alambic. La partie inférieure de celui-ci est remplie d'eau. L'eau est chauffée par apport de chaleur de l'extérieur de l'appareil de distillation, et la vapeur formée au sein de l'appareil, saturée et humide, à basse pression, traverse la matière végétale entraînant l'huile essentielle .

II-4- EXTRACTION PAR SOLVANTS VOLATILS :

Les huiles essentielles ont la propriété d'être solubles dans la plupart des solvants organiques, particulièrement dans les hydrocarbures aliphatiques (Pentane, Hexane) ou aromatiques (Benzène, Toluène, Xylène) .

On opère le plus souvent à température ambiante, ce qui ne provoque aucune modification ou altération dans les substances moléculaires composant la part aromatique extraite .

Ceci explique son utilisation très courante et son développement dans l'industrie actuelle des parfums.[11].

II-5- EXTRACTION AU DIOXYDE DE CARBONE :

C'est un procédé qui utilise le Dioxyde de Carbone (CO_2) sous deux états, liquide et *supercritique*. [12,13].

Ayant un bas point d'ébullition, ce dernier jouant le rôle de solvant évite la formation des *artéfacts* dus aux phénomènes de fragilité thermique et d'hydrolyse qui sont rencontrés lors de l'entraînement à la vapeur d'eau et de l'hydrodistillation .

L'extraction au Dioxyde de Carbone permet d'obtenir des produits plus concentrés et d'odeur plus fine que ceux extraits par d'autres procédés. [14,15].

C'est une technique d'extraction très sélective et certainement promue à un bel avenir. [16,17].

II-6- EXTRACTION AU FORANE 113 : [18]

Un nouveau procédé d'extraction, mettant en oeuvre le 1.1.2 trichloro 1.2.2trifloroéthane ou Forane 113, a vu le jour ces dernières années.

L'emploi d'un tel solvant permet une valorisation multiple du substrat végétal et ce au moyen d'une séparation séquencée, sans dégradation des différents constituants d'une plante. La concrète extraite au Forane 113 donnera lieu, d'une part a une extraction à l'éthanol vers l'obtention d'une absolue, d'autre part à une extraction par entraînement a la vapeur d'eau vers l'obtention d'une huile essentielle .

D'un point de vue industriel, ce procédé d'extraction peut apporter deux types d'avantages :

- Il s'agit d'une technologie propre ne produisant pas d'effluent liquide , ni de déchet organique encombrant .
- C'est un procédé peu énergivore .

III- MATIERE PREMIERE VEGETALE :

La qualité d'une huile essentielle dépend de très nombreux facteurs. Certains d'entre eux sont liés à l'espèce et au climat. Aussi, avant toute extraction est-il nécessaire de situer la plante du point de vue de l'espèce botanique que du point de vue climatologique et géologique .

III-1- ETUDE BOTANIQUE DE L'EUCALYPTUS GLOBULUS :

L'*Eucalyptus Globulus* est une des espèces appartenant à la famille des myrtacées. C'est un bel arbre ornemental originaire de l'Australie où il est une des essences arborescentes les plus répandues .

Il a été introduit dans les régions méditerranéennes il y a très longtemps, en raison de son exceptionnelle rapidité de croissance de sa *rusticité*, de son feuillage d'un vert toujours intense et du parfum qu'il dégage.[19]

Il mesure en général une trentaine de mètres de hauteur (jusqu'à 100 mètres en Australie). C'est un arbre de grande envergure aux ramifications fort nombreuses, minces et pendantes à l'extrémité. Son tronc est lisse et cendré. Ses feuilles persistantes, *polymorphes* :

ovales, longues de 8 à 15 centimètres, larges de 4 à 8 centimètres, d'un vert bleuâtre, disposées horizontalement sur les rameaux pour les feuilles jeunes. *Falciformes*, *coriaces*, alternes, longues de 16 à 30 centimètres, larges de 2 à 5 centimètres, d'un vert grisâtre, d'une odeur forte, disposées

verticalement par rapport aux rameaux pour les feuilles adultes. Les fleurs forment une boîte s'ouvrant par un couvercle. Le fruit est une capsule anguleuse .[20,21].

Toute la plante, mais plus particulièrement les feuilles contiennent l'Eucalyptol : une huile naturelle à l'odeur intense et semblable à celle du camphre. Cette huile est antiseptique et on s'en sert pour préparer divers médicaments destinés à soigner les infections des voies respiratoires. On l'utilise sous forme de décoction pour guérir les plaies externes .

L'Eucalyptus Globulus est aussi *stimulant et balsamique*, il est souvent employé dans la fabrication des liqueurs amères.[19,22] .

III-2- TRAVAUX ANTERIEURS RELATIFS

A L'EUCALYPTUS GLOBULUS ;

De nombreuses études traitant des propriétés physico-chimiques, d'autres de la composition chimique des huiles extraites des feuilles et de la structure de ses constituants, ont été effectuées sur diverses espèces d'Eucalyptus dont l'Eucalyptus Globulus.

Obtenu par distillation à la vapeur des feuilles et aussi des boutons floraux, l'essence de l'Eucalyptus Globulus est un liquide très mobile, incolore ou dont la couleur peut aller jusqu'au jaune clair ou verdâtre pâle.[23].

Elle a une odeur aromatique forte, agréable et rafraichissante de *Cinéol*, une saveur épicée et réfrigérante rappelant à la fois le camphre et la lavande.[23,25].

Elle doit son odeur au constituant principal: l'Eucalyptol [26].

III-2-1- PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES :

De manière générale, toute huile essentielle est caractérisée par un ensemble de grandeurs physico-chimiques dont nous donnons brièvement quelques définitions :

Densité (d_4^t) :

C'est le rapport du poids d'un certain volume d'échantillon à une température t au poids du même volume d'eau à température standard (4°C).[27].

Pouvoir rotatoire (α) :

Le pouvoir rotatoire d'une huile essentielle est l'angle exprimé en milliradians ou en degrés d'angle, dont tourne le plan de polarisation d'une radiation lumineuse de longueur d'onde $589,3 \pm 0,3$ nm , correspondant aux raies D du Sodium, lorsque celle-ci traverse une épaisseur de 100mm de l'huile essentielle dans des conditions déterminées de température.[28].

Indice de réfraction :

L'indice de réfraction d'une huile essentielle est le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction d'un rayon lumineux de longueur d'onde déterminée, passant de l'air dans l'huile essentielle maintenue à une température constante.

La température de référence est de 20°C sauf pour les huiles essentielles qui ne sont pas à l'état liquide à cette température.[29].

Solubilité dans l'alcool :

Une huile essentielle est dite miscible à V volumes et plus d'éthanol de titre alcoolimétrique déterminé, à la température de 20°C, lorsque le mélange d'un volume de l'huile considérée avec V volumes de cet éthanol est limpide après addition graduelle d'éthanol de même titre, jusqu'à un total de 20 volumes.[30].

Les propriétés physico-chimiques de l'huile d'Eucalyptus Globulus varient dans les limites suivantes :

- densité d_4^{15} : 0,906 à 0,925
- indice de réfraction : 1,4590 à 1,4670
- pouvoir rotatoire $(\alpha)_D^{20}$: 0° à 10°
- teneur en Cinéol : 70 à 75 %. [31].
- solubilité dans l'alcool à 70°: soluble dans 1,5 à 3 V.[32]

Les feuilles adultes sont plus riches en huile que les jeunes et leur huile est généralement plus riche en Cinéol.[33].

L'Eucalyptus Globulus donne les rendements suivants en essence :

Feuilles fraîches : 0,8 %
Feuilles sèches : 1,6 à 3 % .

III-2-2- COMPOSITION CHIMIQUE :

Les études faites jusqu'à présent intéressant la composition des huiles essentielles en général et d'Eucalyptus Globulus en particulier, restent très fragmentaires .

La première analyse de l'huile d'Eucalyptus Globulus a été déterminée par CLOEZ en 1870. Il en retira par distillation fractionnée un corps bouillant à 175°C qu'il nomma Eucalyptol. La composition exacte de ce dernier, soit $C_{10}H_{16}O$, a été reconnue par M.E. JAHNS, qui démontra l'identité de ce corps avec le Cinéol .

Dans la première fraction de distillation, BOUCHARDAT et OLIVIERO ont isolé l'alcool éthylique ainsi que des aldéhydes qui seraient responsables de l'odeur suffocante. [23,25]

WALLACH et GILDMEISTER dans la fraction bouillant à 165°C, isolèrent le α Pinène. Dans la fraction de point d'ébullition 155°C, SHIMMEL et CIE caractérisèrent le camphène. Plus récemment, on a identifié le β Pinène, le β Phélandrène, le Para-Cymène et le Limonène.

Parmi les composés oxygénés monoterpéniques, JAHNS, identifia le 1,8 Cinéol. Le Géraniol est rapporté par GANDINI comme étant le constituant principal de la fraction alcoolique .

Dans la queue de distillation, on a pu identifier le Globulol ainsi que la présence d'alcools sesquiterpéniques .

L'étude de l'huile essentielle d'Eucalyptus Globulus a montré l'existence des composés suivants : [25]

TABLEAU I : Composition chimique de l'huile essentielle d'Eucalyptus Globulus d'Espagne .

<u>Monoterpènes</u>	<u>Sesquiterpènes</u>	<u>Alcools</u>	<u>Aldéhydes</u>
<i>α</i> Pinène	Aromadendrène	Ethanol	Caproïque
Camphène	Alloaromadendrène	Linalol	Kyllique
<i>β</i> Pinène	<i>γ</i> Cadinène	Isopinocampheol	
Limonène	<i>δ</i> Cadinène	<i>α</i> Terpinéol	
Peymène		Trans Corvéol	
<i>α</i> Terpinène		Peyménol	
Phellandrène		Globulol	
Terpinène		Eudémol	
Mycène			
1,3 Cinéol			

Partie B

**GENERALITES
SUR LA
PRODUCTION DE VAPEUR**

I- DEFINITION DE LA CHAUDIERE :

Les chaudières sont des appareils conçus pour transformer de l'eau en vapeur et délivrer celle-ci à une pression et à une température déterminées .

Ce sont des capacités de formes extrêmement variées contenant de l'eau dont la chaleur nécessaire à la vaporisation est fournie par un foyer (combustion) ou éventuellement par de l'électricité et ce à l'aide de résistances électriques .

Les chaudières doivent surtout leur existence aux propriétés physiques exceptionnelles de l'eau, en particulier sa capacité thermique massique et sa chaleur latente de vaporisation élevées qui, combinées à son faible coût et à sa grande disponibilité, en ont fait le fluide thermodynamique industriel par excellence .

Les principales utilisations sont en premier lieu la production d'énergie motrice et électrique, mais aussi l'emploi comme matière première ou comme source de chaleur intermédiaire dans presque toutes les branches de l'industrie chimique, alimentaire, papetière, textiles (chauffage, distillation, évaporation, séchage, etc...) [34,35].

II- CARACTERISTIQUES PRINCIPALES D'UNE CHAUDIERE :

II-1- PARAMETRES :

Une chaudière est, conçue pour satisfaire à un certain programme de production de vapeur, établi en fonction d'une installation précise, lequel se traduit par six principaux paramètres de détermination définis pour la marche nominale :

- La nature de la source de chaleur utilisée .
- La température T_0 de l'eau d'alimentation .
- Le débit de vapeur M .
- La pression de vapeur à la sortie de la chaudière.
- La température de vapeur T , à obtenir, qui peut être :
 - * soit la température de saturation de la vapeur à la pression de fonctionnement normal de la chaudière, il s'agit alors d'une chaudière à vapeur saturée .
 - * soit une température supérieure à la saturation dite température de surchauffe, il s'agit alors d'une chaudière à vapeur surchauffée .
- La température des fumées rejetées dans le cas des chaudières à combustibles. [34].

II-2- PUISSANCE THERMIQUE :

La puissance d'une chaudière correspond au débit de chaleur qui passe de la source de chaleur au fluide à chauffer .

Elle est exprimée en unités de quantité de chaleur par heure, soit en unités de masse de vapeur produite par heure (par exemple kilogrammes par heure ou tonnes par heure). [36]

La puissance thermique transmise à l'eau et à la vapeur, ou puissance utile P , a pour expression :

$$P = M (H - H_0) \gamma \quad (1)$$

avec :

P : puissance utile nominale en KW .

M : débit massique de la vapeur en Kg/s.

H : enthalpie massique de la vapeur à une pression et à une température déterminées, en KJ/Kg.

H_0 : enthalpie massique de l'eau, à la température T_0 en KJ/Kg .

γ : rendement thermique .

Ainsi, la seule connaissance du débit M de vapeur ne suffit pas à caractériser précisément la chaudière dont la puissance thermique fait intervenir deux termes également importants : Le débit de vapeur certes, mais aussi la différence d'enthalpie massique entre la vapeur délivrée et l'eau introduite. [34].

II-3- TIMBRE :

Le timbre d'une chaudière indique la pression du fluide ne devant pas être dépassée. En effet, il ne doit jamais être supérieur à la pression utilisée par le constructeur pour

déterminer les épaisseurs des différentes parties de la chaudière, mais il peut lui être inférieur. Il est plus faible que la pression de début de levée des soupapes de sûreté qui assurent la sécurité en cas de surpression.[34].

Le timbre est habituellement exprimé en pression effective qui est égale à la pression absolue de la vapeur diminuée de la pression atmosphérique.[36].

II-4- RENDEMENT THERMIQUE ;[34]

Le rendement d'une chaudière est le rapport (habituellement exprimé en pour cent "%") de la quantité de chaleur nécessaire à la production de la vapeur à celle qui a été apportée par la source de chaleur. Ce rendement est toujours inférieur à 100 %.

II-5- CIRCULATION ;[36]

II-5-1- CIRCULATION NATURELLE :

Dans la majorité des chaudières, la circulation est naturelle, c'est à dire que le mouvement du fluide chauffé est causé uniquement par les différences de densité entre les différents points du circuit parcouru par ce fluide .

II-5-2- CIRCULATION FORCEE :

Le fluide chauffé est mis en circulation à l'aide d'une pompe spéciale en vue de faciliter les échanges thermiques .

III- CHAUDIERES ELECTRIQUES :

III-1- INTRODUCTION :

Les chaudières électriques ne sont pas une invention récente, les divers systèmes connus à ce jour furent en effet créés au début du siècle .

La première guerre mondiale, en amenant en Europe la pénurie de charbon, favorisa le développement de ces appareils mais, malheureusement, vu l'augmentation de la consommation d'énergie électrique induisant une croissance de son coût, défavorisa les chaudières électriques .

La seconde guerre mondiale, dans des conditions analogues à celles rencontrées lors de la première, amena le retour des chaudières électriques, suivi de leur mise au second plan, toujours pour des raisons de coût d'énergie électrique .

Il va sans dire que les premiers utilisateurs avaient été séduits par l'exploitation aisée de leurs chaudières électriques qui, dès les premiers temps, étaient déjà à fonctionnement automatique, et cela par comparaison avec la chauffe au charbon qui était barbare surtout lorsqu'il s'agissait de petites unités.[37].

III-2- RÔLE DES CHAUDIÈRES ÉLECTRIQUES :

Le rôle d'une chaudière électrique est de transformer d'une façon convenable l'énergie en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide approprié qui est généralement l'eau.[37] Ainsi, la production d'eau chaude, surchauffée, de vapeur, ... est assurée par des équipements dont la gamme de puissance est très étendue : celle-ci varie de quelques kilowatts à plusieurs dizaines de milliers de kilowatts pour des installations plus importantes.[38].

La puissance mise en jeu dans une chaudière électrique est donnée par la relation : (en courant triphasé)

$$P = U \cdot I \sqrt{3} \cdot \psi = (H - H_0) M \psi \quad (2)$$

avec :

U : tension entre phases en Volts (V).

I : intensité par phase en Ampères (A).

III-3- AVANTAGES : [37]

La chaudière électrique se caractérise par les avantages suivants :

- Utilisation presque intégrale de l'énergie électrique .
- Haute sécurité de fonctionnement .
- Mise en service rapide .
- Possibilités de réglage extrêmement souples .
- Faible encombrement .
- Fonctionnement ne donnant aucune nuisance .

