



ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

DIRECTION RECHERCHE ET INGÉNIERIE DE FORMATION

**RÉSUMÉ THÉORIQUE
&
GUIDE DE TRAVAUX DIRIGES**

MODULE N°:12

Chaudières à vapeur

SECTEUR : FROID ET GENIE THERMIQUE

SPÉCIALITÉ : THERMIQUE INDUSTRIELLE

NIVEAU : TECHNICIEN SPECIALISE



ISTA.ma
Un portail au service
de la formation professionnelle

Le Portail <http://www.ista.ma>

Que vous soyez étudiants, stagiaires, professionnels de terrain, formateurs, ou que vous soyez tout simplement intéressé(e) par les questions relatives aux formations professionnelles, aux métiers, <http://www.ista.ma> vous propose un contenu mis à jour en permanence et richement illustré avec un suivi quotidien de l'actualité, et une variété de ressources documentaires, de supports de formation, et de documents en ligne (supports de cours, mémoires, exposés, rapports de stage ...) .

Le site propose aussi une multitude de conseils et des renseignements très utiles sur tout ce qui concerne la recherche d'un emploi ou d'un stage : offres d'emploi, offres de stage, comment rédiger sa lettre de motivation, comment faire son CV, comment se préparer à l'entretien d'embauche, etc.

Les forums <http://forum.ista.ma> sont mis à votre disposition, pour faire part de vos expériences, réagir à l'actualité, poser des questionnements, susciter des réponses. N'hésitez pas à interagir avec tout ceci et à apporter votre pierre à l'édifice.

Notre Concept

Le portail <http://www.ista.ma> est basé sur un concept de gratuité intégrale du contenu & un modèle collaboratif qui favorise la culture d'échange et le sens du partage entre les membres de la communauté ista.

Notre Mission

Diffusion du savoir & capitalisation des expériences.

Notre Devise

Partageons notre savoir

Notre Ambition

Devenir la plate-forme leader dans le domaine de la Formation Professionnelle.

Notre Défi

Convaincre de plus en plus de personnes pour rejoindre notre communauté et accepter de partager leur savoir avec les autres membres.

Web Project Manager

- Badr FERRASSI : <http://www.ferrassi.com>

- contactez : admin@ista.ma

REMERCIEMENTS

La DRIF remercie les personnes qui ont participé ou permis l'élaboration de ce module de formation.

Pour la supervision :

M. Rachid GHRAIRI : directeur de CDC Génie Electrique Froid et Génie Thermique

M. Mohamed BOUJNANE : Chef de pôle Froid et Génie Thermique

Mme. Ilham BENJELLOUN : Formatrice animatrice au CDC FGT

Pour l'élaboration :

M. EL KHATTABI M'hamed: Formateur à l'ISGTF

Pour la validation :

Mme BENJELLOUN Ilham: Formatrice animatrice au CDC FGT

M. MAHBOUB Ahmed : Formateur à l'ISGTF

Mme MARFOUK Aziza :Formatrice à l'ISGTF

*Les utilisateurs de ce document sont invités
à communiquer à la DRIF toutes les
remarques et suggestions afin de les
prendre en considération pour
l'enrichissement et l'amélioration de ce
programme.*

Présentation du module**Résumé de théorie****I – Chaudières**

I – 1 – Chaudières à tubes de fumées	10
I – 2 – Chaudières à tubes d'eau	18
I – 3 – La circulation dans les vaporisations	25

II – Technologie des échangeurs de la chaudière

II – 1 – Chambres de combustion	32
II – 1 – Chambres de combustion	33
II – 2 – Les surchauffeurs (HT,MT,BT)	39
II – 3 – Les vaporisateurs	44
II – 4 – Les économiseurs	45
II – 5 – Les réservoirs	48
II – 6 – Le réchauffeur d'air	51

III – Evacuation et traitement des produits de combustion

III – 1 – Ventilateurs	57
III – 1 – Ventilateurs	58
III – 2 – Les ramoneurs	65
III – 3 – Les dépoussiéreurs	67
III – 4 – Postes de préparation des combustibles	71

IV – Alimentation en Eau de la chaudière

IV – 1 – Principes d'alimentation en eau	75
IV – 1 – Principes d'alimentation en eau	76
IV – 2 – Contrôle de niveau	78
IV – 3 – Traitement des eaux pour chaudières	80

Guide de travaux pratiques

I.TP1 – Réglage du brûleur	84
I.TP1 – Réglage du brûleur	85
II.TP2 – Dépannage d'un brûleur	86

Evaluation de fin de module**Liste bibliographique**

Evaluation de fin de module	87
Liste bibliographique	88

MODULE : 12

Chaudières à vapeur

Durée : 90 H

80% : Théorique

20% : Pratique

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

COMPORTEMENT ATTENDU

Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit : **Assurer la conduite des chaudières**, selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent :

CONDITIONS D'EVALUATION

- A partir des consignes données par le formateur
- A l'aide de la documentation technique donnée par le formateur.
- A partir de mises en situation

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- Description juste des différentes chaudières utilisées.
- Mise en marche correcte d'une chaudière.

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

**Précisions sur le comportement
attendu**

Critères particuliers de performance

A - Connaître les différents
générateurs utilisés.

- Description correcte des générateurs à eau chaude.
- Connaissance exacte des générateurs d'eau surchauffée.
- Description correcte des générateurs de vapeur.

B - Enumérer les surfaces de chauffe
complémentaires et leur rôle.

- Description correcte des surchauffeurs.
- Connaissance exacte des économiseurs.
- Description correcte des Réchauffeurs d'air.

C - Assurer l'évacuation et le
traitement des produits de
combustion.

- Description correcte des carneaux et conduits de fumée.
- Connaissance correcte des traitements de fumée.

D - Assurer l'alimentation en eau.

- Description exacte des différents modes d'alimentation en eau.
- Contrôle juste du niveau d'eau.

E - Connaître les différents
équipements périphériques de la
chaudière.

- Identification correcte du rôle de chaque organe installé sur la chaudière.

OBJECTIFS OPERATIONNELS DE SECOND NIVEAU

LE STAGIAIRE DOIT MAITRISER LES SAVOIRS , SAVOIR-FAIRE, SAVOIR PERCEVOIR OU SAVOIR ETRE JUGES PREALABLES AUX APPRENTISSAGES DIRECTEMENT REQUIS POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF DE PREMIER NIVEAU TELS QUE :

Avant d'apprendre à connaître les différents générateurs utilisés (A) :

- 1- Décrire les éléments constituant chaque type et leur fonctionnement.
- 2- Définir le principe de fonctionnement de chaque type.
- 3- Définir les fluides caloporteurs.

Avant d'apprendre à énumérer les surfaces de chauffe complémentaires et leur rôle (B) :

- 4- Définir l'intérêt de la surchauffe et la resurchauffe.
- 5- Définir les modes de réglage de la température de surchauffe et de resurchauffe.
- 6- Définir les avantages d'emplacement d'un économiseur.
- 7- Définir les problèmes pouvant être rencontrés avec les réchauffeurs d'air et les mesures de protection.

Avant d'apprendre à assurer l'évacuation et le traitement des produits de combustion (C) :

- 8- Décrire les différents types de foyers.
- 9- Définir les modes de réglage de la température de surchauffe et de resurchauffe.
- 10- Définir les différents modes de traitement des fumées.
- 11- Définir les modes d'évacuation des cendres et des mâchefers.

Avant d'apprendre à assurer l'alimentation en eau (D) :

- 12- Définir les principes d'alimentation en eau.
- 13- Définir le contrôle du niveau.
- 14- Définir le traitement pour les eaux de chaudière.

PRESENTATION DU MODULE

Le module de chaudières à vapeur comprend 4 parties :

- la 1^{er} partie concernant la connaissance des différentes chaudières à vapeur utilisées dans l'industrie ainsi que leurs équipements périphériques ceci pour les conduire d'une manière rationnelle.
- La 2^{ème} partie donne un aperçu sur les échangeurs des chaudières ainsi que leur rôles.
- La 3^{ème} partie décrit les principaux ventilateurs qui permettent l'évacuation des fumées ainsi que leurs traitements.
- Et finalement la 4^{ème} partie fait connaître le traitement en bref ainsi que l'alimentation en eau pour les chaudières industrielles.

Ce module est d'une durée de 90 heures, 80% de cette masse horaire est allouée à la théorie et 20% pour la pratique.

Module :
CHAUDIERES A VAPEUR
RESUME THEORIQUE

I – 1 – CHAUDIÈRES À TUBES DE FUMÉES

I – 1 – 1 – Description générale

La chaudière à vapeur décrite ci-après permet de produire de la vapeur en fonctionnement automatique.

Constituants principaux :

- corps chaudronné
- brûleur / ventilateur
- circuit d'utilisation vapeur
- circuit d'alimentation en combustible
- tableau de commande et contrôle
- sécurités

Architecture générale :

La chaudière se présente sous la forme d'un cylindre reposant sur un support

I – CHAUDIÈRES

Sur la partie supérieure, se situent :

- le dispositif d'utilisation de la vapeur,
- les soupapes de sécurité,
- les prises de pression,
- un contrôle de niveau,
- une ouverture d'inspection,
- le départ cheminée.

Sur chaque partie latérale se situe une ou deux ouvertures d'inspection.

Sur la partie latérale droite ou gauche suivant le sens de construction, se trouvent les indicateurs de niveau, le contrôle d'alimentation en eau et le contrôle de niveau.

En partie inférieure, se situent la trappe à suies, une ouverture d'inspection et la vidange du générateur.

I – 1 – 2 – Chaudronnerie

Le corps de la chaudière est réalisé en acier. Les éléments sont soudés par procédé automatique ou semi-automatique.

Il se présente sous la forme d'une enveloppe cylindrique.

A chaque extrémité de cette enveloppe cylindrique sont soudés deux fonds plats emboutis.

Le fond avant -Rep.B- et le fond arrière -Rep.C- sont traversés par le tube foyer -Rep.D- constituant le 1^{er} parcours des gaz de combustion et par les tubes de fumées constituant les 2^{ème} et 3^{ème} parcours.