III-4- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

On distingue deux types de chauffage fondamentaux qui sont:

- Les chaudières à thermoplongeurs .
- Les chaudières à électrodes .

III-4-1- CHAUDIERES A THERMOPLONGEURS : [37]

La chaleur est générée par des résistances électriques blindées constamment immergées dans le liquide à chauffer .

L'alimentation en énergie électrique des éléments chauffants s'effectue en basse tension, généralement en courant triphasé .

La variation de l'apport de chaleur est obtenue :

- Par tout ou rien, en commandant l'ensemble des éléments chauffants pour les petites et moyennes puissances
- Par **fractionnement** de la puissance installée ou par modulation continue pour les chaudières de forte puissance.

Le cerveau de cette commande est :

- Un simple thermostat ou pressostat selon qu'il s'agit d'une chaudière à eau surchauffée ou à vapeur .
- Un thermostat ou pressostat à plusieurs seuils permettant d'obtenir une régulation meilleure .
- Une sonde de mesure qui transmet l'information température ou pression à une régulation. [38].

III-4-2- CHAUDIERES A ELECRODES :

Dans ce type d'appareil, la chaleur est apportée au sein de la masse du liquide lui même par effet Joule. L'eau à vaporiser est utilisée comme une résistance électrique liquide capable de s'échauffer au passage du courant. Il est donc nécessaire que l'eau soit suffisamment conductrice de l'électricité, elle doit être conditionnée à la soude ou au phosphate trisodique. [37,38].

IV- CARACTERISTIQUES DE LA VAPEUR D'EAU :

Du fait de son usage répandu, dû principalement à la disponibilité de l'eau en grandes quantités, donc au prix de revient relativement peu élevé qui en résulte, les procédés de production de la vapeur ainsi que les propriétés physiques de celle-ci ont été extensivement étudiés; c'est ainsi que des tables et des diagrammes donnant les paramètres essentiels de la vapeur d'eau ont été établis [35] .

Toutes ces données nécessaires à notre étude seront répertoriées et listées .

IV-1- PRESSION DE VAPEUR SATURANTE DE L'EAU :

Considérons une certaine masse d'eau prise à une température de 0°C et à une pression P_{\bullet} maintenue constante .

En fournissant de la chaleur, la température de l'eau augmente graduellement jusqu'à une valeur T_{\bullet} , appelée température de saturation où le liquide commence à se vaporiser. De ce fait, la pression P_{\bullet} est appelée pression de vapeur saturante .

Si par exemple, P_{\bullet} est la pression atmosphérique, l'eau à laquelle on amène de la chaleur commence à se vaporiser à 100°C et si la vapeur est soumise à une pression supérieure ou inférieure, la température de vaporisation augmente ou diminue [39].

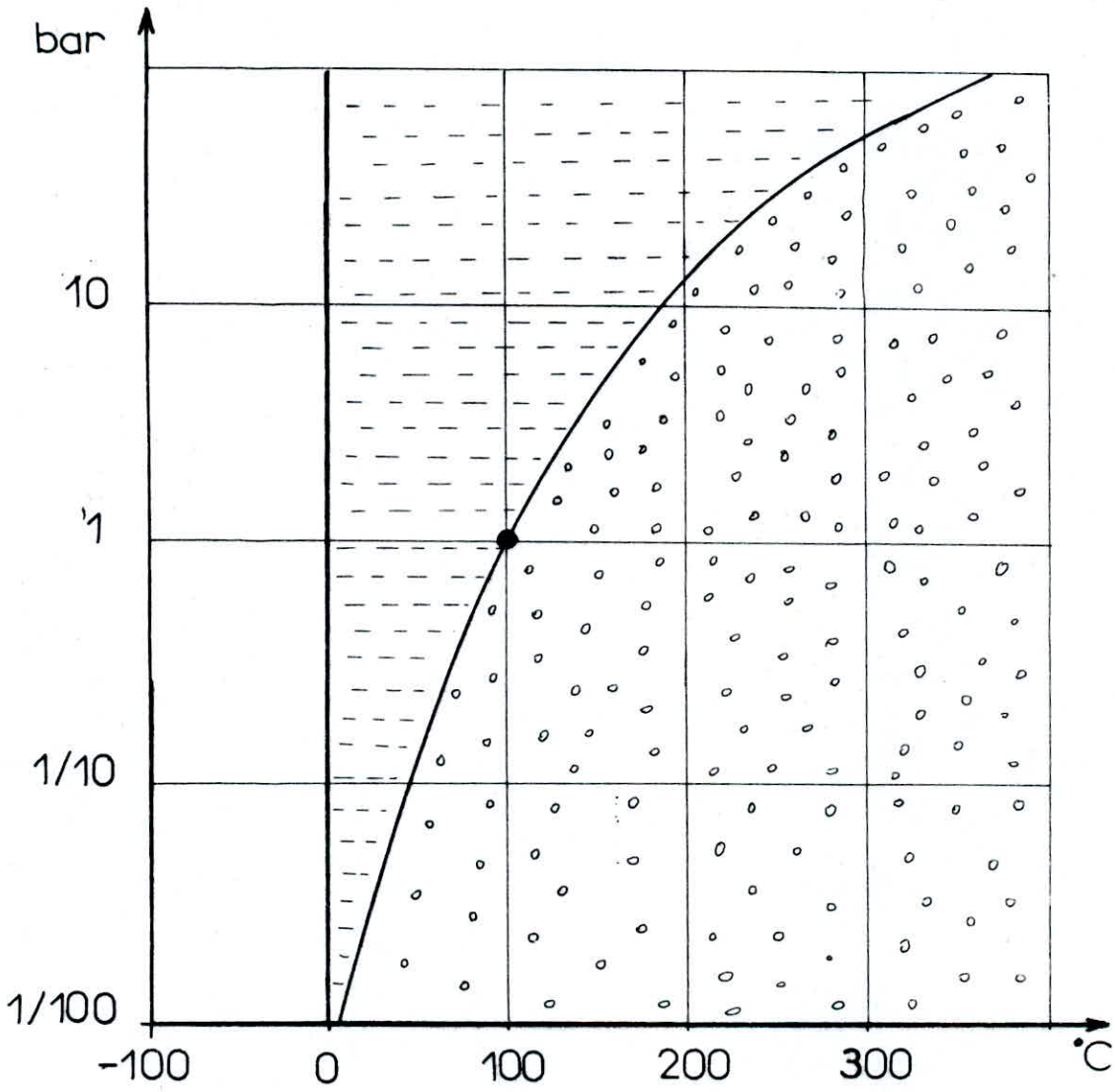


FIGURE 1 :

Variation de la température d'ébullition
de l'eau en fonction de la pression

IV-2- VOLUME MASSIQUE D'UN LIQUIDE ET D'UNE VAPEUR

Le volume massique d'un liquide ou d'un gaz est le volume occupé par l'unité de masse du corps considéré .

Pour les liquides pris à leurs points d'ébullition, une augmentation de la température et de la pression entraîne une légère élévation du volume massique.

Le volume spécifique v_s de la vapeur saturante sèche varie d'une façon importante en fonction de la température T_s et de la pression de saturation correspondante. [39,40].

IV-3- CHALEUR DE VAPORISATION :

Le phénomène de vaporisation à une pression déterminée est le résultat d'une double opération :

1- Echauffement de l'eau de 0°C à la température T_s correspondant à celle où se produit la vaporisation sous la pression envisagée. La quantité de chaleur "q" nécessaire pour produire cette opération, est appelée "*chaleur d'échauffement*" de l'eau. C'est une chaleur sensible (car elle provoque l'augmentation de la température de l'eau rendue "sensible" par le thermomètre) .

2- Vaporisation de l'eau à la température T_s correspondant à la pression envisagée, c'est-à-dire changement d'état physique de l'eau passant de l'état liquide à l'état vapeur. La quantité de chaleur " Γ " nécessaire pour produire cette vaporisation est appelée "*chaleur de vaporisation*".

C'est une chaleur latente (car elle n'est pas mise en évidence par le thermomètre).

Il en résulte que la "chaleur totale de vaporisation" Q est la somme de la chaleur d'échauffement et de la chaleur latente de vaporisation :

$$Q = q + r \quad (3)$$

Si l'on veut déterminer la chaleur à fournir pour vaporiser un kilogramme (1 Kg) d'eau dont la température initiale n'est plus au départ 0°C , mais par exemple $T^{\circ}\text{C}$, il y a lieu de déduire de la chaleur totale de vaporisation Q la quantité de chaleur q' , que possède déjà l'eau à $T^{\circ}\text{C}$.

d'où :

$$Q' = Q - q' = q + r - q' \quad (4)$$

IV-3-1- CHALEUR D'ÉCHAUFFEMENT :

Pour amener un kilogramme d'eau d'une température T_0 à une température de saturation T_s , nous devons lui fournir une quantité de chaleur q donnée par la formule :

$$q = \int_{T_0}^{T_s} C_p dT \quad (5)$$

avec : C_p : la chaleur spécifique de l'eau à pression constante .

La chaleur spécifique C_p varie très peu avec la température de sorte que l'erreur commise est faible en considérant C_p constant .

L'intégration de l'équation (5) nous donne :

$$q = C_p (T_m - T_0) \quad (6)$$

Dans le cas où la température initiale de l'eau est égale à 0°C, l'expression de la quantité de chaleur se réduit à :

$$q = C_p T_m \quad (6')$$

IV-3-2- CHALEUR LATENTE DE VAPORISATION :

La chaleur latente de vaporisation est la chaleur à fournir à une masse de 1 kilogramme de liquide pris à l'état (P_s, T_s) pour la transformer totalement en vapeur à la même pression P_s et à la même température T_s .

Elle est reliée à la température de saturation T_s comprise entre 0 et 200°C par la formule empirique suivante :

$$r = 597,5 - 0,592 T_s \quad (7)$$

r est la chaleur latente de vaporisation en Kilocalories/Kilogramme (Kcal/Kg).

Exprimée en Kilojoules/Kilogramme (KJ/Kg), elle s'écrit :

$$r = 2500,8 - 2,48 T_s \quad (7')$$

T_s étant exprimée en °C .

Pendant toute la durée de vaporisation, la température reste constante et est la même aussi bien pour l'eau entraîné de bouillir que pour la vapeur déjà séparée .

Une augmentation de l'apport de chaleur accélère la vaporisation mais n'élève pas la température .

Lorsque toute l'eau est vaporisée, on a de la vapeur saturée dont le volume est bien au-dessus du volume de la masse d'eau qui l'a produite .

Partie C

GENERALITES

SUR

LE TRANSFERT DE CHALEUR

I- INTRODUCTION

Le transfert d'énergie a lieu chaque fois qu'un gradient de température existe à l'intérieur d'un système. Il intervient également entre deux systèmes ayant des températures différentes et cela quel que soit le milieu, même vide, qui les sépare. Le processus par lequel le transfert de l'énergie s'effectue est désigné par le terme "transmission de chaleur".[41,42].

II- MECANISMES DE TRANSFERT DE CHALEUR

La littérature traitant du transfert de chaleur reconnaît généralement trois modes de transmission de chaleur : *conduction, convection, et rayonnement* .

II-1- CONDUCTION :

La conduction est un phénomène au moyen duquel la chaleur s'écoule à l'intérieur d'un milieu (solide, liquide ou gazeux) d'une région à haute température vers une autre à basse température, ou entre différents milieux mis en contact.[43].

Dans un tel mécanisme, la chaleur est transférée à travers les corps solides sans déplacement appréciable des molécules . Pour les fluides, la conduction est généralement accompagnée d'une transmission par convection et dans certains cas par rayonnement.[44].

II-2- CONVECTION ; [41]

La convection est un mode de transfert de chaleur qui se produit uniquement au sein des milieux fluides. Elle apparaît lorsqu'un fluide, liquide ou gaz, est en mouvement et présente des inhomogénéités spatiales de température. La convection intervient en particulier dans les échanges thermiques entre une paroi et un fluide en mouvement. Alors que la conduction peut être considérée comme un transfert d'énergie par des mouvements microscopiques, la convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques.

On distingue deux formes de convection :

- convection libre .
- convection forcée .

La distinction se faisant sur l'origine du mouvement permettant le transfert d'énergie d'une région de l'espace à une autre. Lorsque ce mouvement est dû à l'action simultanée des différences de température qui existent dans le milieu et d'un champ de forces massiques, on dit qu'il y a convection *libre* ou *naturelle* .

Lorsque le fluide est mis en mouvement par une pompe, un ventilateur ou tout autre moyen mécanique, on dit qu'il y a convection *forcée* .

II-3- RAYONNEMENT ;

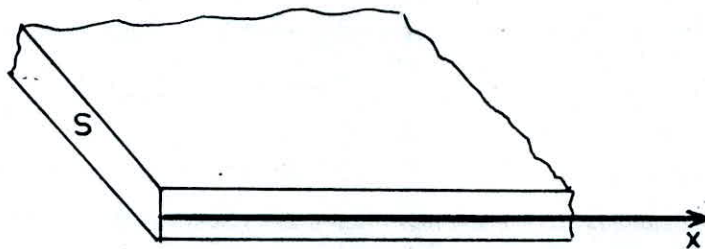
Le rayonnement est le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un corps à haute température vers un autre à basse

température, lorsque ces corps sont séparés dans l'espace ou même lorsqu'un vide existe entre eux.[43].

III- FORMULATION DES MECANISMES DE TRANSFERT DE CHALEUR

III-1- CONDUCTION THERMIQUE ;

Considérons un solide homogène dans lequel regne un gradient de température suivant une direction x .



Si on désigne par S une portion de surface perpendiculaire à la direction x , la quantité de chaleur $d\phi$ traversant la surface S pendant un temps dr est donnée par la loi de FOURIER:[43]

$$\frac{d\phi}{dr} = - \lambda S \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

λ étant le coefficient de conductivité thermique qui dépend du corps physique considéré ainsi que de la pression et de la température .

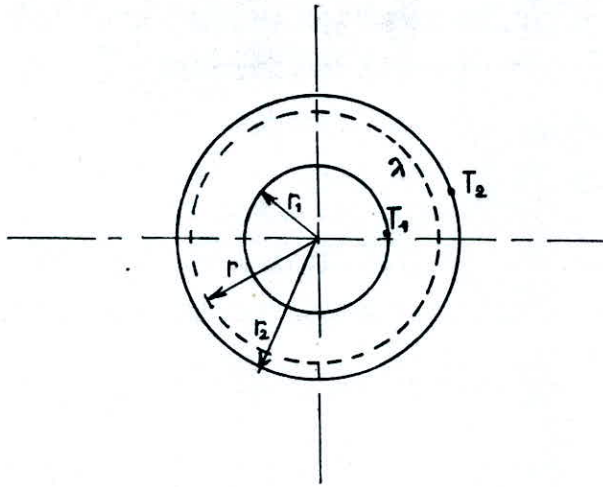
$\frac{d\phi}{dr}$ est appelé flux thermique .

En régime permanent, le flux est constant, l'équation (8) peut alors s'écrire :

$$\phi = - \lambda S \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

Pour une géométrie cylindrique, la loi de FOURIER s'écrit :

$$\phi = - \lambda S \frac{dT}{dr} \quad (9')$$



Dans ce cas, le flux de chaleur est radial et est perpendiculaire à la surface cylindrique S, de rayon r et de longueur L .

Pour un cylindre creux, l'aire est une fonction du rayon et de la longueur :

$$S = 2\pi r L$$

Le flux de chaleur par conduction peut donc s'exprimer sous la forme :

$$\phi = - 2\pi \lambda r L \frac{dT}{dr}$$

En séparant les variables et en intégrant entre T_1 pour r_1 et T_2 pour r_2 , on obtient :

$$T_2 - T_1 = \frac{\phi}{2\pi\lambda L} \ln(r_1/r_2)$$

Ainsi, pour une surface cylindrique, le flux thermique s'écrit de la façon suivante :

$$\phi = \frac{2\pi \lambda L (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (10)$$

L'équation (10) montre que le flux de chaleur radial est proportionnel à la longueur L du cylindre, à la conductivité thermique λ , à la différence entre les températures des surfaces intérieure et extérieure ($T_1 - T_2$), et, inversement proportionnel au logarithme naturel du rapport des rayons extérieur et intérieur r_2/r_1 .