Sur l'extrémité avant du corps, est fixée par soudure, sur le fond, la hotte avant – Rep.E-. Celle-ci fermée par une porte –Rep.G-, collecte les gaz de combustion du 2^{ème} parcours pour les canaliser vers le 3^{ème} parcours de tubes. En partie inférieure la hotte avant est munie d'une trappe à suie -Rep.J-.

Sur l'extrémité arrière du corps est fixée par soudure la hotte arrière -Rep.F-.

Celle-ci, fermée par une porte -Rep.H-, canalise les fumées du 3^{ème} parcours vers le départ cheminée -Rep.I-. Cette hotte dispose d'une boîte de renversement des gaz ou chicane du foyer vers le 2^{ème} parcours de tubes -Rep.K-.

Ce corps chaudronné est muni d'orifices de visite :

Un trou de tête ou trou d'homme sur la partie supérieure -Rep.M-.

Un trou de poing sur la partie inférieure -Rep.O-

Un trou de poing sur chacune des parties latérales -Rep.N-

Le châssis -Rep.L- supporte le générateur et ses auxiliaires.

Il répartit la charge statique au sol afin que celle-ci ne dépasse pas 10 MPa -1Kg/cm²-.

Il est constitué par des profilés de dimensions appropriées.

Pour permettre la manutention, la chaudière est munie d'oreilles.

Différents piétements sont positionnés par soudure sur cette enveloppe cylindrique

En partie latérale :

Deux paires de piétements recevant 2 indicateurs de niveau à réflexion -Rep.7-.

Deux piétements recevant une bouteille destinée à la régulation d'alimentation eau – Rep.8-.

Deux piétements recevant une bouteille recevant le système de contrôle de niveau très bas -Rep.9-.

Deux piétements tamponnés -Rep.10-.

Ceux-ci peuvent recevoir en option une bouteille réservé à un 2^{ème} contrôle de niveau très bas.

Un piétement d'alimentation eau -Rep.11-.

Eventuellement et en option :

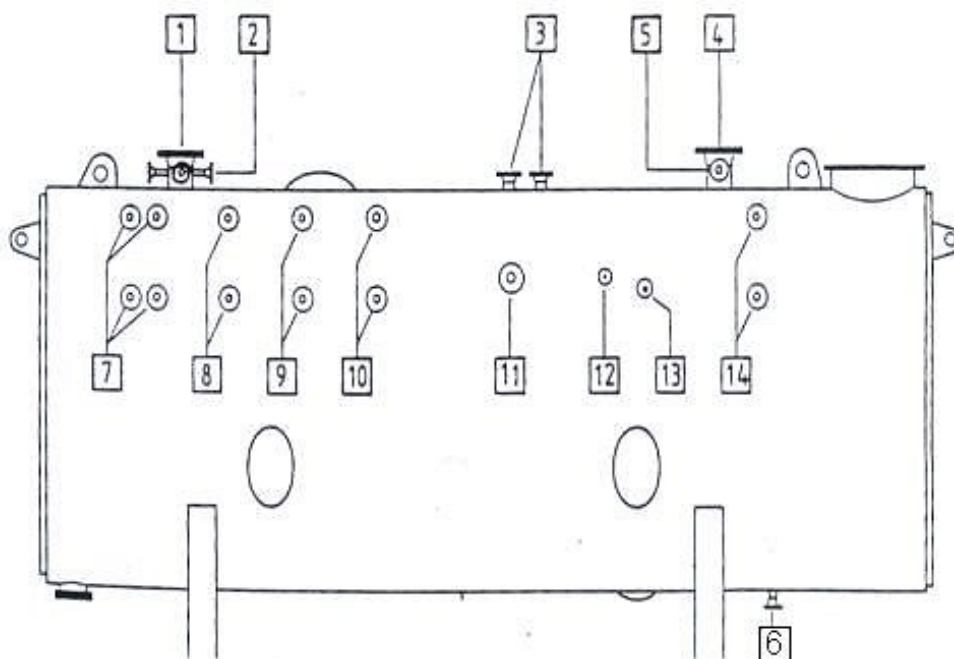
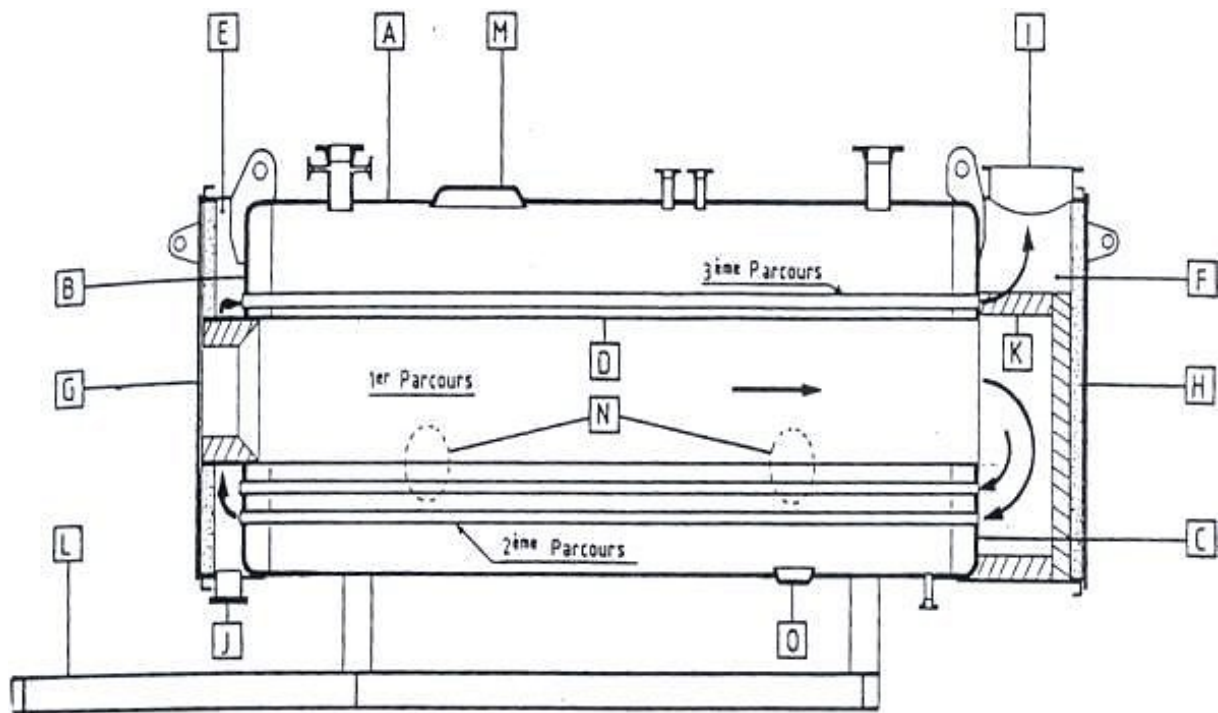
Un piétement de déconcentration de surface -Rep.12-

Un piétement de prise de mesure –Rep.13-

Un piétement de contrôle de niveau trop haut -Rep.14-

En partie inférieure :

Un piétement de vidange et d'extraction -Rep.6-.



I – 1 – 3 – Matériaux isolants - Calorifuge

Matériaux isolants :

Généralités :

Le circuit des fumées d'une chaudière comporte des garnissages de matériaux isolants aux endroits exposés.

Gueulard protection autour du nez du brûleur -Rep.P- et boîte de renversement des gaz -Rep.K-.

Le rayonnement direct de la flamme impose pour cet ouvrage une qualité supérieure de réfractaire présentant les caractéristiques minimales suivantes :

**Excellente résistance aux chocs thermiques,
Bonne résistance à la corrosion chimique,
Faible dilatation et retrait,
Résistance pyroscopique de l'ordre de 1600 °C correspondant à une
utilisation pouvant atteindre 1300 °C.**

Porte arrière -Rep.H-

La porte arrière est calorifugée avec une couche sous forme de bloc isolant.

Porte avant -Rep.G-

La porte avant est calorifugée par deux couches croisées de nappe isolante protégée par une tôle.

Isolation extérieure - calorifuge :

La partie cylindrique du générateur est revêtu d'un matelas isolant en laine de roche

Epaisseurs généralement utilisées :

**Timbre inférieur à 18 bar : 70 mm
Timbre supérieur ou égal à 18 bar : 10 mm
(deux couches croisées de 50 mm)**

Le calorifuge est protégé par une tôle inox ondulée d'épaisseur 0,6 mm.

I – 1 – 4 – Appareillage

Equipped de chauffe :

Généralités équipement

Régulation de charge :

L'utilisation d'un générateur ne se faisant pas, en règle générale, à débit constant, il y a donc lieu de faire varier l'apport d'énergie combustible en fonction de la demande calorifique.

•

I – 1 – 5 – Principe de régulation

Tout ou rien :

La régulation est placée sous la dépendance d'un pressostat de marche.

Tout, peu ou rien :

La régulation de charge est placée sous la dépendance de :

Un pressostat "Peu"

Un pressostat "Tout"

Modulante :

La régulation de charge de type modulante se compose de :

Un capteur qui convertit la pression vapeur en un signal électrique proportionnel

Un servo-moteur qui positionne le registre d'air et la vanne de régulation de combustible de façon à conserver un rapport combustible/air sur la plage de modulation.

Lorsque la demande du réseau devient inférieure au minimum technique du brûleur, celui-ci passe en fonctionnement "TOUT ou RIEN".

Indicateurs de niveau :

Deux indicateurs de niveau à réflexion permettent la visualisation continue du niveau d'eau dans le corps du générateur.

Ces indicateurs de sont équipés de robinetterie d'isolement permettant la purge et le remplacement éventuel des glaces de niveau.

Régulation de niveau d'eau :

Cet appareillage est de type à électrodes dans une bouteille prévue à cet effet
-Rep.8-.

Groupe alimentaire eau :

En liaison avec la régulation de niveau, le groupe moto-pompe eau assure l'alimentation en fonction du niveau en chaudière lui-même dépendant de la vaporisation.

Coffret de commande :

Les divers dispositifs de commande, de protection et de signalisation sont regroupés dans ce coffret.

Un programmeur contrôleur de flamme assure les diverses séquences :

- Préventilation,
- Préallumage,
- Contrôle flamme pilote ou 1^{er} débit,
- Allumage de la flamme principale,
- Surveillance la flamme.