III-2- CONVECTION THERMIQUE :

Le flux thermique de chaleur transmis par convection entre une surface et un fluide peut être évalué par la relation :

$$\phi = h S \Delta T \quad (11)$$

dans laquelle :

h : représente le coefficient d'échange de chaleur par convection .

S : l'aire de la surface de transmission de chaleur .

ΔT : la différence entre la température de la surface et celle du fluide loin de la surface .

La relation (11) a été établie par le savant anglais Isaac NEWTON [42].

III-3- DETERMINATION DES COEFFICIENTS D'ECHANGE DE CHALEUR PAR CONVECTION NATURELLE

La détermination du flux thermique par convection nécessite la connaissance de la valeur du coefficient h . Celui-ci dépend des conditions expérimentales et tout particulièrement :

- des caractéristiques géométriques de la paroi (forme, rugosité) .
- des caractéristiques du fluide, masse volumique, viscosité, chaleur spécifique. Ces grandeurs sont dépendantes de la nature du fluide mais aussi de la température .
- de l'écoulement du fluide, vitesse, régime *laminaire* et *turbulent* .
- de la définition de la température extérieure (il s'agit souvent d'une température moyenne, quelquefois d'une température minimale ou maximale).[41].

LORENZ publia, pour la première fois, en 1881, une étude fondamentale sur les facteurs mis en jeu dans la convection naturelle .

Les résultats expérimentaux concernant ce mode de transmission de chaleur peuvent être traduits par une équation de la forme :

$$Nu = f(Gr) g(Pr) \quad (12)$$

où f et g sont des fonctions et Nu , Gr , et Pr des nombres adimensionnels. [44].

Le tableau ci-dessus indique quelques nombres sans dimension rencontrés tant en écoulement qu'en transferts thermiques: [41]

TABLEAU II : DEFINITIONS ET INTERPRETATIONS DE QUELQUES NOMBRES ADIMENSIONNELS .

NOMBRE	INTERPRETATION	REMARQUES
REYNOLDS $Re = \frac{\rho u L}{\mu}$	Rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité	
NUSSELT $Nu = \frac{h L}{\lambda}$	Rapport de la quantité de chaleur échangée par convection à une quantité de chaleur échangée par conduction	
PRANDTL $Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$	Rapport de la diffusivité matière à la diffusivité thermique	caractérise la distribution des vitesses par rapport à la distribution de la température
GRASHOF $Gr = \frac{g \beta L^3 \Delta T}{\nu^2}$	Forces ascensionnelles multipliées par les forces d'inertie et divisées par les forces de viscosité à la puissance 2	remplace la nombre de Reynolds en convection naturelle

avec :

ρ : masse volumique du fluide considéré .

g : accélération de la pesanteur .

β : coefficient de dilatation .

C_p : chaleur massique à pression constante .

μ : viscosité dynamique .

L : hauteur de la paroi verticale .

L'équation de LORENZ est de la forme :

$$Nu = c (Gr, Pr)^n \quad (13)$$

c et n étant des constantes .

Pour des plaques verticales et des cylindres verticaux, **McADAMS** [44] recommande, les équations suivantes :

$$\text{En régime turbulent : } Nu = 0,13 (Gr, Pr)^{1/3} \quad (14)$$

$$\text{En régime laminaire : } Nu = 0,59 (Gr, Pr)^{1/4} \quad (15)$$

L'écoulement est laminaire jusqu'à une valeur du produit des nombres de Grashof et de Prandtl (Gr.Pr) égale à 10^9 , et devient tout à fait turbulent pour un produit de ces nombres supérieur à 10^9 .

Le comportement des surfaces horizontales est, cependant, légèrement différent. Pour les plaques carrées chauffées vers le haut, **FISHENDEN & SAUNDERS** ont établi les relations suivantes :

En régime laminaire : $2 \cdot 10^5 < Gr.Pr < 2 \cdot 10^7$.

$$Nu = \frac{h L}{\lambda} = 0,54 (Gr, Pr)^{1/4} \quad (16)$$

En régime turbulent : $2 \cdot 10^7 < Gr.Pr < 3 \cdot 10^{10}$

$$\frac{h L}{\lambda} = 0,14 (Gr, Pr)^{1/3} \quad (17)$$

Pour les plaques chauffées face vers le bas, et pour un régime laminaire, l'équation à utiliser est la suivante :

$$\frac{h L}{\lambda} = 0,27 (Gr, Pr)^{1/4} \quad (18)$$

Les trois dernières équations peuvent être appliquées à des disques circulaires horizontaux si L est remplacé par 0,9.D, où D est le diamètre du disque .[42].

III-4- RAYONNEMENT THERMIQUE :

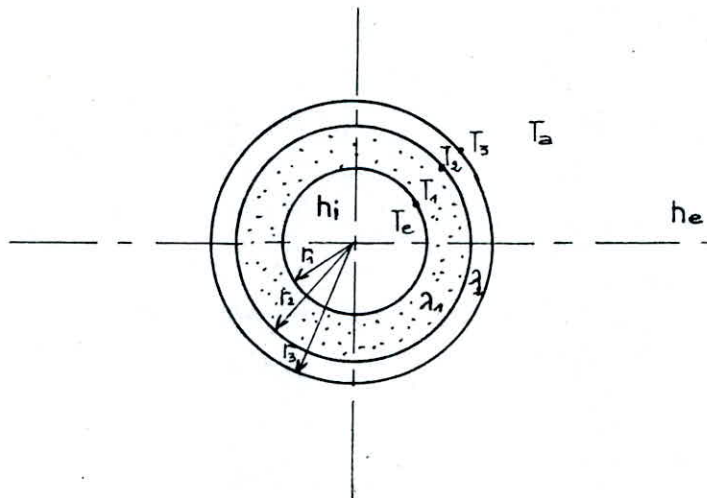
Considérons le cas de deux plans parallèles de même surface S, maintenus à des températures T_1 et T_2 et ayant respectivement pour émissivités ϵ_1 et ϵ_2 . La chaleur transmise par rayonnement est donnée par : [42]

$$\phi = \frac{\sigma S (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (19)$$

σ étant la constante de Stefan-Boltzmann .

IV- TRANSMISSION DE CHALEUR PAR CONDUCTION ET CONVECTION POUR DES STRUCTURES COMPOSITES CYLINDRIQUES

Considérons un cylindre de longueur L composé de deux couches de matériaux différents [42], dont les conductivités thermiques sont λ_1 et λ_2 respectivement :



En régime permanent, le flux de chaleur à travers chaque couche est le même .

Le flux de chaleur échangé par convection entre le fluide chaud et la surface intérieure s'écrit :

$$\phi = 2\pi r_1 L h_1 (T_{\infty} - T_1) = \frac{T_{\infty} - T_1}{R_1}$$

avec T_{∞} : température du fluide intérieur .

T_1 : température de la paroi interne de la première couche .

T_2 : température de la paroi externe de la première couche .

T_3 : température de la paroi externe de la deuxième couche .

T_{∞} : température ambiante .

R_1 : la résistance thermique relative au transfert de chaleur par convection de la surface interne .

L'échange de chaleur effectué par conduction à travers la paroi du cylindre intérieur s'écrit :

$$\phi = \frac{2\pi \lambda_1 L}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{R_2}$$

avec : R_2 : la résistance thermique relative au transfert de chaleur par conduction à travers le cylindre intérieur .

Le même flux à travers le cylindre extérieur, s'écrit :

$$\phi = \frac{2\pi \lambda_2 L}{\ln(r_3/r_2)} (T_2 - T_3) = \frac{T_2 - T_3}{R_3}$$

R_3 étant la résistance thermique relative au transfert de chaleur par conduction à travers le cylindre extérieur .

La surface extérieure échange de la chaleur par convection avec le fluide froid :

$$\phi = h_e 2\pi r_3 L (T_3 - T_a) = \frac{T_3 - T_a}{R_4}$$

R_4 étant la résistance thermique relative au transfert de chaleur par convection de la surface externe .

Ainsi, le flux de chaleur traversant radicalement deux cylindres concentriques, peut être écrit en fonction des résistances thermiques des différentes sections sous la forme :

$$\phi = \frac{T_1 - T_2}{R_1} = \frac{T_2 - T_3}{R_2} = \frac{T_3 - T_a}{R_3} = \frac{T_3 - T_a}{R_4} \quad (20)$$

Après quelques transformations, l'équation (20) se réduit à:

$$T_1 - T_a = \phi (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$$

Le flux thermique traversant radialement deux cylindres concentriques s'écrit alors :

$$\phi = \frac{T_1 - T_a}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \lambda_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \lambda_2 L} + \frac{1}{2\pi r_3 L h_e}} \quad (21)$$

V- ETUDE DU CALORIFUGE :

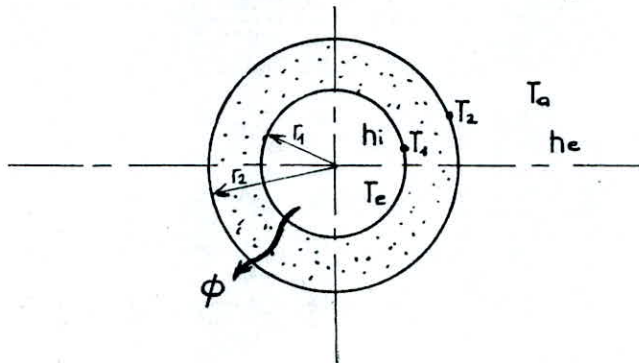
Le calorifuge a pour rôle de réduire les pertes thermiques, mais il arrive que l'addition d'une couche isolante à la surface extérieure d'une conduite ne réduit pas toujours le transfert de chaleur .

En effet, nous avons vu que le flux thermique s'écoulant radialement à travers un cylindre creux est inversement proportionnel au logarithme népérien du rayon extérieur, et que la quantité de chaleur dissipée de la surface extérieure est directement proportionnelle à ce rayon.

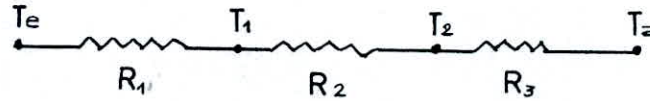
Ainsi, un accroissement de ce dernier augmente la résistance thermique due à la conduction suivant une fonction logarithmique, et, en même temps, diminue linéairement, avec le rayon extérieur, la résistance thermique de la surface extérieure [43].

V-1- DEPERDITIONS D'UNE CONDUITE AVANT ISOLATION :

Considérons une canalisation cylindrique non isolée de rayon intérieur r_1 , de rayon extérieur r_2 , de conductivité thermique λ_1 , dans laquelle circule un fluide à une température supposée uniforme T_c . Le milieu ambiant est à la température T_a .



On appellera T_1 et T_2 les températures des parois intérieure et extérieure, h_i et h_e les coefficients d'échanges thermiques superficiels intérieur et extérieur supposés constants et indépendants des températures .



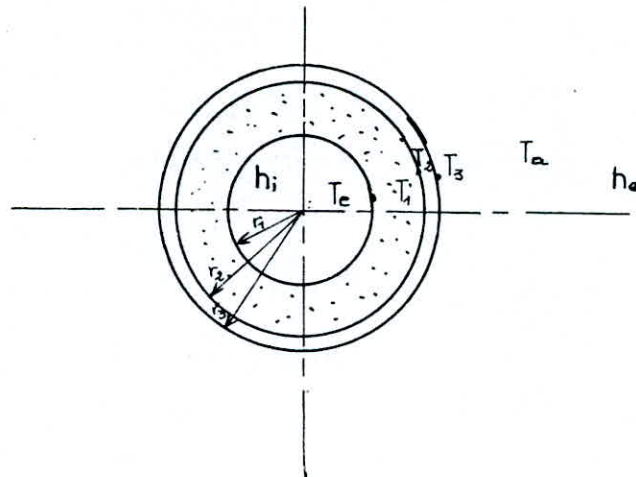
En tenant compte des équations (10) et (11), le flux thermique par metre linéaire de conduite, traversant radialement cette conduite s'écrit :

$$\phi = \frac{T_e - T_a}{R} = 2\pi(T_e - T_a) \left[\frac{1}{r_1 h_i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_1} + \frac{1}{r_2 h_e} \right]^{-1}$$

R étant la résistance totale interposée entre les surfaces de températures respectives T_e et T_a .

V-2- DEPERDITIONS DE LA CONDUITE
APRES ISOLATION; [41]

Nous décidons d'isoler cette conduite à l'aide d'un matériau de conductivité thermique λ_2 disposé en une couche de rayon extérieur r_3 .



Le flux de chaleur traversant cette conduite est donné par l'équation (21) vue précédemment :

$$\phi' = \left[\frac{1}{2\pi r_1 h_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{\lambda_2 L} + \frac{1}{r_3 h_e L} \right]^{-1} (T_e - T_a)$$

Exprimé par mètre linéaire de conduite, ce flux s'écrit :

$$\phi' = 2\pi (T_e - T_a) \left[\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{\lambda_2} + \frac{1}{r_3 h_e} \right]^{-1}$$

La résistance thermique, dans ce cas, s'écrit :

$$R' = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{\lambda_2} + \frac{1}{r_3 h_e} \right]$$

V-3- ETUDE ECONOMIQUE :

Pour mettre en évidence le rôle de l'isolant, le flux ϕ' peut s'écrire :

$$\phi' = \frac{T_e - T_a}{R'} = \frac{T_e - T_a}{R + \Delta R}$$

ΔR correspond à l'augmentation de résistance thermique obtenue par l'adjonction de la coquille isolante :

$$\Delta R = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{r_3 h_e} - \frac{1}{r_2 h_e} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{\lambda_2} \right]$$

L'économie qui peut être réalisée par cette isolation est proportionnelle à la puissance économisée ($\phi - \phi'$) :

$$\phi - \phi' = (T_e - T_a) \frac{\Delta R}{R(R + \Delta R)}$$

Pour déterminer le calorifuge, on étudie les variations de ΔR en fonction de r_3 . Sa dérivée par rapport à r_3 est :

$$\frac{d\Delta R}{dr_3} = \frac{1}{2\pi\lambda_2} \left[-\frac{\lambda_2}{r_3^2 h_e} + \frac{1}{r_3} \right]$$

Elle peut s'annuler pour $r_3 = \frac{\lambda_2}{h_e}$, ce qui signifie que, pour cette valeur de r_3 , la courbe de variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur de l'isolant passe par un minimum. Par conséquent, lorsqu'on commence à faire croître r_3 , la conduite se trouve *moins bien isolée*.

Physiquement, cela s'explique de la façon suivante: si r_3 augmente, l'épaisseur d'isolant augmente, mais aussi la surface d'échange extérieure, ce qui a tendance à diminuer l'effet de l'isolation.

**CONCEPTION
ET
REALISATION**

CONCEPTION
DE LA
CHAUDIÈRE

La chaleur est une forme d'énergie qui ne peut spontanément passer que d'un corps à température élevée à un corps de température moins élevée .

Autrement dit :

- La chaleur ne s'écoule "spontanément" que dans un sens .
- Un écoulement de chaleur suppose une différence de température .

La conversion de l'eau en vapeur est un changement de phase provoqué par l'apport ininterrompu de chaleur. Dans notre cas, cette dernière sera apportée par des résistances thermoplongeantes (effet Joule).

Ainsi, l'énergie primaire (électrique) se convertira en énergie secondaire (chaleur). Celle-ci permettra ensuite d'obtenir l'effet utile voulu .

I- CALCUL DE LA CHALEUR A FOURNIR A LA CHAUDIERE :

La chaudière est destinée à produire, en régime permanent, un débit horaire de 16 Kg/h de vapeur saturante sèche, sous la pression atmosphérique .

Lorsque de la chaleur est apportée à un kilogramme (1 Kg) d'eau prise à 20°C, la température de l'eau s'élève progressivement jusqu'à ce qu'elle atteigne le point d'ébullition .

A la pression normale (pression atmosphérique au niveau de la mer, c'est-à-dire pression absolue de 1,013 Bar soit 1 atmosphère), le point auquel l'eau commence à s'évaporer s'évalue à 100°C. [45]

La quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'eau d'un Kelvin est de 4,185 Kilojoule (KJ). Il s'ensuit alors que la quantité de chaleur sensible à apporter à l'eau pour porter sa température à 100°C, est d'après la formule (6) égale à :

$$q = C_p (T_1 - T_0) \quad (6)$$

$$q = 4,185 (100-20)$$

soit : $q = 334,80 \text{ KJ/Kg}$

Pour évaporer le kilogramme d'eau à 100°C intégralement, il faut apporter une quantité de chaleur latente de 2256,85 KJ/kg [45] .

En ajoutant à la chaleur latente de vaporisation la quantité de chaleur sensible consommée pour porter un kilogramme d'eau de 20 à 100°C, on obtient la chaleur totale à fournir à la chaudière (enthalpie d'un kilogramme de vapeur à 100°C par rapport à un kilogramme d'eau à 20°C) :

$$Q = q + r \quad (3)$$

$$Q = 334,80 + 2256,85$$

soit : $Q = 2591,65 \text{ KJ/Kg}$

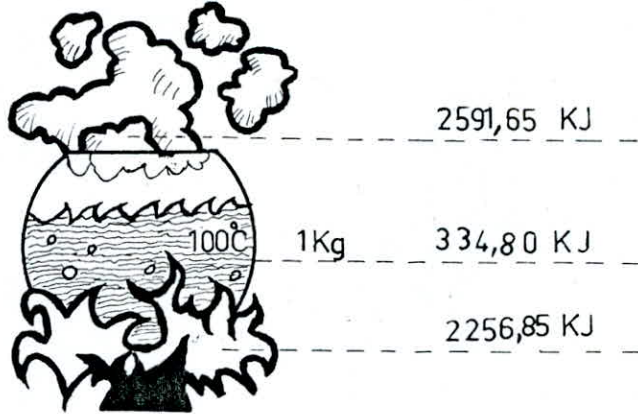


Figure 2 : Processus d'évaporation et enthalpie de l'eau

DIAGRAMME TEMPERATURE/ENTHALPIE :

Le changement de phase peut s'illustrer très facilement par le diagramme de température/enthalpie. (figure 3).

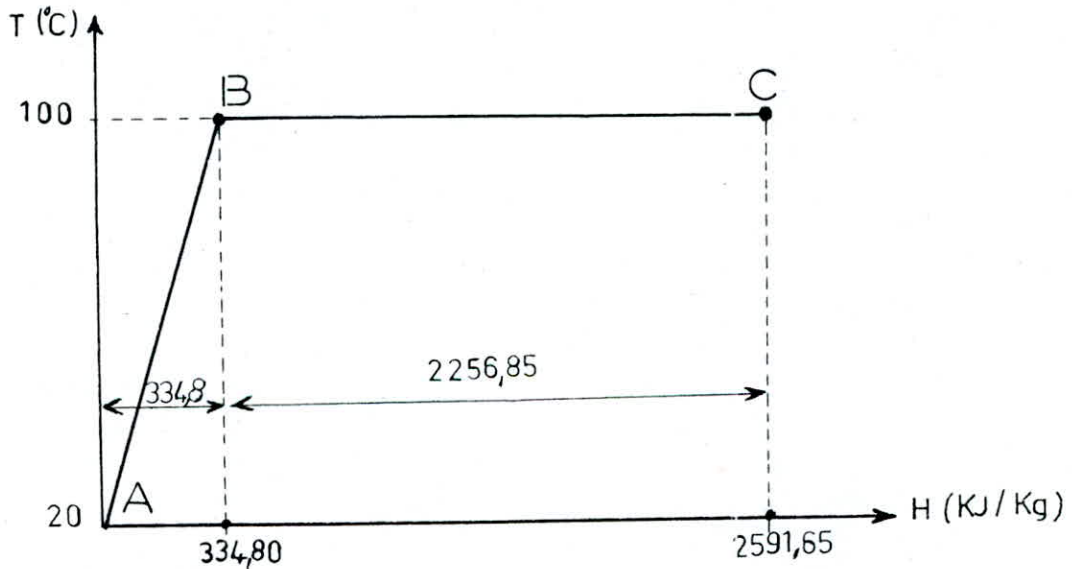


Figure 3 : DIAGRAMME DE TEMPERATURE/ENTHALPIE

Le point de départ du diagramme ci-dessus est un kilogramme d'eau à la pression atmosphérique et à une température de 20°C.

La droite AB représente la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau de 20 à 100°C .

En ce point, on peut relever sur l'axe des enthalpies une quantité de chaleur de 334,80 KJ/Kg .

La droite BC représente le processus d'évaporation. La chaleur latente est apportée progressivement le long de cette droite, jusqu'à ce que le kilogramme d'eau soit intégralement passé sous forme de vapeur au point C. L'enthalpie de cette vapeur saturée à sec est dans ce cas de 2591,65 KJ/Kg, soit la somme de la chaleur sensible et de la chaleur latente .

II- CALCUL DE LA PUISSANCE DE LA CHAUDIERE :

Connaissant la quantité de chaleur à fournir à la chaudière, nous pouvons à présent calculer la puissance de celle-ci :

soit :

$$P = \frac{Q \cdot M}{3600} \quad (22)$$

avec : P : puissance de la chaudière .

M : débit horaire de la vapeur en kilogramme/heure

$$P = \frac{16 \times 2591,65}{3600} = 11,5 \text{ KW.}$$

En tenant compte des pertes thermiques (non importantes du fait de l'addition d'une couche isolante à la surface extérieure de la chaudière), la puissance de la chaudière peut être approximée à 12 KW .

III- DIMENSIONNEMENT DE LA CHAUDIERE

III-1- CALCUL DE LA HAUTEUR DE LA CHAUDIERE ;[39]

Le corps de la chaudière est un cylindre à paroi mince .
La production de la chaleur s'effectue à l'aide de résistances électriques thermoplongeantes (par effet Joule) devant être constamment immergées dans l'eau. Il est alors nécessaire de choisir un diamètre D de la chaudière suffisant pour pouvoir les placer à l'intérieur de celle-ci .

Nous choisissons un diamètre D et une hauteur d'eau égaux à 40 centimètres "cm", (la longueur des résistances étant de 30 cm).

Lorsqu'une certaine quantité d'eau est vaporisée, nous obtenons de la vapeur saturée dont le volume est bien au-dessus du volume de la masse d'eau qui l'a produite .

De ce fait, si nous supposons que la totalité d'eau contenue dans la chaudière est vaporisée, la hauteur de vapeur devrait être supérieure à la hauteur d'eau .

Vu que cette dernière est fixée à 40 centimètres, nous choisissons une hauteur de vapeur égale à 60 centimètres .

Ainsi, la hauteur totale de la chaudière sera égale à la somme des hauteurs d'eau et de vapeur :

$$Z = 40 + 60 = 100 \text{ cm}$$

soit :

$$Z = 1 \text{ m}$$

où Z représente la hauteur totale de la chaudière .

III-2- CALCUL DES DIAMETRES DES CONDUITES

La chaudière doit disposer de deux conduites dont l'une sert à dégager la vapeur produite et l'autre à amener l'eau nécessaire à l'alimentation .

III-2-1- CONDUITE DE VAPEUR :

Le diamètre de la conduite de vapeur dépend des caractéristiques de la vapeur à transporter, à savoir :

- La pression
- Le débit
- Le volume massique .

Le débit volumique de vapeur est donné par la relation :

$$V = A \cdot u \quad (23)$$

Avec :

V : le débit volumique de la vapeur .

A : la section de la conduite .

u : la vitesse de la vapeur .

Comme la conduite de vapeur est circulaire, la surface de celle-ci est proportionnelle au diamètre à la puissance deux (2), soit :

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

où : d représente le diamètre de la conduite de vapeur.

Le débit volumique aura alors pour expression :

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 u$$

soit :

$$d = 2 \sqrt{\frac{M \cdot v_m}{\pi u}} \quad (24)$$

Les tables thermodynamiques donnent pour la vapeur à une température de 100°C, un volume massique v_m égal à 1,673 mètres cube/kilogramme (m^3/Kg). [45]. En prenant une vitesse moyenne pour la vapeur égale à 2 m/s, le diamètre de la conduite aura alors pour valeur : [39]

$$d = 2 \sqrt{\frac{16 \times 1,673}{3,14 \cdot 3600 \cdot 2}} = 0,06 \text{ m}$$

$$d = 6 \text{ cm .}$$

III-2-2- CONDUITE D'EAU :

En régime permanent, les débits horaires d'eau alimentant la chaudière, et de la vapeur doivent être identiques.

Le débit volumique de l'eau est donné par la relation suivante :

$$V = \rho \cdot A' \cdot u' \quad (25)$$

avec :

ρ : masse volumique de l'eau

A' : section de la conduite d'eau

u' : vitesse d'écoulement de l'eau .

Etant donné que la conduite d'eau est circulaire, l'expression (25) devient :

$$V = \frac{\pi}{4} \rho \cdot u' \cdot d'^2$$

soit :

$$d' = 2 \sqrt{\frac{M}{\pi \rho u'}}$$

En prenant une vitesse moyenne pour l'eau égale à 0,05 m/s, [39] le diamètre de la conduite aura pour valeur :

$$d' = 2 \sqrt{\frac{16}{3,14 \times 10^3 \times 3600 \times 0,05}} = 0,01 \text{ m}$$

soit :

$$d' = 1 \text{ cm}$$

**III-3- CALCUL DE L'ÉPAISSEUR DE LA TÔLE
DE LA CHAUDIÈRE :**

D'après LEMASSON [39], l'épaisseur de la tôle pour des chaudières à corps cylindrique, est donnée par la formule suivante :

$$e = \frac{P D_i}{2\alpha R_m} + 1 \text{ mm (constante d'usure)} \quad (26)$$

avec :

P : pression effective. Rappelons que 1 Bar=1 daN/cm²

D_i : diamètre intérieur de la chaudière .

R_m : résistance de sécurité .

α : coefficient de soudure égal à 0,65 pour des soudures vérifiables .

La résistance de sécurité peut s'exprimer de la manière suivante :

$$R_m = \frac{R}{s} \quad (27)$$

avec :

R : la charge de rupture minimale

s : le coefficient de sécurité égal à 3,5 .

Etant donné que la tôle de la chaudière est constamment en contact avec l'eau, nous avons choisi de l'acier inoxydable, de désignation AFNOR Z12 CN 25/20 et ayant pour charge de rupture, une valeur égale à 55 daN/mm² .

D'après la formule (26), nous remarquons que l'épaisseur de la tôle est proportionnelle à la pression effective régnant à

l'intérieur de la chaudière. Ceci nous a contraint à choisir une pression effective de 5 Bars, supérieure à la pression atmosphérique afin de s'assurer contre tout risque .

L'épaisseur de la tôle de la chaudière aura alors pour valeur :

$$e = \frac{0,05 \times 400}{2 \times 0,65 \times \frac{55}{3,5}} + 1$$

$$e = 0,979 + 1 = 1,979 \text{ mm}$$

soit :

$$e \approx 2 \text{ mm}$$

Ainsi, pour la réalisation de la chaudière, nous utiliserons de l'acier inoxydable de désignation AFNOR Z12 CN 25/20, ayant 2mm d'épaisseur .

IV- CALCUL DES PERTES THERMIQUES DE LA CHAUDIERE

Toute forme de production et d'accumulation de chaleur utile a pour corollaire des pertes plus ou moins grandes d'énergie calorifique .

Ainsi, étant donné que la chaudière est destinée à produire de la vapeur à partir de la chaleur qui lui est fournie, tout échange de chaleur avec le milieu extérieur constitue une perte d'énergie. Celle-ci varie selon que le fluide contenu dans la chaudière est de l'eau ou de la vapeur .

IV-1- ECHANGE DE CHALEUR EAU-MILIEU EXTERIEUR :

IV-1-1- ECHANGE DE CHALEUR EAU-PAROI INTERNE :

L'échange de chaleur s'effectue par convection, entre l'eau et la face interne de la chaudière (figure 3) .

Le flux échangé ϕ_1 s'écrit, d'après l'équation (11) :

$$\phi_1 = h_1 S_1 (T_e - T_1) \quad (28)$$

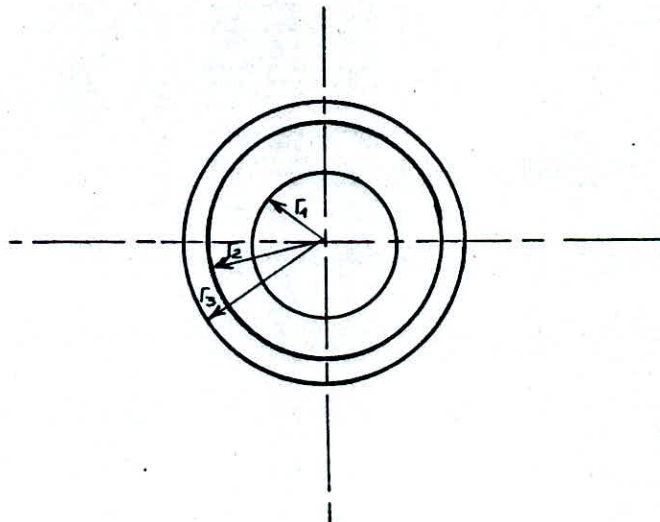
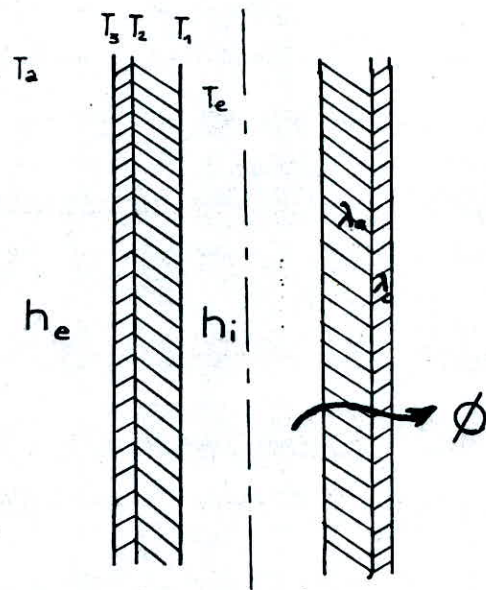
avec :

h_1 : coefficient de transfert de chaleur par convection eau-paroi interne de la chaudière .

S_1 : surface interne de la transmission de chaleur de l'eau .

T_e : température de l'eau dans la chaudière .

T_1 : température de la paroi interne de la chaudière.



Le coefficient de transfert de chaleur par convection dans le fluide h_1 peut être obtenu à partir du nombre de NUSSELT.

D'après la formule (13), ce nombre adimensionnel s'écrit :

$$Nu = \frac{h_1 L_e}{\lambda_e}$$

$$Nu = c \left[\frac{L_e^3 \cdot \rho_e^2 \cdot g \cdot \beta_e \cdot \Delta T \cdot C_{p_e} \cdot \mu_e}{\mu_e^2 \lambda_e} \right]^n \quad (29)$$

avec :

L_e : hauteur de l'eau

λ_e : conductivité thermique de l'eau .

β_e : coefficient de dilatation de l'eau .

μ_e : viscosité de l'eau .

C_{p_e} : chaleur massique à pression constante de l'eau.

d'où nous tirons :

$$h_1 = \frac{\lambda_e}{L_e} c \left[\frac{L_e^3 \cdot \rho_e^2 \cdot g \cdot \beta_e}{\mu_e^2} \frac{C_{p_e} \cdot \mu_e}{\lambda_e} \right]^n \Delta T^n \quad (30)$$

Par substitution de la relation (30) dans la formule (28) nous aurons :

$$\phi_1 = \frac{\lambda_e}{L_e} c \left[\frac{L_e^3 \cdot \rho_e^2 \cdot g \cdot \beta_e}{\mu_e^2} \frac{C_{p_e} \cdot \mu_e}{\lambda_e} \right]^n S_1 \Delta T^{n+1} \quad (31)$$

avec : $\Delta T = T_e - T_1$

Les propriétés physiques de l'eau doivent être évaluées à une température T_m moyenne du film :

soit : $T_m = \frac{T_e + T_1}{2}$

Comme la température de surface T_1 n'est pas connue, nous admettrons d'abord une certaine valeur de cette température à partir de laquelle nous concluerons en première approximation la conductance par unité de surface. S'il existe une différence entre la valeur supposée et la valeur calculée de T_1 , nous prendrons cette dernière pour chercher une nouvelle valeur du coefficient d'échange de chaleur et ainsi de suite .