I – 1 – 6 – Sécurités

Pression vapeur :

Soupape de sécurité

Pressostat de marche :

Un pressostat arrête le brûleur à une pression légèrement inférieure au timbre du générateur.

Un **manomètre** indique en permanence la pression de vapeur régnant dans le corps sous pression. Ce manomètre est équipé d'un robinet 3 voies muni d'une bride destinée à recevoir un manomètre étalon lors des visites réglementaires.

Niveau d'eau en chaudière :

Deux sécurités de niveaux protègent en cascade le générateur contre le manque d'eau :

La première de type à électrodes placées dans une bouteille -Rep.8- arrête et verrouille le brûleur, déclenche une alarme pour tout niveau inférieur au niveau normal de la chaudière.

La deuxième sécurité de type à électrodes placée dans un piétement -Rep.3- arrête et verrouille le brûleur pour un niveau légèrement supérieur à 60 mm au dessus de la première surface chauffée par les gaz tubes fumées ou tube foyer.

La remise en service du générateur après déclenchement de cette sécurité n'est possible que par une action manuelle de réarmement des sécurités.

I – 1 – 7 – Entretien

Tous les jours :

- Purger au moins une fois par jour, le régulateur automatique d'alimentation en eau. Ne refermer le robinet de purge que lorsque le brûleur se sera arrêté et que la sonnerie d'alarme de manque d'eau aura fonctionné.
La pompe à eau doit se mettre en service automatiquement.
- Vérifier l'étanchéité des bougies d'isolement et l'absence de condensation dans le boîtier.
- Effectuer des extractions dont le nombre et l'importance sont prescrits par le fournisseur de l'installation de traitement d'eau d'alimentation.
- Prendre un échantillon d'eau et en faire l'analyse sommaire.
Se conformer aux indications du fournisseur de l'installation de traitement d'eau.
- Vérifier la température des fumées à la cheminée.
- Purger les indicateurs de niveau d'eau.

Toutes les semaines :

- nettoyer les filtres fuel-oil, gaz et eau
- démonter la canne brûleur et la nettoyer dans l'essence, le pétrole ou le gas-oil
- démonter et nettoyer le verre recouvrant la cellule
- purger la chicane tubulaire si la chaudière en est munie

Nettoyage et examen côté fumées :

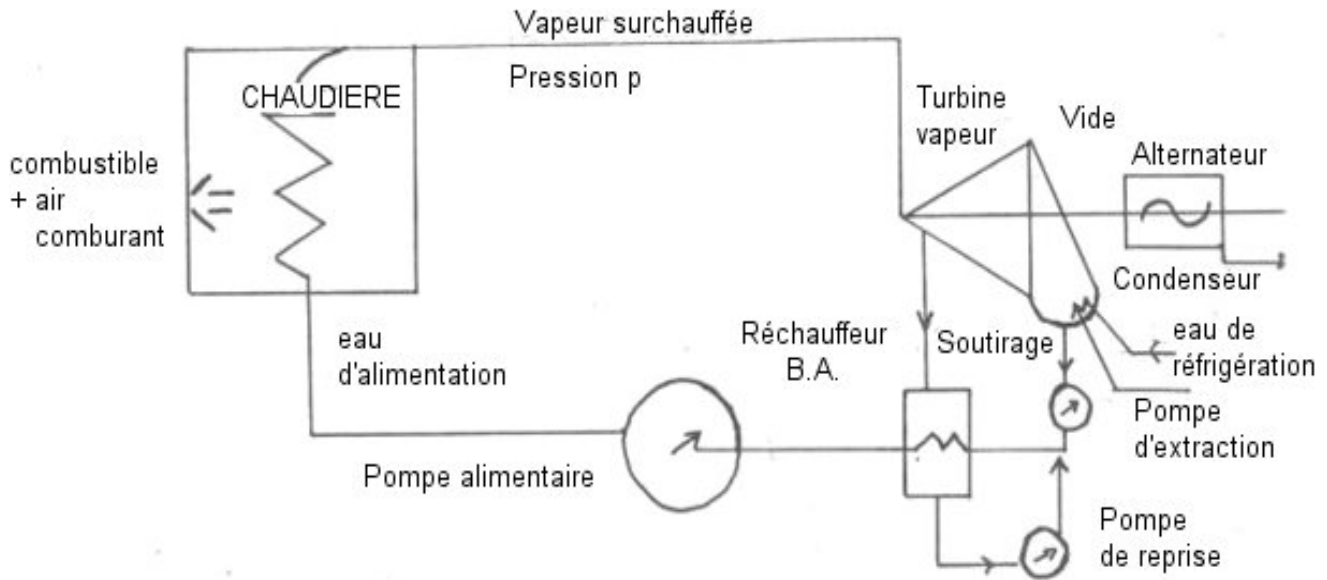
- ouvrir les portes de chaudière,
- ramoner les portes de la chaudière,
- enlever les suies de la boîte à fumées avant, avant de refermer la porte arrière, s'assurer du parfait état de la garniture réfractaire, refermer ensuite, les portes en prenant soin de placer de nouveaux joints,
- remettre la chaudière en service et resserrer les vises des portes à chaud.

Tous les deux mois :

- Vérifier soigneusement le matériel électrique et d'automatisme
- Nettoyer les contacts si nécessaire
Avant de procéder à ce travail : couper l'interrupteur général
- Graisser le groupe moto-pompe à eau
- Vérifier les bourrages de la pompe à eau
- Vérifier la fixation des moteurs.

Tous les ans :

- Remplacer la cellule
Dans une installation marchant 24 heures sur 24, il est nécessaire de procéder à ce remplacement tous les six mois.
- Graisser les moteurs
- Nettoyage et examen de la chaudière côté eau :
laisser refroidir la chaudière et la vider entièrement,
enlever les couvercles du trou d'homme et des différents trous de main,
nettoyer l'intérieur de la chaudière au moyen d'un tuyau d'arrosage branché sur une arrivée d'eau sous forte pression,
lorsque la chaudière aura été nettoyée, vérifier son état intérieur afin de déceler tout entartrage ou corrosion. l'apparition de ces phénomènes doit amener automatiquement la corrosion du système d'épuration,
remettre de nouveaux joints de trou d'homme et de trous de mains et refermer la chaudière, remplir la chaudière.

I – 2 – GÉNÉRALITÉS SUR LES CHAUDIÈRES À TUBES D'EAU**I – 2 – 1 – Production d'électricité dans une centrale thermique vapeur**

Les cycles thermo seront exposés dans le cadre du cours thermodynamique.

La valeur produite par la chaudière est désurchauffée et détendue dans la turbine ; l'énergie qu'elle contient est transformée en énergie mécanique utilisée pour entraîner l'alternateur qui la transforme en énergie électrique.

En fin de détente dans la turbine, la vapeur est condensée dans le condenseur au contact de tubes parcourus par l'eau de réfrigération (eau de mer ou de rivière).

L'eau condensée est reprise par des pompes d'extraction et envoyée vers la pompe alimentaire à travers des réchauffeurs B.P alimentés par des soutirages de vapeur à la turbine.

L'eau servant à la réfrigération est de l'eau brute ayant subi un simple filtrage.

L'eau du cycle eau vapeur est une eau chimiquement traitée pour éviter les dépôts ou les corrosions dans l'ensemble du circuit.

L'eau est réchauffée progressivement jusqu'à l'entrée de la chaudière.

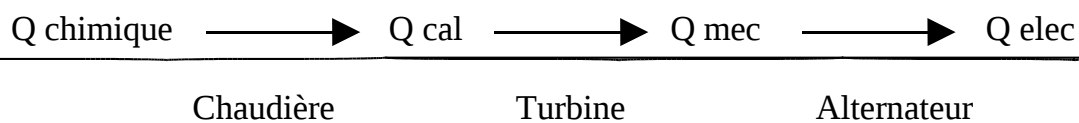
Pour compenser l'eau perdue par les purges et les diverses fuites, on injecte dans le circuit de l'eau d'appoint en provenance d'un poste de traitement d'eau.

I – 2 – 2 – Rôle de la chaudière

L'alternateur transforme l'énergie mécanique que lui transmet la turbine en énergie électrique.

La turbine transforme l'énergie calorifique contenue dans la vapeur en énergie mécanique.

La chaudière utilise l'énergie chimique contenue à l'état latent dans les combustibles et l'air comburant, et transmet cette énergie à un support qui, dans le cas qui nous intéresse, est la vapeur d'eau mais qui pourrait être également un gaz ou de l'eau.



La chaudière assure donc 2 fonctions principales :

- Une fonction combustion :
 - mélange combustible + comburant
 - combustion proprement dite
- Une fonction échange de chaleur :
 - transmission de la chaleur contenue dans les produits de la combustion à l'eau entrant dans la chaudière.

L'étude des chaudière nécessite donc la connaissance :

- des combustibles et de la combustion
- des phénomènes de transmission de chaleur.

L'aménagement général de la chaudière correspond évidemment à ces deux fonctions ; on trouvera :

- une chambre de combustion avec équipement de chauffe,
- des échangeurs de chaleur.