Etant donné que la convection est forte à l'intérieur de la chaudière et que l'écart de température entre la surface interne du corps T_1 et celle du fluide T_2 n'est pas important, nous supposons provisoirement :

$$t_m = t_2 = 100^\circ\text{C}$$

Les propriétés physiques de l'eau à la température de saturation sont les suivantes :

$$\rho = 960,6 \text{ Kg/m}^3 .$$

$$\beta_2 = 7,49 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K} .$$

$$\mu_2 = 0,281 \cdot 10^{-3} \text{ N.s/m}^2 .$$

$$Pr = 1,74 .$$

$$\lambda_2 = 0,680 \text{ W/m.K} .$$

Ces valeurs nous permettent de calculer le nombre de GRASHOF :

$$Gr = \frac{L_0^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta_2 \cdot \Delta T}{\mu_2^2}$$

$$Gr = \frac{(0,4)^3 \times (960,6)^2 \times 9,81 \times 7,49 \times 10^{-4} \cdot \Delta T}{(0,281 \times 10^{-3})^2}$$

$$Gr = 5,496 \cdot 10^9 \Delta T$$

Connaissant la valeur du produit des nombres de Grashof et de Prandtl, nous pouvons déterminer le régime d'écoulement du fluide :

$$Gr, Pr = 5,496 \cdot 10^9 \Delta T \times 1,74$$

$$Gr, Pr = 9,680 \cdot 10^9 \Delta T$$

Comme le produit $(Gr \times Pr)$ est compris entre 10^9 et 10^{12} et que le corps de la chaudière est cylindrique, nous utilisons la corrélation de McADAMS, donnée par la formule (14) :

$$Nu = 0,13 (Gr \times Pr)^{1/3}$$

Cette corrélation nous permettra d'accéder à la valeur du coefficient du transfert de chaleur par convection dans le fluide intérieur h_1 et de déterminer ainsi le flux de chaleur échangé :

$$h_1 = \frac{\lambda_e}{L_e} 0,13 (Gr \times Pr)^{1/3} \quad (32)$$

$$h_1 = \frac{0,680}{0,4} 0,13 (9,680 \cdot 10^9 \Delta T)^{1/3}$$

$$h_1 = 471 \cdot \Delta T^{1/3}$$

Le flux de chaleur échangé s'écrit alors :

$$\phi_1 = 471 \cdot S_1 (T_e - T_1)^{4/3}$$

IV-1-2- ECHANGE DE CHALEUR PAR CONDUCTION A TRAVERS

LA PAROI DE LA CHAUDIERE :

Le flux de chaleur ϕ_2 échangé par conduction à travers la paroi de la chaudière, est donné par la formule (10) :

$$\phi_2 = \frac{2\pi \lambda_a L_a (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)}$$

avec :

λ_a : conductivité thermique de l'acier utilisé

La température T_2 n'est pas connue .

IV-1-3- CHALEUR EMISE A TRAVERS LE CALORIFUGE :

Le flux de chaleur ϕ_3 à travers le calorifuge, s'écrit :

$$\phi_3 = \frac{2\pi \lambda_c L_c (T_2 - T_a)}{\ln(r_3/r_2)}$$

λ_c étant la conductivité thermique de la couche isolante.

Pour le calorifuge, nous utilisons du liège dont la conductivité thermique à 100°C est de 0,037 W/mK.

IV-1-4- ECHANGE DE CHALEUR CALORIFUGE-MILIEU EXTERIEUR

La face du calorifuge étant exposée à l'air, l'échange de chaleur s'effectue donc par convection et par rayonnement.

Le flux de chaleur ϕ_A échangé par convection s'écrit :

$$\phi_A = h_a S_a (T_3 - T_a) .$$

avec :

h_a : coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air et la couche extérieure de la chaudière.

S_a : la surface extérieure de la transmission de la chaleur .

Le coefficient de transfert de chaleur par convection dans le fluide extérieur (air) h_a peut être obtenu en utilisant les corrélations vues dans la partie théorique .

Le nombre de Nusselt s'écrit :

$$Nu = \frac{h_a L_a}{\lambda_a}$$

$$Nu = c \left[\frac{L_a^3 \rho_a^2 g \beta_a \Delta T_a}{\mu_a^2} \frac{Cp_a \mu_a}{\lambda_a} \right]^n$$

avec :

ρ_a : masse volumique de l'air

β_a : coefficient de dilatation de l'air

μ_a : viscosité de l'air

Cp_a : chaleur massique de l'air à pression constante.

et: $\Delta T_a = (T_3 - T_a)$.

Nous supposons une température ambiante de 20°C.

A cette température, les tables donnent les propriétés physiques de l'air suivantes: [45]

$$\rho_a = 1,16 \text{ Kg/m}^3 .$$

$$\mu_a = 18,2 \cdot 10^{-6} \text{ N.s/m}^2 .$$

$$\beta_a = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$$

$$\lambda_a = 0,025 \text{ W/mK}$$

Ces valeurs nous permettent de calculer le nombre de Grashof :

$$Gr = \frac{L^3 \rho_a^2 g \beta_a \Delta T_m}{\mu_a^2}$$

$$Gr = \frac{(0,4)^3 \times (1,16)^2 \times 9,81 \times 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T_m}{(18,2 \cdot 10^{-6})^2}$$

$$Gr = 8,67 \cdot 10^6 \cdot \Delta T_m$$

$$Gr, Pr = 8,67 \cdot 10^6 \cdot \Delta T_m \times 0,71$$

$$Gr, Pr = 6,15 \cdot 10^6 \cdot \Delta T_m$$

Comme le produit (Gr, Pr) est compris entre 10^4 et 10^9 et que le corps de la chaudière est cylindrique, nous appliquons la relation (15) :

$$Nu = 0,59 (Gr, Pr)^{1/4}$$

d'où :

$$h_a = \frac{\lambda_a}{L} 0,59 (Gr, Pr)^{1/4}$$

$$h_a = \frac{0,025}{0,4} 0,59 (6,15 \cdot 10^6 \cdot \Delta T_m)^{1/4}$$

$$h_a = 1,84 \cdot \Delta T_m^{1/4}$$

Le flux de chaleur s'écrit alors :

$$\phi_4 = 1,84 . S_e (T_3 - T_a)^{5/4}$$

IV-1-5- EVALUATION DES TEMPERATURES :

Le flux thermique résultant de l'échange de chaleur avec le milieu extérieur peut être déterminé en calculant les températures T_1 , T_2 et T_3 des parois .

Etant donné que l'échange de chaleur s'effectue du fluide intérieur (eau) vers le fluide extérieur (air), les températures T_e, T_1, T_2, T_3 et T_a varient d'une façon décroissante. Autrement dit :

$$T_e > T_1 > T_2 > T_3 > T_a$$

En supposant que le calorifuge n'existe pas, c'est-à-dire $\phi_3 = 0$, nous avons le système d'équations suivant :

$$\phi_1 = 471 . S_1 (T_e - T_1)^{4/3}$$

$$\phi_2 = \frac{2\pi \lambda_e L_e (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)}$$

$$\phi_4 = 1,84 . S_e (T_3 - T_a)^{5/4}$$

En régime permanent, le flux de chaleur à travers chaque couche est le même .

Ainsi, l'égalité des deux dernières équations, nous donne :

$$\frac{2\pi \lambda_e L_e (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} = 1,84 . S_e (T_3 - T_a)^{5/4}$$

d'où nous tirons :

$$T_1 = T_2 + 1,84 . S_e \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \lambda_e L_e} (T_2 - T_a)^{5/4} \quad (33)$$

Par substitution de T_1 dans ϕ_1 , nous aurons :

$$\phi_1 = 471, S_1 \left[T_2 - T_2 - 1,84 \cdot S_2 \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \lambda_2 L_2} (T_2 - T_2)^{5/4} \right]^{4/3}$$

Ce flux ϕ_1 peut également s'exprimer par :

$$\phi_1 = 1,84 \cdot S_2 (T_2 - T_2)^{5/4}$$

d'où :

$$T_2 - T_2 = \left[\frac{471 \cdot S_1}{1,84 S_2} \right]^{4/3} \left[T_2 - T_2 - 1,84 \cdot S_2 \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \lambda_2 L_2} (T_2 - T_2)^{5/4} \right]^{5/4}$$

avec:

$$S_2 = \pi \cdot D_2 \cdot L_2$$

D_2 étant le diamètre extérieur de la chaudière .

$$S_2 = 3,14 \times 0,404 \times 0,4$$

$$S_2 = 0,5074 \text{ m}^2$$

$$S_1 = \pi \cdot D_1 \cdot L_1$$

$$S_1 = 3,14 \times 0,400 \times 0,4$$

$$S_1 = 0,5024 \text{ m}^2$$

d'où :

$$T_2 = 83,77 \left[100 - T_2 - 2,27 \cdot 10^{-4} (T_2 - 20)^{5/4} \right]^{16/15} + 20$$

La résolution de cette équation nous donne :

$$t_2 = 99,0^\circ\text{C}$$

Connaissant la valeur de T_2 nous pouvons accéder à celle de T_1 en appliquant la relation (33) .

Après calcul, nous trouvons :

Après calcul, nous trouvons :

$$t_1 = 99,1^\circ\text{C}$$

Ainsi, connaissant les différentes valeurs des températures, nous pouvons déterminer celles des coefficients de transfert de chaleur par convection et par conséquent le flux thermique échangé pourra être connu .

L'échange de chaleur par rayonnement entre le calorifuge et le milieu extérieur est négligeable .

IV-1-6- CALCUL DES PERTES DE CHALEUR: EAU-MILIEU EXTERIEUR

IV-1-6-1- Pertes par convection eau-chaudière :

Vu que les températures des parois de la chaudière sont connues, nous pouvons à présent déterminer le flux de chaleur exact échangé par convection entre l'eau et le corps de la chaudière.

En effet, d'après la relation (28), nous avons :

$$\phi_1 = h_1 S_1 (T_e - T_1)$$

Le coefficient de convection h_1 , selon la formule (32) s'écrit :

$$h_1 = \frac{\lambda_e}{L_e} 0,13 \left[\frac{L_e^3 \cdot \rho_e^2 \cdot g \cdot \beta_e \cdot \Delta T \cdot Pr}{\mu_e^2} \right]^{1/3}$$

Les tables et diagrammes thermodynamiques donnent les propriétés physiques de l'eau à la température moyenne suivante[45] :

$$t_m = \frac{100+99}{2} = 99,5^\circ\text{C}$$

A cette température, nous avons :

$$\rho = 958,7 \text{ Kg/m}^3 .$$

$$\beta_m = 7,44 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$$

$$\mu_m = 0,283 \cdot 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$$

$$\text{Pr} = 1,75$$

$$\lambda_m = 0,679 \text{ W/mK} .$$

Le nombre de Grashof peut ainsi être calculé :

$$\text{Gr} = \frac{(0,4)^3 \times (958,7)^2 \times 9,81 \times 7,44 \cdot 10^{-4} \times 1}{(0,283 \cdot 10^{-3})^2}$$

$$\text{Gr} = 5,36 \cdot 10^7$$

ou : $\text{Gr} \cdot \text{Pr} = 9,381 \cdot 10^7$

Par la suite nous avons :

$$h_1 = \frac{0,679}{0,4} \cdot 0,13 (9,381 \cdot 10^7)^{1/4}$$

soit :

$$h_1 = 465,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Le flux de chaleur échangé par convection entre l'eau et le corps de la chaudière aura alors pour valeur :

$$\phi_1 = 465,4 \times 0,5024 \times 1$$

soit : $\phi_1 = 234 \text{ W}$

IV-1-6-2- Echange de chaleur eau-virole inférieure :

Le flux de chaleur ϕ' , échangé par convection entre l'eau et la virole inférieure de la chaudière s'écrit :

$$\phi' = h'_{1} . S . \Delta T$$

avec : h'_{1} : coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'eau et la virole inférieure .

La virole inférieure est une plaque circulaire chauffée face vers le haut, et ayant une surface d'échange "S".

Les tables thermodynamiques donnent pour la vapeur, ayant une température de 100°C, les caractéristiques physiques suivantes : [45] .

- masse volumique de la vapeur : $\rho_{v} = 0,595 \text{ Kg/m}^3$.
- viscosité de la vapeur : $\mu_{v} = 1,292 . 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$
- coefficient de dilatation de la vapeur : $\beta_{v} = 2,68 . 10^{-3} \text{ 1/K}$.
- nombre de Prandtl : $Pr = 0,96$.

Ces données nous permettront d'accéder à la valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'eau et la virole inférieure .

Le calcul du nombre de Grashof donne :

$$Gr = \frac{L_{v}^3 . \rho_{v}^2 . g . \beta_{v} . \Delta T}{\mu_{v}^2}$$

L_{v} étant la hauteur de vapeur

$$Gr = \frac{(0,6)^3 \times (0,595)^2 \times 9,81 \times 2,68 . 10^{-3} \times 1}{(1,292 . 10^{-3})^2}$$

$$Gr = 1,20 \cdot 10^7$$

soit $Gr \cdot Pr = 1,15 \cdot 10^7$

Le produit $(Gr \cdot Pr)$ est compris entre 10^5 et $2 \cdot 10^7$, le régime est donc laminaire.

Pour un tel régime et pour des plaques chauffées face vers le haut, nous utilisons la corrélation suivante :

$$\frac{h'_{1,0,9D}}{\lambda_e} = \frac{0,54}{\lambda_e} \left[\frac{(0,9 \cdot D)^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta_e \cdot \Delta T \cdot Pr}{\mu_e} \right]^{1/4}$$

soit :

$$h'_{1,0,9D} = \frac{0,54 \times 0,679}{0,9 \times 0,4} \left[\frac{(0,9 \times 0,4)^3 \times (958,7)^2 \times 9,81 \times 7,44 \cdot 10^{-4} \times 1,75}{(0,283 \cdot 10^{-3})} \right]^{1/4}$$

$$h'_{1,0,9D} = 292,9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Ainsi, le flux de chaleur échangé entre l'eau et la virole inférieure aura pour valeur :

$$\phi'_{1,0,9D} = 292,9 \times 3,14 \times \frac{(0,4)^2}{4}$$

soit : $\phi'_{1,0,9D} \approx 37 \text{ W}$

IV-2- ECHANGE DE CHALEUR VAPEUR-MILIEU EXTERIEUR :

IV-2-1- ECHANGE THERMIQUE VAPEUR-CHAUDIERE:

Le flux de chaleur ϕ_v s'échange par convection :

$$\phi_v = h_{1v} \cdot S_{1v} \cdot \Delta T_v$$

avec :

h_{1v} : coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vapeur et la paroi interne de la chaudière.

S_{1v} : surface interne de transmission de chaleur, côté vapeur .

$$\Delta T_v = T_v - T_1 = \Delta T'$$

Le nombre de Nusselt s'écrit :

$$Nu = \frac{h_{1v} \cdot L_v}{\lambda_v} = c (Gr, Pr)^n$$

avec : λ_v conductivité thermique de la vapeur .

Comme le régime est laminaire, nous utilisons la corrélation suivante :

$$Nu = 0,59 (Gr, Pr)^{1/4}$$

$$\text{soit : } h_{1v} = \frac{0,59 \lambda_v}{L_v} (Gr, Pr)^{1/4}$$

$$h_{1v} = \frac{0,59 \times 2,496 \cdot 10^{-2}}{0,6} (1,15 \cdot 10^7)^{1/4}$$

$$h_{1v} = 1,43 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Le flux de chaleur échangé entre la vapeur et le milieu extérieur aura alors pour valeur :

$$\phi_v = 1,43 \times 3,14 \times 0,4 \times 0,6 \times 1$$

$$\text{soit : } \phi_v = 1,08 \text{ W}$$

IV-2-2- ECHANGE DE CHALEUR
VAPEUR-VIROLE SUPERIEURE :

Le flux de chaleur ϕ'_{ν} échangé par convection avec la plaque supérieure s'écrit :

$$\phi'_{\nu} = h'_{i\nu} \cdot S \cdot \Delta T'_{\nu} = h'_{i\nu} \cdot S \cdot \Delta T$$

$h'_{i\nu}$ étant le coefficient de transmission de chaleur par convection entre la vapeur et la virole supérieure .

La plaque supérieure étant chauffée face vers le bas et le régime étant laminaire, la relation (18) nous donne :

$$h'_{i\nu} = \frac{\lambda_{\nu} \cdot 0,27}{0,9D} \left[\frac{(0,9D)^3 \rho_{\nu}^2 g \beta_{\nu} \Delta T Pr}{\mu_{\nu}^2} \right]^{1/4}$$

$$h'_{i\nu} = \frac{2,496 \cdot 10^{-2}}{0,9 \times 0,4} \times 0,27 \left[\frac{0,9^3 \times 0,4^3 \times (0,595)^2 \times 9,81 \times 2,68 \cdot 10^{-3} \times 1 \times 0,96}{(1,292 \cdot 10^{-5})^2} \right]^{1/4}$$

$$h'_{i\nu} = 0,744 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Le flux de chaleur échangé entre la vapeur et la virole supérieure a pour valeur :

$$\phi'_{\nu} = 0,744 \times 3,14 \times \frac{(0,4)^2 \times 1}{4}$$

soit $\phi'_{\nu} \approx 0,1 \text{ W}$

IV-3- PERTES THERMIQUES TOTALES :

La quantité de chaleur perdue par la chaudière est la somme des énergies échangées avec le milieu extérieur .

Autrement dit :

$$\phi_t = \sum \phi_i$$

où ϕ_t représente la chaleur totale perdue .

Ainsi :

$$\phi_t = 234 + 37 + 1,08 + 0,10$$

soit

$$\phi_t = 272,18 \text{ W .}$$

IV-4- CALCUL DU CALORIFUGE :

Certains corps poreux "remplis d'air" tels que le liège, la mousse, etc...sont de très mauvais conducteurs de chaleur. Ils sont utilisés comme isolants thermiques.

Le flux de chaleur échangé par conduction à travers le calorifuge, s'écrit :

$$\phi = \frac{2\pi \cdot L \cdot \lambda_c \cdot (T_2 - T_3)}{\ln(r_3/r_2)}$$

En fixant une valeur à la température T_3 , nous pouvons calculer le rayon r_3 du calorifuge .

Ainsi, pour la zone de la chaudière contenant de l'eau, nous avons :

$$t_2 = 99^\circ\text{C} .$$

$$r_2 = 0,202 \text{ m}$$

$$\phi_1 = 234 \text{ W} .$$

En donnant à la température T_a la valeur de 25°C , nous avons :

$$\ln(r_3/r_2) = \frac{2\pi L_e \lambda_c (T_2 - T_a)}{\phi_1}$$

soit :

$$\ln(r_3/r_2) = \frac{2 \times 3,14 \times 0,4 \times 0,037 \times (99 - 25)}{234}$$

Il vient :

$$\frac{r_3}{r_2} = \exp(0,029) = 1,03$$

Ainsi, le rayon r_3 du calorifuge aura pour valeur :

$$r_3 = 1,03 \cdot r_2 = 1,03 \times 0,202$$

$$r_3 = 0,208 \text{ m}$$

La couche isolante aura alors l'épaisseur suivante :

$$e_c = r_3 - r_2$$

$$e_c = 0,208 - 0,202 = 0,006 \text{ m}$$

soit :

$$e_c = 6 \text{ mm}$$

Dans un souci de minimiser les pertes de chaleur par conduction et convection naturelle, le corps de la chaudière sera ainsi recouvert d'une couche de liège de 6 mm d'épaisseur.

REALISATION
DE LA
CHAUDIERE

La chaudière est un appareil destiné à produire une certaine quantité de vapeur, à une pression et à une température déterminées .

L'étape fondamentale de sa réalisation a consisté en le choix du matériau .

Ce choix repose sur plusieurs critères, à savoir :

- La résistance mécanique .
- La résistance thermique .
- La résistance à la corrosion .
- La disponibilité sur le marché .

La tôle utilisée pour notre chaudière est de l'acier inoxydable, résistant à la corrosion, de désignation :

AFNOR Z12 CN 25/20

Le corps de la chaudière est un cylindre ayant pour dimensions :

- Longueur : 1000 mm
- Diamètre extérieur : 404 mm
- Diamètre intérieur : 400 mm .

Il comporte :

- à sa partie supérieure une conduite de vapeur en acier doux, ayant la forme de la lettre "L", dont les dimensions sont :

- Diamètre intérieur : 60 mm
- Diamètre extérieur : 64 mm
- Hauteur : 400 mm
- Largeur : 400 mm

- à sa partie inférieure une conduite en acier doux pour l'alimentation en eau et un robinet pour la vidange .

I- ASSEMBLAGE DES DIFFERENTS ELEMENTS DE LA CHAUDIERE

L'assemblage des différents éléments constituant la chaudière a été réalisé avec des soudures au chalumeau et à l'arc électrique (baguettes en Inox).

Pour le raccordement de la tuyauterie, des coudes et des raccords ont été utilisés .

II- APPAREILS ACCESSOIRES DE LA CHAUDIERE

La construction et l'utilisation des appareils à vapeur sont soumises à une réglementation. Celle-ci exige la présence d'un certain nombre d'appareils de sûreté, à savoir :

- un manomètre .
- une soupape de sûreté .
- un indicateur de niveau d'eau .
- un thermomètre .

II-1- MANOMETRE :

Pour la mesure de la pression effective régnant à l'intérieur de la chaudière, nous avons placé un manomètre métallique sur la partie supérieure de cet appareil de vapeur. La pression effective lue sur l'échelle du manomètre ne doit pas être supérieure à la valeur de la pression que nous avons utilisé pour déterminer l'épaisseur de la tôle de la chaudière (5 Bars) .

II-2- SOUPE DE SURETE :

La chaudière est munie d'une soupape de sûreté, chargée de manière à laisser la vapeur s'écouler dès que la pression effective atteint la ligne maximale qu'elle ne doit pas dépasser . (figure 4).

La soupape utilisée, composée d'un disque circulaire, est raccordée à la partie supérieure de la chaudière par un orifice latéral, un autre orifice demeure ouvert à l'atmosphère. En service normal, elle supporte la pression qui règne dans la chaudière .

Si une surpression vient à se produire, elle comprime le ressort et la vapeur est évacuée vers l'atmosphère .

Le ressort étant réglable entre 0 et 6 Bars, nous pouvons limiter la surpression à la valeur désirée.

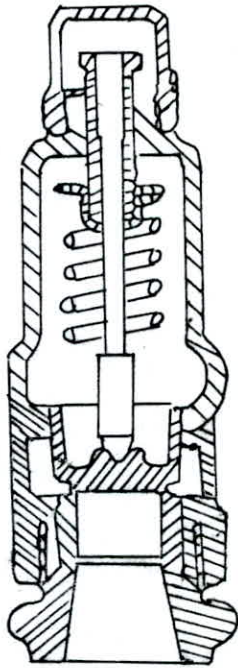
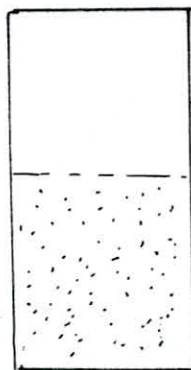


Figure 4:

Soupape de sécurité



indicateur de niveau
d'eau

Figure 5 :

Indicateur de niveau d'eau

II-3- INDICATEUR DE NIVEAU D'EAU :

Afin de maintenir un niveau d'eau constant dans la chaudière, nous avons placé un tube en verre (en pyrex) en communication, par sa partie inférieure, avec l'eau de la chaudière et par sa partie supérieure, avec la vapeur .

Il indique ainsi, si la chaudière est suffisamment alimentée en eau. Le niveau au-dessous duquel l'eau ne doit pas dépasser est de 400 mm. (figure 5).

II-4- THERMOMETRE :

Nous avons placé un thermomètre gradué de 0 à 120°C sur la partie supérieure de la chaudière.

La lecture de la température constitue un double contrôle de la pression, étant donné qu'il s'agit de température de saturation.

III- APPORT DE CHALEUR :

La chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau dans la chaudière est générée par des résistances électriques blindées constamment immergées dans l'eau.

Au vu de la disponibilité du matériel adéquat sur le marché national, deux types de résistances ont été utilisées :

- Deux résistances de marque CANDY .
- Quatre résistances de marque ELTRON LTD a filetage .

La puissance de ces résistances est de 2 KW chacune sous une tension de 220 Volts .

L'expérience a montré que la durée de vie des résistances était limitée par le phénomène de dépôt de tartre .

Dans le souci de minimiser cette contrainte, le système de fixation a été pensé de telle manière que les résistances puissent être, périodiquement, enlevées, nettoyées puis remplacées .

Cette idée a été mise en pratique afin de prolonger la durée d'utilisation des résistances mises à notre disposition .

IV- ISOLATION THERMIQUE :

Notre étude et les calculs y découlant nous ont permis de fixer notre choix concernant l'isolation thermique .

Dans cette optique, une couche de liège d'épaisseur 6 mm recouvre le corps de la chaudière .

Quant à la conduite de vapeur, elle est recouverte par une couche d'amiante .

V- REGULATION AUTOMATIQUE DU DEBIT DE VAPEUR A LA SORTIE DE LA CHAUDIERE

V-1- INTRODUCTION :

L'un des paramètres pouvant influencer l'extraction des huiles essentielles est le taux de débit de vapeur admis. A cette fin, un système de régulation automatique a été conçu et réalisé.

V-2- PRINCIPE DE LA REGULATION AUTOMATIQUE :

La régulation automatique a pour but de maintenir automatiquement, sans intervention humaine, à une valeur donnée, une grandeur physique : dans notre cas la pression, soumise à des variations (apports ou déperditions) .

La réalisation des différentes opérations nécessaires à la régulation exige la présence :

- d'un *organe de détection* servant à mesurer la valeur réelle de la grandeur à régler .
- d'un *régulateur* comparant la valeur réelle de la grandeur à régler avec le point de consigne (valeur désirée), et transmettant un signal de correction à l'organe de réglage .
- d'un *organe de réglage* servant à ajuster la grandeur de réglage à la valeur désirée .

**V-3- ORGANES UTILISES POUR LA REGULATION DE LA
PRESSION A LA SORTIE DE LA CHAUDIERE ;**

Le systeme de régulation de la pression à la sortie de la chaudiere utilisé comprend les différents organes suivants :

V-3-1- UNE SONDE DE PRESSION :

La sonde de pression utilisée est de marque LANDIS & GYR, elle est placéé sur la conduite de vapeur à l'aide d'un siphon .

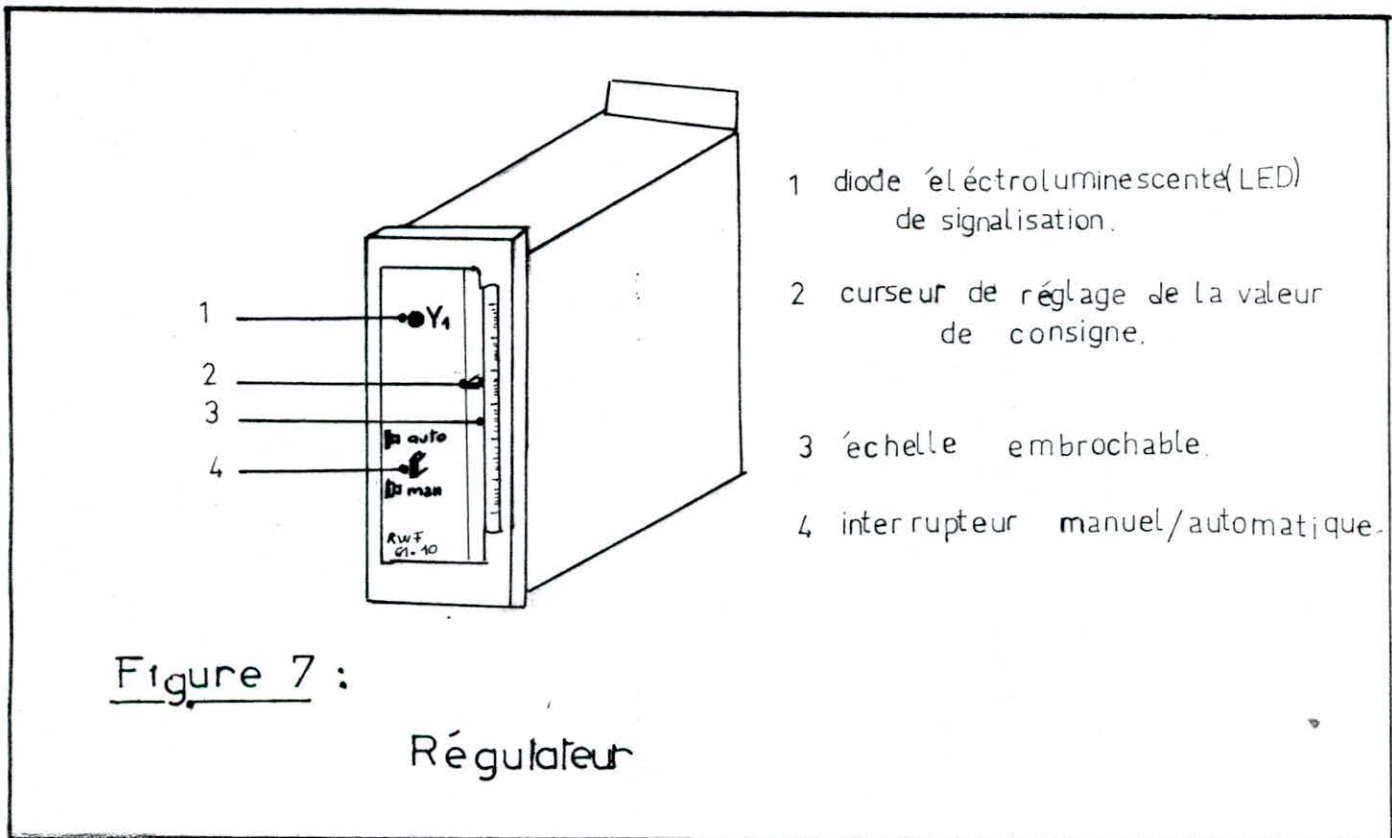
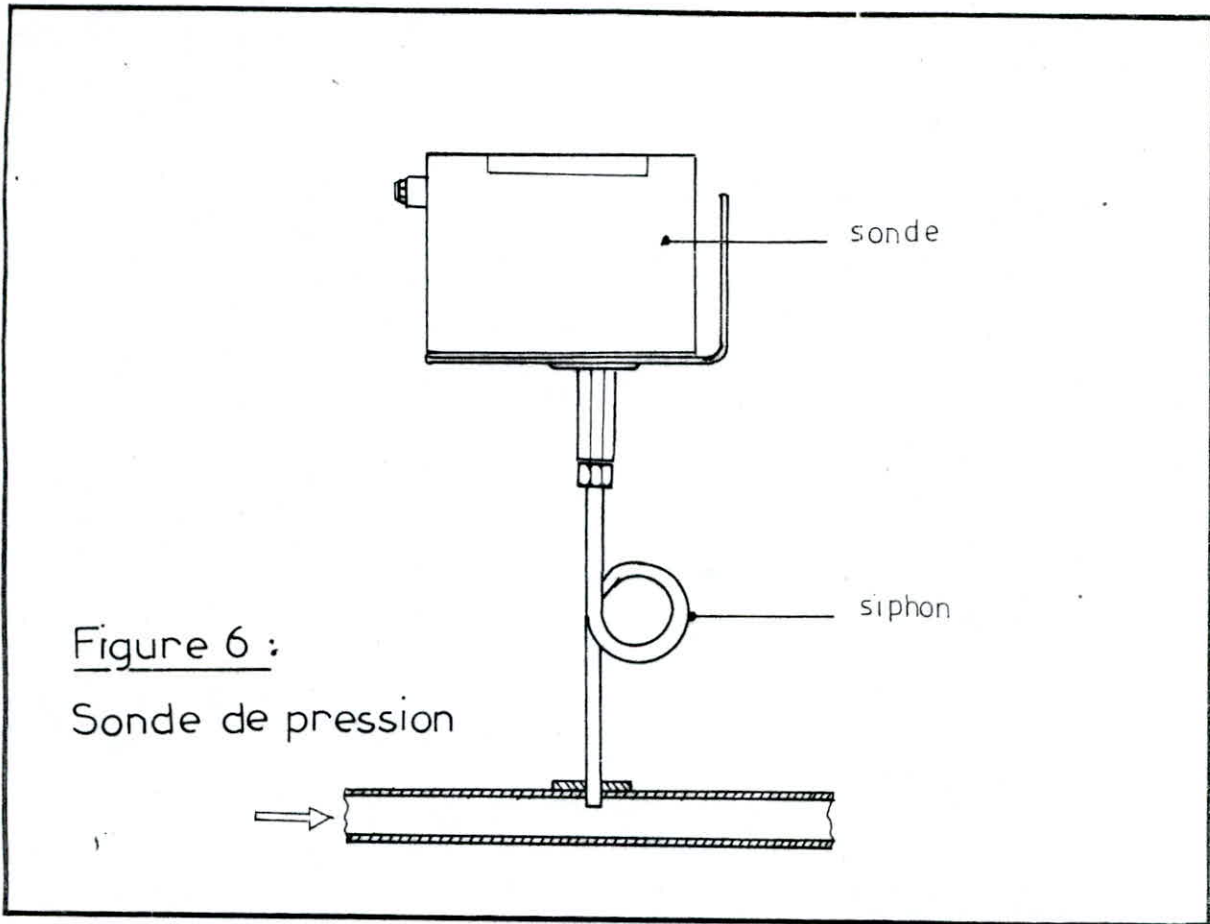
Elle sert à mesurer la valeur réelle de la pression à la sortie de la chaudière et à transmettre l'information à un régulateur (figure 6).