I – 2 – 3 – Remarques

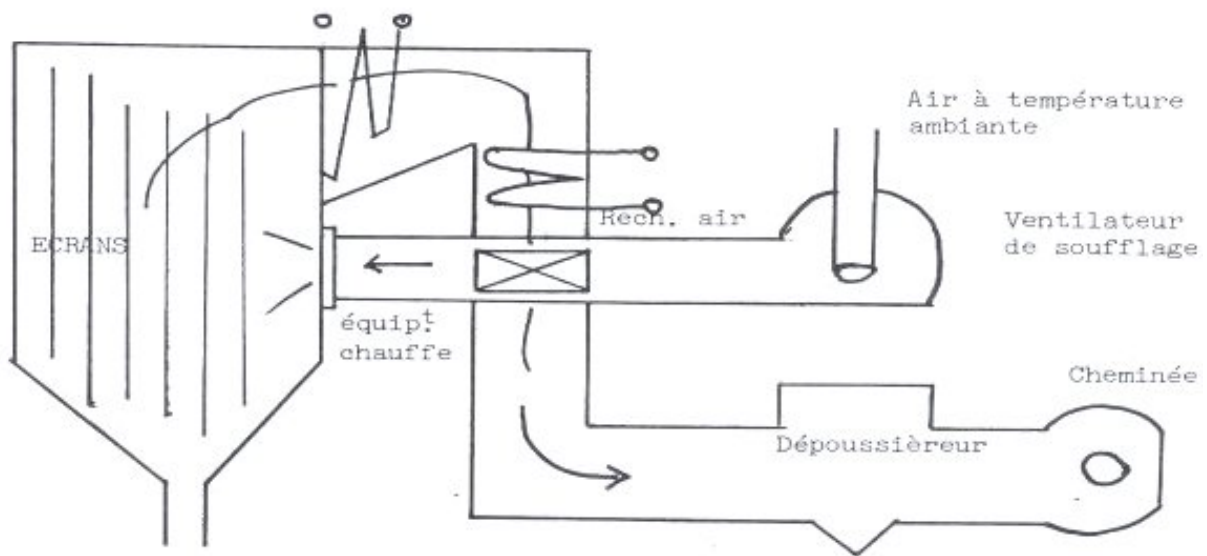
- 1/- La transformation d'eau en vapeur saturée, puis surchauffée dans la chaudière se fait à pression constante. Nous aurons donc à étudier comment s'effectue la circulation de l'eau et de la vapeur dans les différents échangeurs.
- 2/- La combustion s'effectue à des pressions voisines de la pression atmosphérique ; l'eau et la vapeur se trouvent par contre à des pressions élevées (quelques bars jusqu'à 190 bars dans les cycles). Pour des questions mécaniques évidentes, on trouvera donc, dans les échangeurs tubulaires, l'eau et la vapeur à l'intérieur des tubes et les gaz de combustion à l'extérieur.

- 3/- Dans le cas des centrales nucléaires le cycle eau vapeur est le même la chaudière nucléaire est constituée par le réacteur (fonction combustion) et par les générateurs de vapeur (fonction transmission de chaleur).

I – 2 – 4 – Schémas de chaudières

1/- Schéma "externe"

C'est le schéma de circulation des produits de combustion.



L'air comburant pris à l'atmosphère est soufflé par un ventilateur de soufflage à travers un réchauffeur d'air vers les équipements de chauffe (brûleurs...) où s'effectue le mélange avec le combustible.

Dans la chambre de combustion, le mélange de l'oxygène de l'air et de combustibles s'enflamme en produisant des gaz chauds.

La chambre est souvent tapissée d'écrans vaporisateurs qui absorbent une partie de la chaleur dégagée ; les gaz chauds circulent dans des carneaux où ils rencontrent successivement les différents échangeurs de la chaleur en se refroidissant progressivement en cédant leurs calories à l'eau et à la vapeur.

En fin de parcours, pour épuiser d'avantage la chaleur contenue dans les gaz, on leur fait traverser le réchauffeur d'air qui est le seul échangeur de la chaudière à ne pas être sous pression. Outre le gain de rendement obtenu, cette disposition permet d'améliorer la combustion (flamme plus courte).

Avant d'être envoyés par la cheminée à l'atmosphère, les gaz de combustion traversent un dépoussiéreur si le combustible donne des résidus de combustion solides (charbon, fuel...).

La cheminée peut être suivant les ΔP :

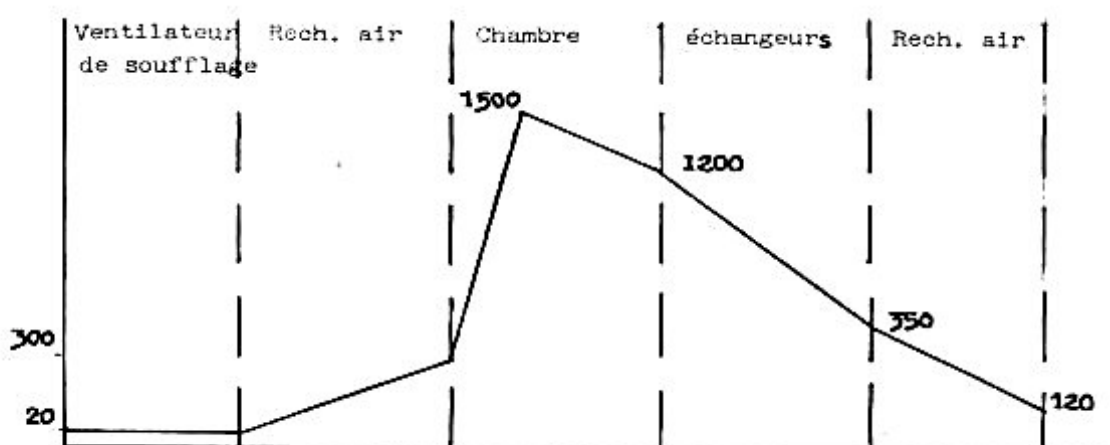
- à tirage naturel
- à tirage mécanique (ventilateurs de tirage).

Le mode de tirage permet de définir deux types de chaudières :

- chaudières pressurisées : en pratique, la pression fournie par le ventilateur de soufflage permet de vaincre le ΔP à travers l'équipement de chauffe et dans tous les circuits de gaz jusqu'à la base de la cheminée. Pour éviter les fuites de gaz chauds, il est nécessaire d'avoir des parois parfaitement étanches.
- Chaudières en dépression : dans ce type de chaudières, le ventilateur de soufflage est chargé de compenser la ΔP dans le réchauffeur d'air et les brûleurs ; le ventilateur de tirage assure une dépression allant de 0 dans la chambre à une valeur correspondant aux ΔP des circuits jusqu'au ventilateur lui-même. Dans ce type de chaudière, le débit de gaz est augmenté des entrées d'air qui accroissent la perte à la cheminée.

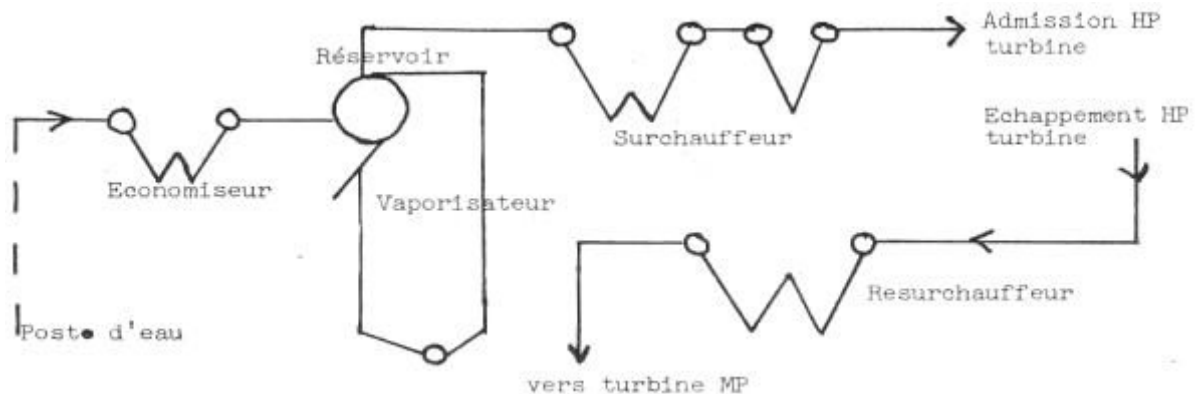
Il faut remarquer que le ventilateur de soufflage véhicule de l'air froid alors que le ventilateur de tirage est traversé par des gaz chauds (débits volumes plus importants).

Evaluation des températures des gaz :



2/- Schéma "interne"

Il s'agit du schéma de circulation de l'eau dans les différents échangeurs.



L'eau réchauffée dans le poste d'eau pénètre dans un économiseur où elle est réchauffée jusqu'à une température un peu inférieure à la température de saturation.

A la sortie de l'économiseur, l'eau est envoyée dans le réservoir relié aux faisceaux vaporisateurs dans lesquels s'effectue la transformation de l'eau en vapeur saturée. Ces faisceaux sont constitués essentiellement par les écrans de la chambre de combustion. Dans le cas des petites chaudières, les vaporisateurs comprennent un faisceau à convection en plus des écrans de chambre.

Le réservoir a pour but de répartir l'eau dans les différents faisceaux par des tubes de descente et de recueillir le mélange eau et vapeur qui en sort.

La vapeur saturée séparée de l'eau par des séparateurs mécaniques situés dans le réservoir traverse ensuite le ou les surchauffeurs : surchauffeurs B.T, surchauffeur H.T. La division de la zone de surchauffe en 2 ou 3 éléments permet l'utilisation du matériau le plus économique pour le tube en fonction de la température. Elle permet de placer entre les différents éléments de surchauffeurs un désurchauffeur qui limite, en fonction de la charge, la température de la vapeur allant à la turbine.

Après détente dans la partie H.P de la turbine (environ 30 bars), la vapeur est renvoyée à la chaudière dans un resurchauffeur avant de retourner à la MP.

3/- dispositions relatives des échangeurs dans les circuits de gaz

- La chambre de combustion, qui est la zone la plus chaude de la chaudière, est en général tapissée d'écrans vaporisateurs constitués par des panneaux de tubes placés entre un distributeur et un collecteur.
- Le vaporisateur est le plus grand échangeur de la chaudière

- Le coefficient de transmission de chaleur du mélange eau/vapeur est plus élevé qu'en vapeur seule. Il y a donc meilleur refroidissement du tube.
- Dans les carneaux de fumées, les gaz les plus chauds rencontrent d'abord les échangeurs dans lesquels la vapeur est la plus chaude : surchauffeurs, resurchauffeurs ; en fin de parcours des gaz se trouvent l'économiseur puis le réchauffeur d'air. c'est ce que l'on appelle la circulation à contre courant ou rationnelle ou méthodique

Par opposition qu'on l'échangeur est parcouru dans le même sens que les fumées, il s'agit d'une circulation irrationnelle ou antiméthodique.