V-3-2- UN REGULATEUR :

Le regulateur est de marque LANDIS & GYR RWF 61.10. Il est en boitier plastique résistant aux chocs avec un couvercle transparent.

Il sert à comparer la valeur réelle de la pression mesurée par la sonde, avec la valeur désirée que nous fixons à l'aide d'un curseur de réglage (figure 7).

Il transmet ensuite un signal de correction à l'organe de réglage : une variation de son signal de commande de 0 à 10 Volts provoque une variation de l'organe de réglage



de 0 à 100 %. La position de cet organe est donc proportionnelle au signal de commande .

V-3-3- UN PROGRAMMATEUR DIGITAL A 4 ETAGES :

Le programmeur est de marque LANDIS & GYR SEL 61.4. C'est un appareil électronique modulaire avec circuit imprimé, de format Européen (100x160 mm). Il est en boîtier plastique, résistant aux chocs avec un couvercle transparent.

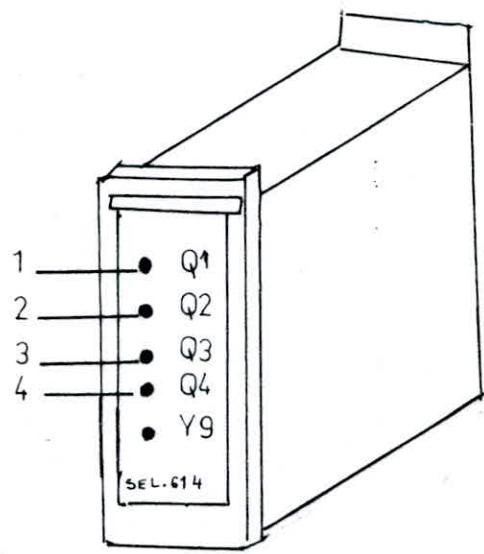
Le programmeur sert à la commande des résistances électriques. Côté sortie, il a quatre relais de commutation Q_1 , Q_2 , Q_3 et Q_4 qui enclenchent les puissances partielles, ainsi qu'une commande progressive Y9. (figure 7).

Le signal de commande progressif agit sur une logique de commande numérique. Grâce à elle, nous pouvons combiner l'ordre de commande des quatre relais.

A chaque pas de commutation, un signal de commande progressif de 0 à 10 Volts agit sur un appareil de réglage approprié : dans notre cas la vanne de courant .

V-3-4- UNE VANNE DE COURANT :

La vanne de courant est de marque LANDIS & GYR : SEL 61.11. Elle est composée d'une platine en matière plastique, un dissipateur en Aluminium et un circuit électronique .



- 1 - lampe témoin pour le relais Q1
- 2 - lampe témoin pour le relais Q2
- 3 - lampe témoin pour le relais Q3
- 4 - lampe témoin pour le relais Q4

Figure 7:
 Programmeur digital à 4 étages

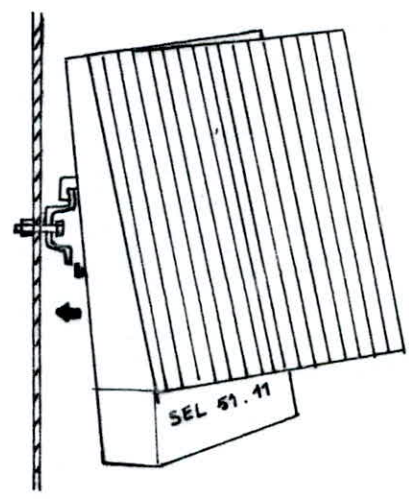


Figure 8:
 Vanne de courant

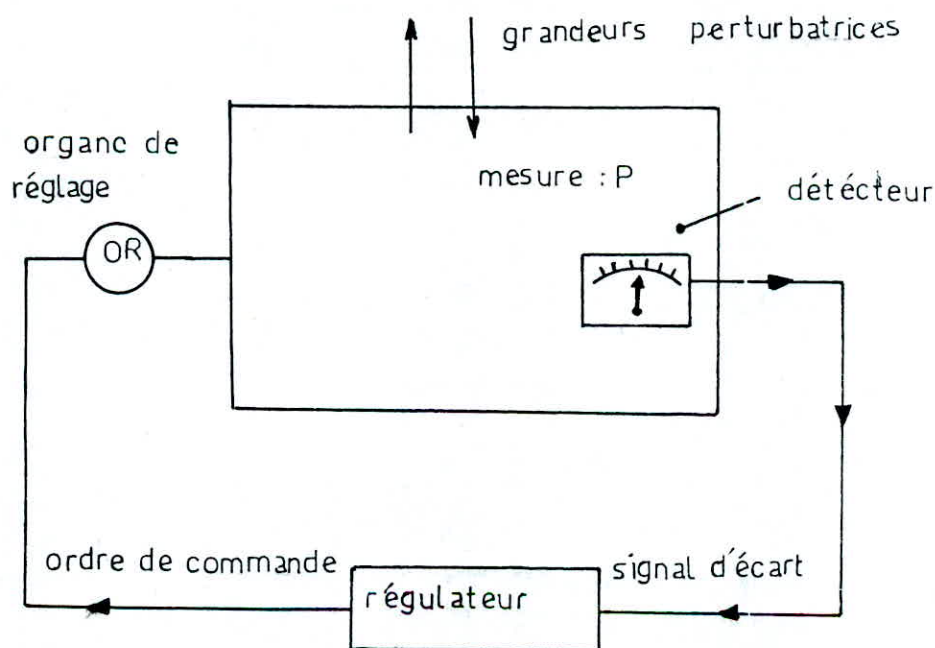
C'est un interrupteur de puissance sans contact (triac). Il sert à la commande progressive de puissances électriques des éléments chauffants (figure 8) .

Dans notre cas, la vanne de courant règle la puissance de chauffe d'une résistance thermoplongeante de 0 à 100 %. Le rapport d'enclenchement est déterminé par le signal de commande 0 à 10 Volts du régulateur et du programmeur digital .

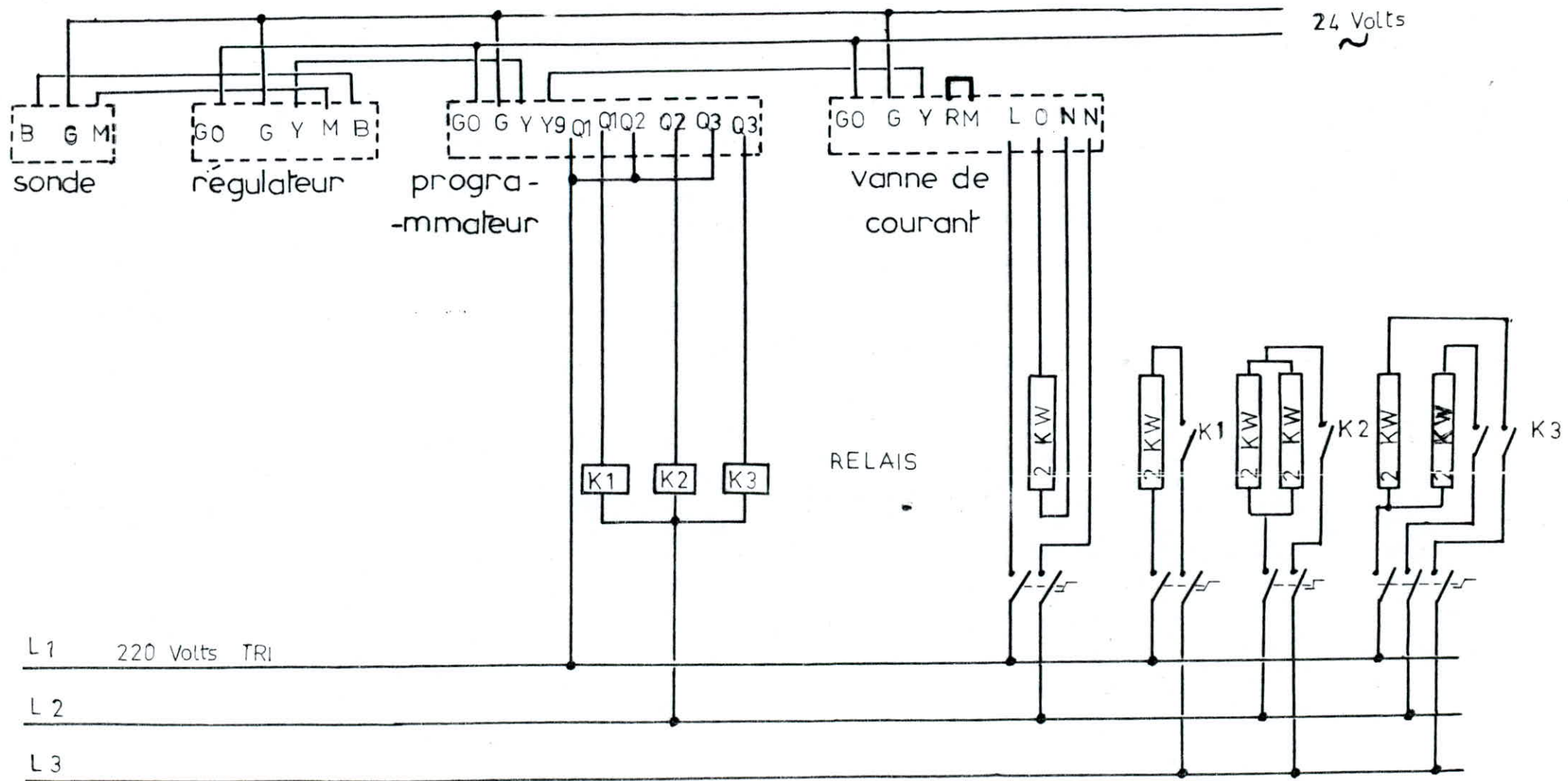
La vanne de courant est placée de telle sorte que les ailettes de refroidissement soient verticales et que le couvre-bornes soit en bas .

Le régulateur, le programmeur et la vanne de courant sont fixés sur une petite armoire en plexiglas .

Le principe de la régulation de la pression peut être schématisé sous forme d'une boucle fermée .



SCHEMA DU CABLAGE SIMPLIFIE



La valeur de la grandeur à régler P, mesurée par la sonde est injectée à l'entrée de la boucle et est comparée à une valeur fixée d'avance, appelée "point de consigne". Le régulateur mesure la différence entre "point de consigne" et "valeur instantanée de la grandeur à régler" pour donner constamment un signal d'erreur ou écart. A partir de ce dernier, le régulateur élabore un ordre de commande qui est envoyé dans un organe de réglage. Celui-ci modifie la puissance de chauffe des éléments chauffants. La variation calorifique qui en résulte alors se répercute sur la pression, ce dont le détecteur va rendre compte. La boucle est ainsi refermée : c'est la caractéristique de tout système de régulation .

VI- MODE OPERATOIRE

Afin de réaliser l'extraction des huiles essentielles à partir des matières végétales par le procédé d'entraînement à la vapeur d'eau, et d'étudier l'influence du débit de vapeur sur le rendement en ces huiles, nous devons d'abord mettre en marche la génératrice de vapeur.

Le mode opératoire à adopter est le suivant :

1^{re} opération :

Nous remplissons la chaudière avec de l'eau jusqu'au niveau indiqué sur le tube en pyrex .

2^e opération :

Nous fixons la valeur de la pression désirée à l'aide du curseur de réglage du programmeur allant de 0 à 2 Bars.

3^e opération :

Nous alimentons la chaudière en électricité. Seule la résistance électrique liée à la vanne de courant est enclenchée .

Après un certain moment, la sonde de pression mesure la valeur réelle de la pression régnant à l'intérieur de la conduite de vapeur et transmet l'information au régulateur. Celui-ci compare la valeur réelle de la pression avec la valeur désirée. En fonction de l'importance de l'écart entre la valeur réelle de la pression et celle désirée, le régulateur transmet un signal de 0 à 10 Volts au programmeur. Celui-ci actionne les relais l'un après l'autre jusqu'à atteindre la valeur désirée de la pression.

TRAITEMENT
DE L'EAU
DE CHAUDIERE

I- INTRODUCTION

Malgré sa limpidité, l'eau contient en quantité plus ou moins grande des sels dissous, des gaz dissous et des matières en suspension existant à l'état microscopique .

La nature de ces impuretés contenues dans l'eau d'alimentation, ou bien leur concentration trop élevée peut être particulièrement défavorable au bon fonctionnement et à la longévité d'une chaudière .

II- INCONVENIENTS DES IMPURETES

Les impuretés se trouvant dans l'eau entraînent notamment :

- la formation de tartres réduisant l'échange thermique .
- la corrosion plus ou moins rapide du métal .
- la formation de mousses réduisant la section de passage des tubes .

II-1- ENTARTRAGE :

L'entartrage est dû au fait que les minéraux présents dans les eaux naturelles ont une solubilité qui diminue lorsque la température s'élève; d'autre part, l'évaporation accroît leur concentration et entraîne leur insolubilisation .

C'est le cas de sels tels que bicarbonates, carbonates, sulfates associés au Calcium et Magnésium par exemple .

L'entartrage se traduit par la formation de tartres incrustants diminuant la transmission de chaleur .

Exemple :



II-2- CORROSION :

La corrosion est un phénomène encore plus néfaste que le tartre. Au fil du temps, le métal véhiculant, ou entrant en contact avec une eau corrosive perd de son épaisseur et se perce, amenant ainsi l'apparition des fuites d'eau .

Les causes de la corrosion des chaudières sont nombreuses :

- L'Oxygène dissous dans l'eau est le principal agent de la corrosion. Sous l'influence des hautes pressions et températures, il attaque superficiellement le Fer avec formation de rouille .
- Certains sels, notamment le Chlorure de Magnésium, se dissocient à chaud, donnant naissance à des acides particulièrement corrosifs .

L'eau pure, elle même attaque lentement le Fer. Elle cesse d'être agressive dès que son pH atteint 9,8.

Etant donné que notre chaudière est réalisée avec de l'acier inoxydable, le phénomène de corrosion ne sera pas observé .

II-3-COLMATAGE PAR LES ALGUES :

Les algues et les mousses se développent rapidement dans les circuits d'eau lorsque la température est favorable à leur développement .

II-4- LE PRIMAGE :

Le primage est l'entraînement de gouttelettes d'eau par la vapeur, favorisé par une viscosité de l'eau trop importante, due à la concentration trop élevée en :

- composés organiques produisant les mousses.
- sels de toute nature.

Le primage a pour conséquence l'abaissement de la chaleur de la vapeur .

III- CARACTERISTIQUES DE L'EAU

Afin d'être utilisée dans les bonnes conditions, l'eau doit présenter certains critères de pureté permettant notamment de maintenir dans la chaudière une surface d'échange propre, et d'éviter le phénomène d'entartrage des résistances thermoplongeantes .

Dans le but de connaître la qualité de l'eau, des analyses ont été effectuées sur deux eaux différentes :

- eau alimentant notre chaudière .
- eau de l'ancienne chaudière .

III-1- DETERMINATION DU TITRE HYDROTOMETRIQUE :

*** Principe :**

Le titre hydrotimétrique (TH) indique la teneur globale de l'eau en sels alcalino-terreux (chaux et magnésie) qui rendent l'eau "dure" .

Le sel diodique de l'acide éthylène diamine tétracétique forme avec ces sels un complexe stable en milieu alcalin .
Nous utilisons cette propriété pour doser avec précision ces deux cations en présence d'indicateur coloré .

*** Mode opératoire :**

Dans une capsule en porcelaine blanche, nous versons :

- 100 ml d'eau à analyser .
- 2 à 3 ml d'une solution tampon pH = 10 .
- une pincée de noir d'eriochrome .

Nous titrons le mélange avec l'acide éthylène diamine tétracétique 0,01 N jusqu'au virage du rouge au bleu .
La dureté de l'eau globale TH est lue directement en degré français (°F) sur la burette .

III-2- DOSAGE DES CHLORURES :

*** Principe :**

Afin d'éviter les phénomènes de corrosion et d'entartrage, l'eau doit être débarrassée de tous les chlorures existants .

Le dosage de ces chlorures se fait en réagissant une solution de nitrate d'Argent (AgNO_3) dans l'eau et ce en présence de chromate de potassium. Nous obtenons alors une précipitation des chlorures sous forme de chlorure d'Argent .

La réaction chimique qui se produit est la suivante :



*** Mode opératoire :**

Dans une capsule en porcelaine, nous versons 100 ml d'eau à analyser auxquels nous ajoutons 2 à 3 ml de chromate de Potassium .

Nous titrons le mélange avec du nitrate d'Argent à 0,1 N jusqu'au virage du jaune au rouge orangé .

La teneur en chlorures en mg/l est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\text{teneur (Cl}^-) = \frac{V \cdot N \cdot 35,5 \cdot 10^3}{100} \quad (34)$$

où : V représente le volume du nitrate d'Argent utilisé .

N la normalité du nitrate d'argent .

III-3- TENEUR EN SILICE :

*** Principe :**

Des dépôts vitrifiés insolubles et mauvais conducteurs de chaleur peuvent être formés par la silice et ce sous l'influence de hautes pressions et températures .

Le dosage de la silice est déterminé à l'aide d'une méthode calorimétrique .

*** Mode opératoire :**

Dans une fiole jaugée de 250 ml, nous versons 100 ml d'eau à analyser, 4 ml de molybdate d'Ammonium et 2 ml d'acide chlorhydrique (1/2 N). Nous ajoutons ensuite 100 ml d'acide oxalique, 4 ml d'acide amino-naphtolsulfonique qui colore le mélange en bleu en cas de présence de silice dans l'eau analysée, et enfin 5 ml d'eau distillée.

Nous transvasons le mélange dans un tube à essai que nous faisons passer au spectrophotomètre. Ce dernier donne directement la teneur de l'eau en silice .

III-4- MESURE DU pH :

Une eau légèrement acide a pour effet d'attaquer lentement le métal des tuyauteries.

Un contrôle du pH de ces eaux est nécessaire afin d'éviter l'apparition de tout phénomène néfaste .

La mesure de cette grandeur est réalisée à l'aide d'un pHmètre muni d'une électrode en verre .

Les résultats de ces analyses sont regroupés dans le tableau suivant :

TABLEAU III : Résultats des analyses de l'eau

d'alimentation et de l'eau de l'ancienne chaudière

Nature de l'analyse	Eau alimentant la chaudière	Eau de l'ancienne chaudière
Titre hydrotimétrique (°F)*	39	44
Teneur en chlorures (°F)	6,1	13,4
Teneur en Silice (mg/l)	1,7	1,9
pH	7,7	6,8

* 1°F = 10 mg/l

Au moyen des résultats illustrés par le tableau III, nous constatons que :

- L'eau prise de l'ancienne chaudière est plus dure que celle alimentant notre nouvelle génératrice de vapeur .
- La teneur en chlorures de l'eau d'alimentation est plus faible que celle prise de l'ancienne chaudière .
- L'eau prise de l'ancienne génératrice de vapeur est plus acide que l'eau d'alimentation .

Les limites des valeurs du titre hydrotimétriques, de la teneur en chlorures, de la teneur en Silice et du pH que l'eau d'une chaudière ne doit pas dépasser sont les suivantes :[46]

- TH (°F) : 0 à 0,5
- Teneur en chlorures (°F) : 0 à 7
- Teneur en Silice (mg/l) : 0 à 2
- pH : 7 à 12.

La comparaison des valeurs du titre hydrotimétrique, de la teneur en chlorures, de la teneur en Silice et du pH obtenues lors de l'analyse de l'eau d'alimentation avec les limites données ci-dessus, nous montre que l'eau d'alimentation devrait subir des traitements afin de prolonger la durée d'utilisation de la chaudière et de s'assurer contre tout risque d'entartrage et de corrosion .

IV- TRAITEMENT DE L'EAU DE CHAUDIERE

Afin d'éviter l'apparition de tout phénomène néfaste, et d'être utilisée sous aucune crainte, l'eau d'alimentation d'une chaudière doit subir une série d'opérations qui consistent en :

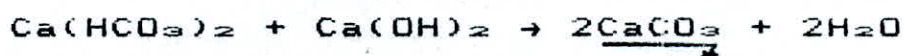
- une décarbonatation ;
- un désiliciage .
- un adoucissement .
- un dégazage .

IV-1- DECARBONATATION ;

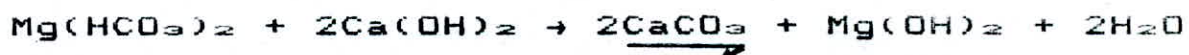
Parmi les composés chimiques capables de précipiter les sels de Calcium et de Magnésium, la chaux est très utilisée en raison de son bas prix .

La chaux décompose les bicarbonates très solubles en carbonates peu solubles précipitant selon les réactions :

Pour les sels de Calcium :



Pour les sels de Magnésium :



IV-2- DESILICIAGE :

Sous l'influence des hautes pression et température, la silice tend à former des dépôts vitrifiés insolubles et très mauvais conducteurs de chaleur .

La teneur de l'eau en silice ne doit pas excéder 2 mg/l.

Le désiliciage nécessite l'utilisation de la magnésie (MgO) .

Ce réactif est pratiquement insoluble dans l'eau et a la propriété d'entraîner une grande partie de la silice si la température de l'eau est supérieure à 90°C .

La réaction chimique qui se produit est la suivante :



IV-3- ADDUCISSEMENT :

L'adoucissement a pour but d'éliminer complètement les traces des sels alcalino-terreux se trouvant dans l'eau ayant d'abord subi une décarbonatation et un désiliciage .

Il amène ainsi la teneur globale de l'eau en ces sels au voisinage de zéro .

L'adoucissement se fait à l'aide de résines échangeurs d'ions, constituées par des grains de polystyrène de 0,5 à 1 mm de diamètre et pouvant supporter sans dommage des eaux chaudes .

Ces résines présentent la particularité de retenir les ions des sels alcalino-terreux contenus dans l'eau et de libérer à leur place des ions de Sodium fixés par un passage préalable d'une

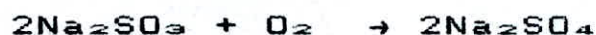
solution de saumure et ceci sans que leur structure en soit modifiée .

Les adoucisseurs peuvent être régénérés en lavant la résine avec une solution de saumure. Les réaction s'inversent et les ions Sodium prennent la place des ions Calcium et Magnésium .

IV-4- DEGAZAGE :

L'eau d'alimentation contient des gaz dissous notamment l'Oxygène. Ce dernier est le principal agent de la corrosion . Afin d'éliminer tout l'Oxygène présent dans l'eau, on lui fait subir un dégazage par voie chimique consistant à injecter du sulfite de Sodium (Na_2SO_3) dans l'alimentation .

Le réactif étant avide d'Oxygène absorbe ce dernier d'après la réaction chimique suivante :



La quantité de sulfite de Sodium à injecter est de 16 grammes par gramme d'Oxygène .

Après avoir subi tous ces traitements, l'eau d'alimentation initialement impure peut être utilisée dans la chaudière sans aucune crainte .

CONCLUSION

Ce travail nous a permis de mettre en pratique les notions théoriques apprises et de mesurer les difficultés à surmonter pour achever une réalisation .

Cependant, cette réalisation contribuera sans nul doute, à développer des travaux de recherche sur l'extraction des huiles essentielles et surtout à mieux maîtriser l'influence du taux de débit de vapeur sur le rendement en huile essentielle .

La nouveauté de la réalisation se cristallise particulièrement à la mise en place d'un système de régulation performant permettant la mesure exacte du débit de vapeur .

Des contraintes tant matérielles que temporaires nous ont, malheureusement empêché de concrétiser l'idée initiale qui consistait outre la réalisation, à effectuer des essais sur l'extraction des huiles essentielles d'eucalyptus globulus .

= SIGNIFICATION DES MOTS =

Il nous apparait souhaitable de définir avec précision certains termes que l'on retrouvera dans l'exposé :

<i>Absolue</i>	: la cire en subissant un lavage à l'alcool se transforme en absolue .
<i>Artéfacts</i>	: ce sont des produits pouvant se former lors de l'entraînement à la vapeur d'eau sous l'effet de la chaleur .
<i>Balsamique</i>	: qui a les propriétés d'une baume
<i>Concrète</i>	: produit obtenu lors de l'extraction par des solvants apolaires.
<i>Dextrogyre</i>	: qui fait tourner à droite le plan de polarisation de la lumière .
<i>Infusion</i>	: produit de la macération d'un végétal dans un liquide chaud .
<i>Lévogyre</i>	: qui fait tourner à gauche le plan de polarisation de la lumière .
<i>Pommade</i>	: corps gras, parfumé et médicamenteux
<i>Polymorphe</i>	: affectant diverses formes .
<i>Résinoïde</i>	: produit des matières végétales desséchées
<i>Rusticité</i>	: résistance aux intempéries .
<i>Supercritique</i>	: état intermédiaire entre l'état liquide et l'état gazeux dans des intervalles définis de pression et de température .
<i>Virole</i>	: disque circulaire

- BIBLIOGRAPHIE -

- [1] H. MOYSE & R. PARIS
Matières végétales, Ed. MASSON , 1976
- [2] J. BLAKEWAY & M. SENSALÉNO
La mousse de chêne, une base de la parfumerie ,
Pour la science, mai 1987
- [3] Y. R. NAVES
Technologie et chimie des parfums naturels
Ed. MASSON et C^{ie}, 1974
- [4] J. VALNET
Aromathérapie, traitement des maladies par les essences
des plantes, Ed. MALOINE, 1980
- [5] Norme AFNOR
Les huiles essentielles , 2^e édition 1986
- [6] T. BERNARD & F. PRINEAU
Informations Chimie, 298, 1988, 10
- [7] H. TATU
L'industrie moderne des parfums
Ed. BAILLIÈRE et FILS, 1932
- [8] E. GUENTHER
The essentials oils, tome 1, Ed. R. E. KRIFGER, 1972
- [9] E. ROUDNITSKA
Le parfum, Ed. Que sais-je, 1987
- [10] E. BOCCHIO
Parfums, cosmétiques, arômes, 61, 1985
- [11] P. LIDDLE & P. SMEDT
Parfums, cosmétiques, arômes, 42, 1981

- [12] L. PEYRON
Problemes techniques, Ed labo Pharma 343, 1984
- [13] L. PEYRON
Parfums, cosmétiques, arômes, 55, 1984
- [14] P. PELLERIN
Parfums, cosmétiques, arômes, 71, 1986
- [15] J. ARTOZOL & H. BERNARD
Parfums, cosmétiques, arômes, 75, 1989
- [16] P. PAUL & S. WISE
The principles of gas extraction, Ed. MILLS & BOON Ltd, 1971
- [17] D. A. MOYLER
Perfum and flavorist, 109, 1984
- [18] P. PELLERIN
Parfums, cosmétiques, arômes, 84, 1988
- [19] L. GRETTI
Les plantes aromatiques et médicinales, Ed. Atlas 1981
- [20] L. BEZANGER
Plantes médicinales tempérées, Ed. MALOINE 1980
- [21] G. AAS & A. RIEDMILLER
Les arbres, Ed. NATHAN 1988
- [22] D^r FOURMENT & D^r ROQUES
Répertoires des plantes médicinales et aromatiques
d'Algérie, Edité sous le patronage du comité de contrôle
de la production, de la répartition et de la vente des
plantes médicinales et aromatiques d'Algérie, 1983
- [23] F. R. HOFFMANN
Les huiles essentielles, T 3, Ed BAILLIERE et FILS 1912

- [24] J. PERROT
Matières premières du règne végétal, Ed. MASSON et
C^{ie}, 1944
- [25] H. BOELENS
Parfumer and flavorist, 1985, 9
- [26] Norme AFNOR
huiles essentielles d'eucalyptus globulus NF T75-404, 1987
- [27] P. WUITHIER
Raffinage et génie chimique, Ed. Technip, 1972
- [28] Norme AFNOR
Détermination du pouvoir rotatoire, NF T75-113, 1982
- [29] Norme AFNOR
Détermination de l'indice de refraction, NF T75-112, 1977
- [30] Norme AFNOR
Evaluation de la miscibilité à l'éthanol, NF T75-101, 1982
- [31] Norme AFNOR
Huile essentielle d'eucalyptus globulus, NF T75-404, 1987
- [32] Techniques de l'ingénieur, Constes NK₂ (K330)
Ed. Imprimerie Strasbourgeoise, 1985
- [33] N. LETREUCH & BELAROUCI
Les reboisements en Algérie et leurs perspectives
d'avenir .
Thèse de Docteur es sciences agronomiques, Gembloux
BELGIQUE , 1981
- [34] Techniques de l'ingénieur, B121, Ed. imprimerie
Strasbourgeoise, 1985
- [35] R. POSITELO
Vapeur d'eau industrielle, Ed. techniques et documentation
LAVOISIER, 1983

- [36] G. LEMASSON
Eléments de constructions: production et utilisation de
vapeur, Ed. DUNOD, 1966
- [37] Techniques de l'ingénieur, Ed. Imprimerie
Strasbourgeoise, 1985
- [38] L'eau, l'industrie, les nuisances
Ed. Pierre Johannet et ses fils 131, 1989
- [39] F. K. NUBER
Calcul thermique des chaudières, Ed. DUNOD 1972
- [40] G. M. BARROW
Chimie physique, Ed. MASSON 1976.
- [41] J. F. SAKADURA
Initiation aux transferts thermiques
Ed. Techniques et documentation (LAVOISIER), 1982
- [42] J. P. HOLMANN
heat transfer
Ed. McGRAW HILL, 1976
- [43] F. KREITH
Transmission de la chaleur et thermodynamique
Ed. MASSON, 1967
- [44] McADAMS
Transmission de chaleur
Ed. DUNOD, 1965
- [45]
Tables et diagrammes thermodynamiques .
- [46] L'eau, l'industrie, les nuisances
Pierre JOHANET et ses FILS 133, Dec 1989