I – 2 – 5 – Dimensions et caractéristiques de quelques chaudières des centrales thermiques

PALIER DE PUISSANCE	125 MW	250 MW	600 MW Type HAURE 2-3
Pression vapeur bar	125	163	163
Timbre "	147	190	190
Température surchauffe	545	565	565
Température resurchauffe	545	565	565
Pression resurchauffe	28 à 30	34	34
Débit de vapeur t/h	360 à 400	700 – 770	1725
Débit de combustible (fuel) t/h	27,5	54	128
Dimensions chaudière :			
Hauteur m	36	46	49
Largeur	13	20	27
Longueur	15	22	29
Capacité chambre			7000 à 10000 m ³

I – 2 – 6 – Paramètres de définition d'une chaudière

- Type de circulation
- Nature du combustible
- Débit de vapeur
- Timbre du réservoir
- Pression de vapeur surchauffée
- Pression de vapeur resurchauffée
- Température vapeur
- Température de l'eau alimentaire
- Rendement recherché

I – 2 – 7 – Classification des chaudières

Les chaudières peuvent être classées en fonction

1/- du combustible brûlé

- Chaudières au charbon
au fuel
au gaz
mixtes fuel-gaz etc...

2/- du mode de combustion

- chaudières pressurisées
- chaudières en dépression
- chaudières au charbon sur grille
au charbon pulvérisé
à foyer à cendres fondues

3/- du mode de circulation

- circulation naturelle
- circulation contrôlée
- circulation forcée

4/- de la technologie de construction

- chaudières à retour de flamme
- chaudières suspendues
- chaudières posées
- fin-casing ou skin-casing

5/- des conditions thermodynamiques

- haute pression, haute température
- basse pression, saturée
- à resurchauffe ou sans resurchauffe

6/- de la destination

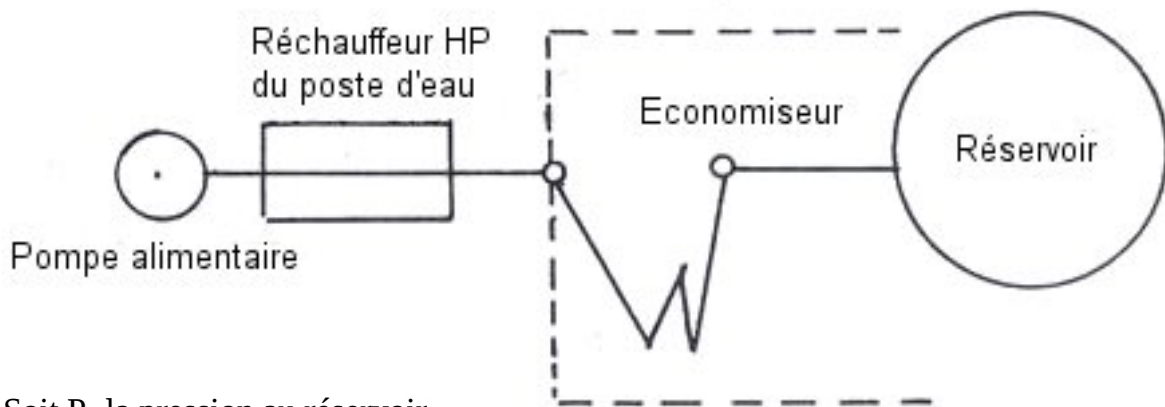
- chaudières industrielles
- chaudières de production thermique
- chaudières à démarrage rapide
- chaudières à accumulation
- chaudières de récupération

I – 3 – LA CIRCULATION DANS LES VAPORISATEURS

I – 3 – 1 – Circulation du fluide dans les autres faisceaux

La circulation d'eau (économiseur), de vapeur (surchauffeur ou resurchauffeur), d'air ou fumées (resurchauffeur d'air, circuit des gaz) résulte des différences des pression entre l'entrée et la sortie.

Pour l'économiseur par exemple :



Soit P_0 la pression au réservoir

P_1 la pression au refoulement de la pompe alimentaire ($P_1 > P_0$)

La pression P_0 est maintenue constante par la régulation de la pression de la chaudière.

La pression P_1 résulte de la caractéristique pression-débit de la pompe alimentaire pour un débit π

$$P_1 - P_0 = \Delta P \text{ (réchauffeurs)} + \Delta P \text{ (Eco)} + \Delta P \text{ (tuyauteries de liaison)}.$$

Le débit π entre dans l'économiseur et le même débit en sort.

Connaissant :

- La vitesse d'entrée nécessaire pour avoir un bon refroidissement des tubes d'économiseur.
- La surface d'échange de l'économiseur

On calcule :

- le nombre de tubes en parallèle,
- la longueur de chaque tube,
- la perte de charge dans l'économiseur

On calcule de même les ΔP dans les réchauffeurs et les tuyauteries et on déduit la pression nécessaire au refoulement de la pompe pour obtenir P_0 au réservoir de la chaudière.

La pression P_0 elle-même est calculée à partir de la pression demandée à l'admission turbine et des pertes de charge dans les tuyauteries de liaison chaudière – Turbine et dans le réchauffeur.

La circulation côté eau ou côté vapeur est produite par une pompe ; de la même façon, la circulation côté air et côté gaz de combustion est assurée par des ventilateurs.

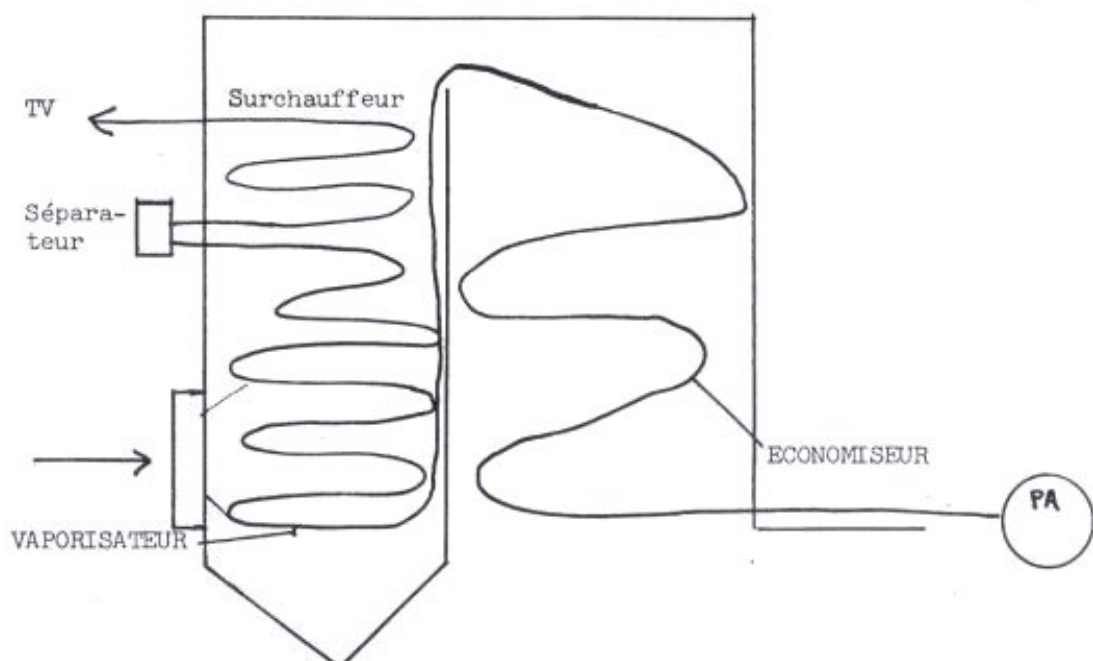
I – 3 – 2 – Circulation dans les vaporisateurs

Le (ou les) vaporisateur constitue le plus grand échangeur de la chaudière puisque c'est là que s'effectue la transformation de l'eau en vapeur. De plus le vaporisateur se trouve souvent au contact des fumées les plus chaudes (écrans des chambres de combustion).

On aura donc des faisceaux de grande surface (nombreux tubes en parallèles ou tubes très longs) dans lesquels le débit d'eau/vapeur devra être suffisant pour assurer, quel que soit le régime de marche de la chaudière, un bon refroidissement des tubes. Pour résoudre ce problème différentes solutions sont possibles, chacune d'elle correspond à un type de chaudière déterminé.

1/- Chaudière SULZER ou « Once Through »

dans ce type de chaudière on applique le principe de circulation utilisé dans les échangeurs du paragraphe précédent. La chaudière est constituée par quelques tubes en parallèle qui forment successivement l'économiseur, le vaporisateur et le surchauffeur ; la circulation est assurée par la pompe alimentaire.



La vitesse varie le long du tube, compte tenu des variations de poids spécifique :

- 1,5 à 3 m/s dans l'économiseur
- 3 à 20 m/s dans le vaporisateur
- 20 à 30 m/s dans le surchauffeur

La perte de charge est très élevée ; par exemple pour obtenir 100 bars en sortie surchauffeur il faut une pompe alimentaire refoulant à 180 bars.

Quand la charge varie les zones de vaporisation se déplacent, on peut alors se trouver en vaporisation complète dans des zones de température fumées favorisant les dépôts de sels préjudiciables à la tenue des tubes.

Ce type de chaudière n'a pas de réservoir ; toutefois un séparateur est placé en sortie de vaporisateur : la vapeur est envoyée au surchauffeur, l'eau est réinjectée dans l'économiseur.

La chaudière SULZER a l'avantage d'un encombrement et d'un poids réduits ; elle permet également une vaporisation rapide et est bien adaptée à une centrale de pointe.

Les inconvénients sont :

- le coût élevé de la pompe alimentaire,
- la nécessité d'un traitement d'eau très élaboré,
- la faible capacité d'accumulation
- la grande sensibilité aux variations de charge, nécessitant des régulations très sophistiquées

2/- Chaudières à circulation forcée type « BENSON »

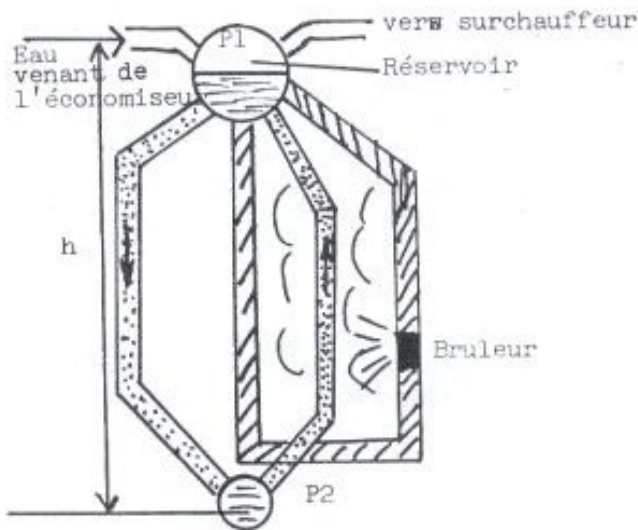
Ce type de chaudières est directement dérivé du précédent. Le vaporisateur est divisé en plusieurs faisceaux en série, le vaporisateur terminal étant placé dans une zone où les gaz sont moins chauds pour éviter les dépôts de sels à l'intérieur des tubes.

3/- Chaudières à circulation naturelle

C'est le générateur de vapeur le plus courant.

L'eau et le mélange eau/vapeur circulent sans le concours d'aucune pompe en ne mettant en œuvre que des phénomènes « naturels. »

a/- Principe de la circulation naturelle



h = dénivellation

W_1 = poids spécifique eau

W_m = poids spécifique émulsion

p_1 = pression au réservoir

p_2 = pression à la partie inférieure

l_1, d_1 = longueur équivalente et diamètre du tube de descente

l, d = mêmes caractéristiques du tube chauffé.

$$h - Dp = h_m + Dp$$

$$hW_1 - Dp_1 = hW_m + Dp$$

Le vaporisateur, piqué sur le réservoir, est constitué de tubes non chauffés. Dans les premiers circule l'eau descendant du réservoir, dans les seconds se forme un mélange (émulsion) d'eau et de vapeur de poids spécifique inférieur à celui de l'eau, qui remonte vers le réservoir. La circulation résulte de la différence de poids des 2 colonnes (thermosiphon).

Calculons les pertes de charge :

- dans le tube descendant :

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\text{entrée}} + \Delta P_{\text{frottement}}$$

$$\Delta P_1 = \xi_1 W_1 (V_1^2/2g) + \xi_2 (l_1/d_1) W_1 (V_1^2/2g)$$

- dans le tube chauffé :

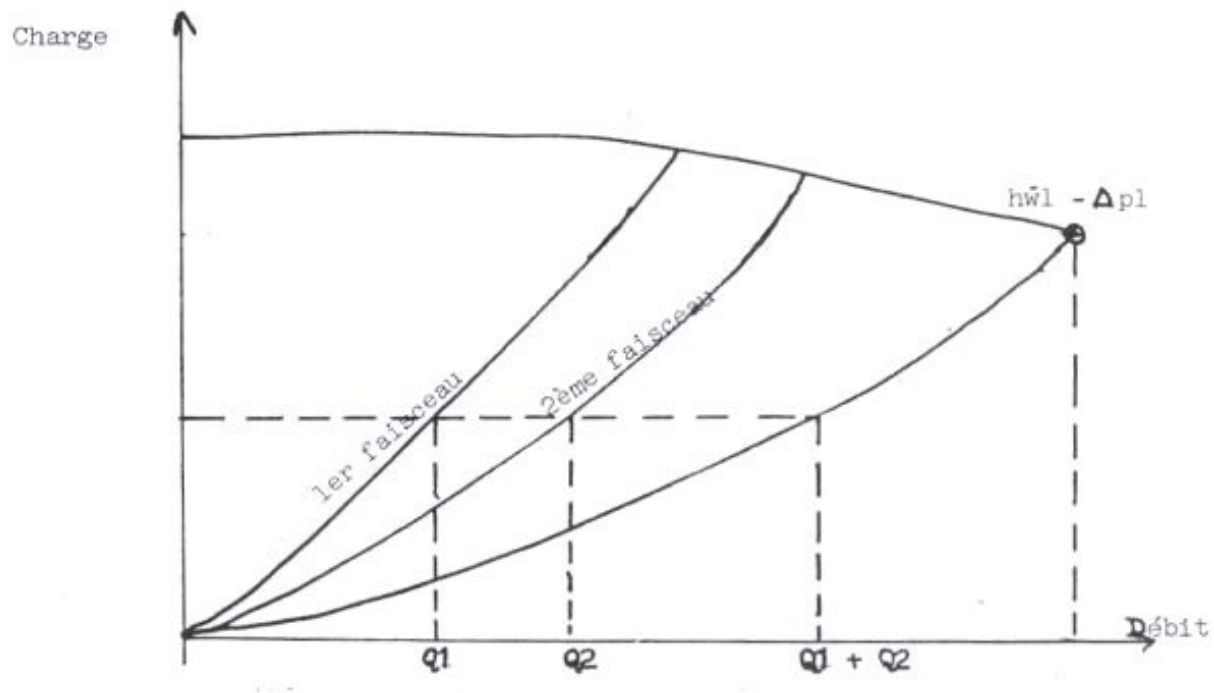
$$\Delta P = \Delta P_{\text{entrée}} + \Delta P_{\text{frottement}} + \Delta P_{\text{mise en vitesse}}$$

$$\Delta P = \xi'_1 W_1 (V'^2/Ag) + \xi'_2 (l/d) W_m (V_m^2/2g)$$

l'application du théorème moyen se calcule à partir de la quantité de chaleur absorbée par le tube.

b/- Calcul de la circulation

Chaque faisceau est chauffé différemment et par ailleurs tous les faisceaux sont alimentés en parallèle. On trace, pour chaque faisceau, la « caractéristique » ($hw_m + \Delta P$) en fonction du débit, on en déduit graphiquement la caractéristique globale. L'intersection avec la caractéristique de descente donne le point de fonctionnement, d'où les débits et les vitesses dans les différents faisceaux.

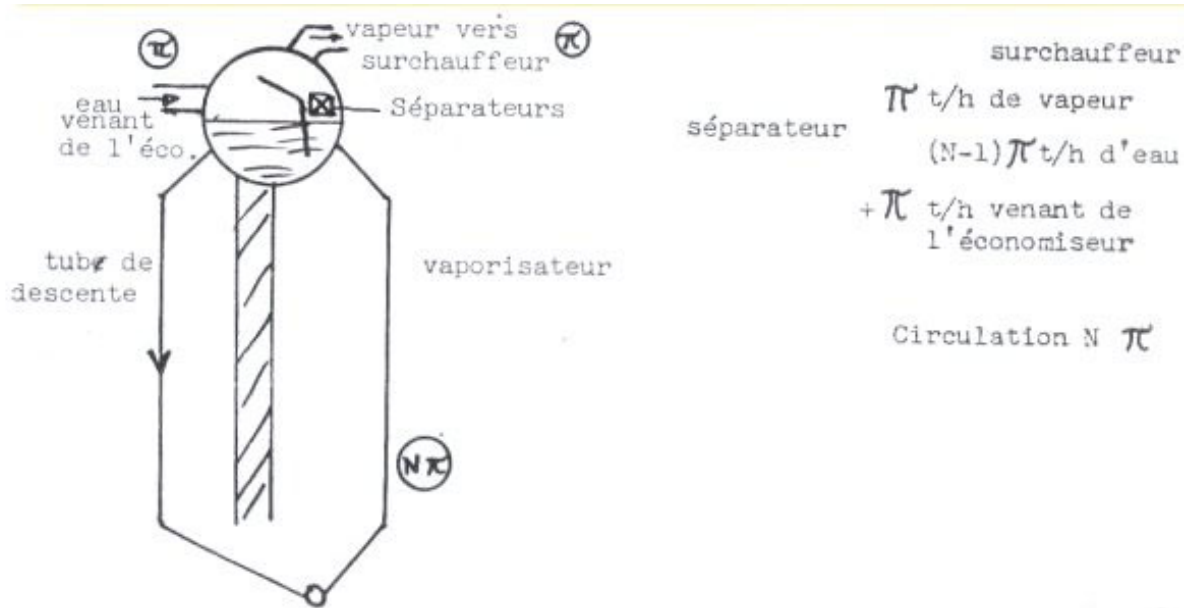


La connaissance de la vitesse à l'entrée des tubes est importante pour s'assurer du refroidissement suffisant des tubes. Cette vitesse doit être d'autant plus importante que le tube est plus chauffé. Une circulation insuffisante peut provoquer des déformations et des ruptures de tubes.

Les considérations ci-dessus font apparaître que le débit d'eau en circulation du débit de vapeur de la chaudière ; il peut lui être très supérieur.

On appelle indice de circulation N le rapport du débit de circulation ou débit de vapeur de la chaudière. N varie de 3 ou 4 à 50 suivant la pression et le débit de la chaudière.

En sortie des tubes chauffés on a un mélange d'eau et de vapeur ; ce mélange traverse des séparateurs, la vapeur est dirigée vers le surchauffeur ; alors que l'eau retourne dans les vaporisateurs par les tubes de descente.



c/- Influence de la circulation sur la construction

La force motrice qui crée la circulation naturelle est proportionnelle à

$$h (w_1 - w_m)$$

Cette force motrice dépend donc de la pression de fonctionnement de la chaudière ; plus la pression est élevée, plus $(w_1 - w_m)$ diminue et plus il faut augmenter la hauteur de la chaudière.

La circulation étant freinée par la perte de charge, les dispositions constructives doivent permettre de réduire ces pertes de charge.

- tubes verticaux aussi droits que possible
- piquages soignés des tubes dans les réservoirs
- pas de parties horizontales dans lesquelles l'eau et la vapeur se séparent.

d/- Limite de la circulation naturelle

Le gros avantage de ce type de circulation est de ne pas nécessiter l'utilisation de pompe (prix, consommation, fiabilité). Ses inconvénients sont :

- manque de souplesse de construction.
- utilisation à des pressions inférieures à 180 bars
- sensibilité aux chutes brutales de pression.

4/- Chaudières à circulation assistée

C'est un compromis entre la chaudière à circulation naturelle et les chaudières à circulation forcée. La pompe fournit un appoint permettant, soit une ΔP plus élevée (utilisation de tubes de petits diamètres), soit le fonctionnement aux pressions voisines de 180 bars quand la force $h (w_1 - w_m)$ n'est plus suffisante.

De plus, à l'aide de diaphragmes placés à l'entrée des tubes, il est possible de régler les débits dans des vaporisateurs de longueur ou de chauffage différents.

Ce type de générateur a une meilleure souplesse de fonctionnement que le générateur à circulation naturelle, et ne nécessite pas la même puissance de pompe que le générateur à circulation forcée.

5/- Chaudières à circulation contrôlée type LA MONT

La circulation dans les vaporisateurs est assurée par une pompe de circulation comme pour la circulation forcée, mais les faisceaux sont constitués par un grand nombre de tubes en parallèle.

On utilise donc des pompes de circulation à grand débit, mais à faible ΔP .

Ce type de circulation, par la grande souplesse de forme qu'il permet convient particulièrement aux chaudières spéciales : chaudières de bateaux, chaudières de récupération etc...

Dans l'ordre où les fumées les rencontrent, on trouve les faisceaux suivants :

- la chambre de combustion
- les surchauffeurs (HT, MT, BT)
- les vaporisateurs (éventuellement)
- les resurchauffeurs
- l'économiseur
- le réchauffeur d'air

Les problèmes rencontrés résultent :

- de la fonction à remplir
- des températures de fumées ou de vapeur élevées
- de la corrosion par les fumées ou par l'eau

II – TECHNOLOGIE DES ÉCHANGEURS DE LA CHAUDIÈRE

et internes)

- des modes de circulation dans le cas des vaporisateurs

II – 1 – CHAMBRES DE COMBUSTION

II – 1 – 1 – Généralités

La chambre de combustion est la partie la plus importante du générateur de par sa fonction et de par sa taille.

C'est en effet dans la chambre de combustion que se développe la flamme de combustion et c'est là que s'effectuent les échanges de chaleur les plus intenses ; compte tenu des températures élevées ces échanges se font principalement par rayonnement.

La forme donnée à la chambre de combustion dépend essentiellement du type de combustible et de l'équipement de chauffe utilisé. Les dimensions doivent permettre un développement satisfaisant de la flamme garantissant une combustion complète ; en aucun cas la flamme ne doit venir au contact des parois de la chambre.

Les formes et les dimensions doivent par ailleurs être telles que le dégagement calorifique soit compris entre 150 000 et 300 000 mth/m² et que l'absorption de chaleur par les écrans soit aussi uniforme que possible et limitée à 150 000 mth/m² d'écrans (ce qui nécessite dans le cas des très grosses chaudières, l'utilisation d'écrans médians)

Dans le cas de combustibles cendreux, la partie inférieure de la chambre doit avoir une forme de trémie permettant l'extraction des cendres.

Les parois de la chambre sont tapissées d'écrans jointifs ou non. Par convention :

- la façade des brûleurs constitue l'écran avant.
- la façade opposée constitue l'écran arrière ; pour permettre la sortie des gaz de la chambre, les tubes constituant cet écran sont écartés sur une partie de la hauteur, constituant le « 1^{er} vaporisateur » ou faisceau « coup de feu », dont le rôle est de protéger les surchauffeurs
- l'allumage du mélange combustible + air comburant est assuré dans certains cas par le rayonnement des parois autour des brûleurs ; dans ce cas on ménage autour des brûleurs des zones non recouvertes d'écrans pour en augmenter le rayonnement

Les chambres de combustion peuvent être :

- pressurisées : il n'y a pas de ventilateur de tirage
- en dépression : il y a un ventilateur de soufflage d'air et un ventilateur de tirage à la base de la cheminée

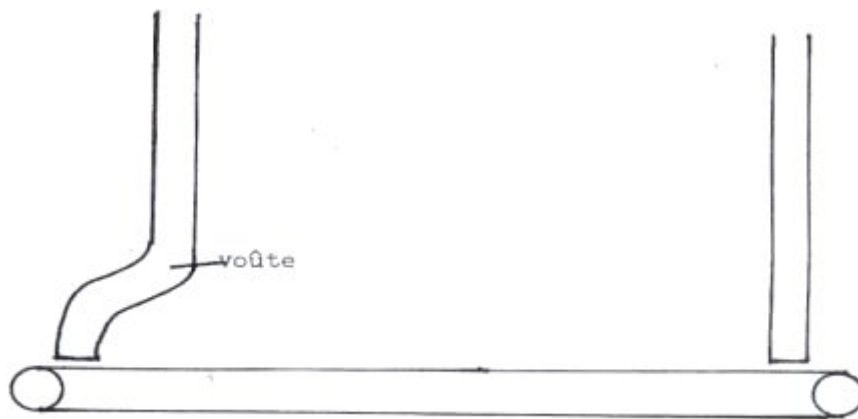
II – 1 – 2 – Chambres de combustion des petites chaudières

Les parois sont constituées de briques :

- briques réfractaires côté feu
- calorifuge ensuite
- briques rouges pour l'étanchéité

pour éviter des températures trop élevées sur les briques, des tubes écrans, non jointifs, peuvent être ajoutés.

Dans le cas des chaudières à grille, l'allumage du charbon est réalisé par le rayonnement d'une voûte réfractaire au début de l'entrée du charbon dans la chambre.



En général, les chaudières au mazout nécessitent de tapisser les parois en brique de tubes jointifs pour éviter les températures trop élevées et les corrosions des briques.



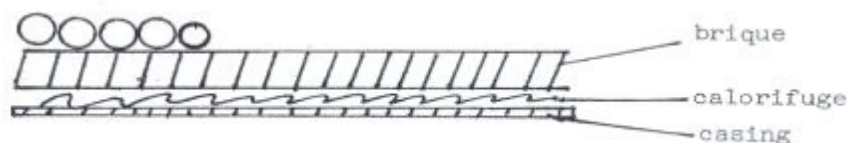
Le casing est la tôle externe soudée à la charpente support de la chaudière ; la casing assure l'étanchéité et l'habillage de la chaudière.

II – 1 – 3 – Chambres de combustion des grosses chaudières

Les températures sont plus élevées et les chaudières sont de plus grandes dimensions. Elles sont le plus souvent suspendues à une charpente, ce qui proscriit les parois épaisses de réfractaires. Dans ces conditions, les parois sont constituées de tubes avec ou sans ailettes jointifs. On rencontre les dispositions suivantes :

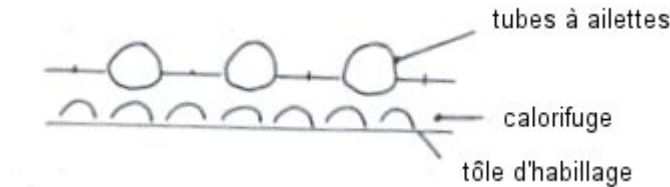
1/- Skin-casing

Tubes lisses jointifs sur lesquels est plaquée la tôle de casing assurant l'étanchéité qui se trouve alors à la même température que les tubes. Cette disposition permet de réaliser des chaudières pressurisées.



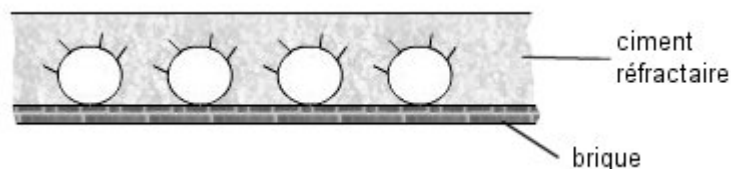
2/- Fin casing

l'étanchéité est assurée par les tubes eux-mêmes. Les tubes sont des tubes à ailettes longitudinales soudées entre elles.



3/- Ecrans des foyers cyclones

dans de tels foyers, la combustion se fait à une température élevée, au-dessus du point de fusion des cendres. Les tubes sont équipés de studs, petits cylindres qui maintiennent un ciment réfractaire sur le tube.



4/- Dimensions et qualité des tubes

les tubes sont en acier non allié, les températures de métal étant très voisines de la température de saturation. Les diamètres extérieurs utilisés dépendent du type de circulation :

- 76 mm (3") pour chaudière à circulation naturelle
- 38 mm (1,5") pour chaudières à circulation contrôlée

5/- Alimentation des écrans

Les écrans peuvent être alimentés soit directement depuis le réservoir, soit par une tuyauterie alimentant un distributeur. De même l'émulsion sortant des tubes peut être renvoyée directement au réservoir, soit recueillie dans un collecteur relié au réservoir par une ou plusieurs tuyauteries.

6/- Dispositions particulières

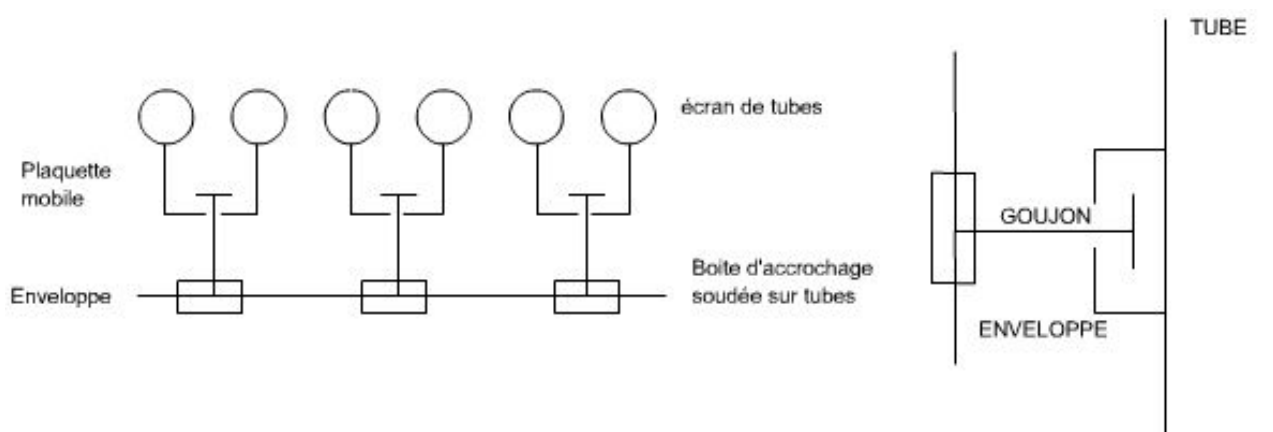
Les parois des chambres de combustion sont équipées de regards, de portes de visite, de trappes d'expansion, d'effacements pour souffleurs de suies, nécessitant un formage particulier des tubes à leur emplacement.

Dans le cas des chaudières pressurisées des précautions doivent être prises pour assurer l'étanchéité à ces emplacements et leur refroidissement (soufflage d'air comprimé de refroidissement en provenance du ventilateur de soufflage et d'air à 7 bars pour ouverture du regard).

En général, les écrans des chambres de combustion constituent tout ou partie des vaporisateurs de la chaudière, il peut arriver, dans certains cas, qu'une partie de ces écrans soit affecté à la surchauffe. Le but recherché est d'avoir une partie du surchauffeur où l'échange de chaleur se fasse par rayonnement ; la combinaison d'échanges par rayonnement et par convection permet d'obtenir les plus faibles variations de température de surchauffe avec la charge.

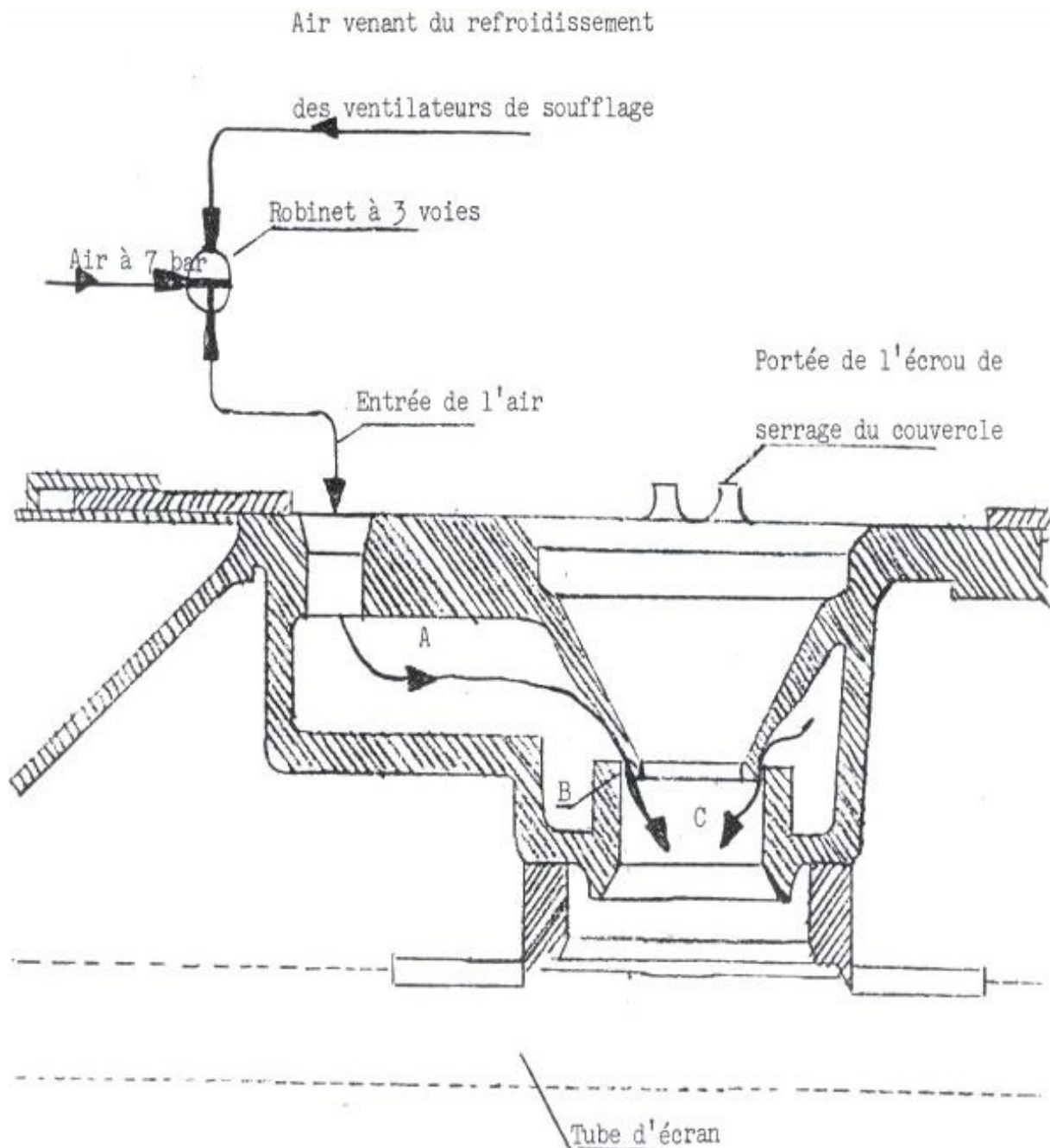
7/- Liaison tubes écran/enveloppes

La liaison doit permettre les dilatations différentielles entre les tubes à une température voisine de la saturation et l'enveloppe qui est séparée des écrans par le calorifuge.



8/- Regard de chambre pressurisée

REGARD D'UN GENERATEUR A DE VAPEUR A CHAMBRE DE COMBUSTION PRESSURISEE



II – 2 – SURCHAUFFEURS ET RESURCHAUFFEURS

II – 2 – 1 – Généralités

Les surchauffeurs et les resurchauffeurs sont les échangeurs dont le métal est à la température la plus élevée.

Les surchauffeurs sont alimentés par la vapeur saturée sortant du réservoir ; la vapeur surchauffée est envoyée à la turbine.

Les resurchauffeurs sont alimentés par la vapeur ayant subi une première détente dans la partie HP de la turbine, la vapeur resurchauffée est renvoyée au corps MP de la turbine où elle continue à se détendre.

La grande majorité des chaudières est équipée de surchauffeurs, par contre seules les chaudières thermiques sont équipées de resurchauffeurs.

Les températures élevées dans les surchauffeurs et les resurchauffeurs augmentent le rendement du cycle et réduisent les érosions dues aux condensations dans les derniers étages BP de la turbine.

Malheureusement ces températures sont limitées par les caractéristiques de résistance du métal des tubes.

Pour des températures de métal inférieures à 425°C, on peut utiliser des aciers ordinaires non alliés.

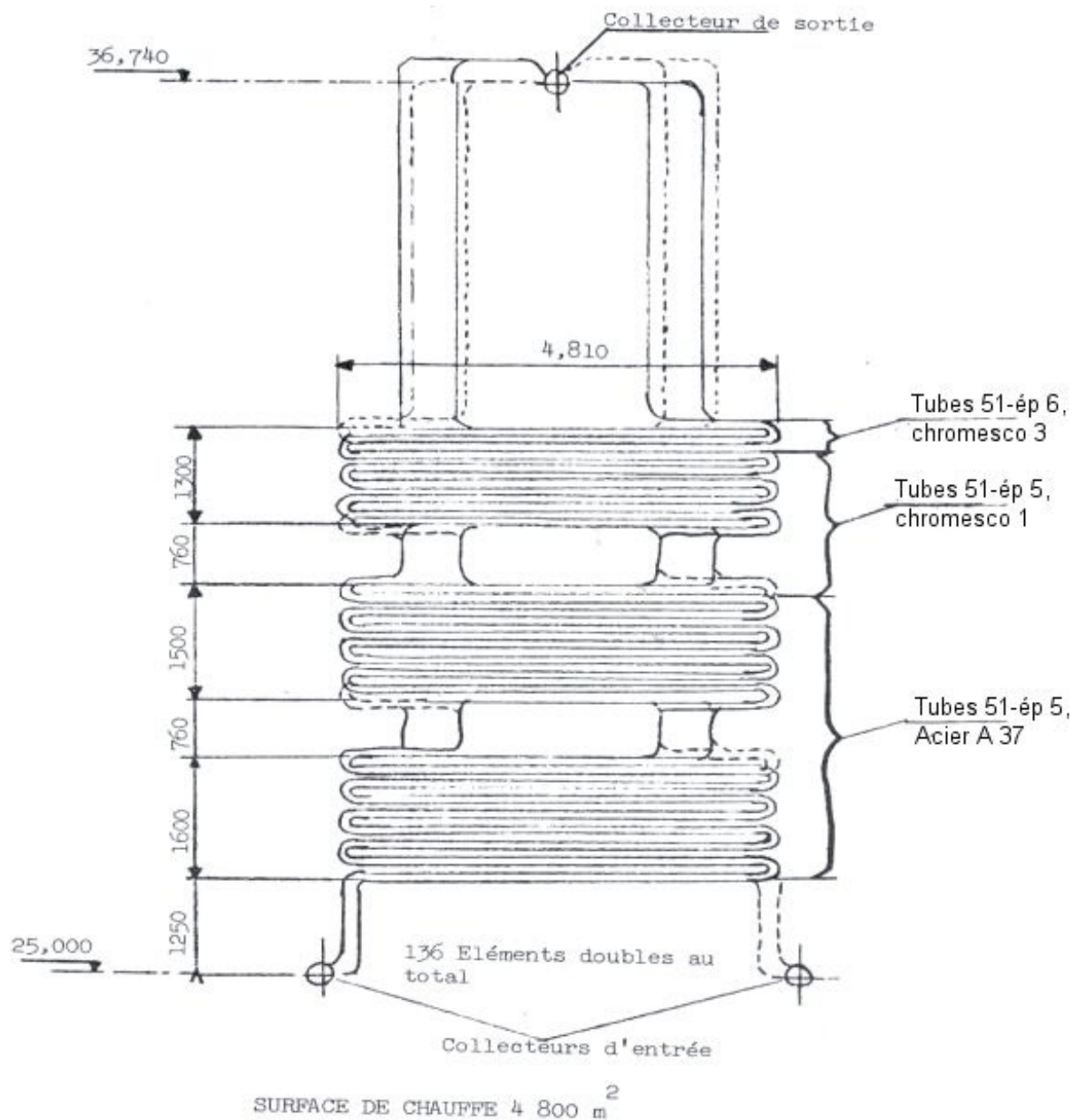
Pour des températures ne dépassant pas 540°C, on utilise des aciers ferritiques contenant du Cr, Mo, Va en quantité relativement faible.

Au delà de 540°C, on emploie des aciers austénitiques (18% Cr, 8% Ni). Ces aciers sont évidemment beaucoup plus chers et sont plus difficiles à mettre en œuvre.

En pratique, on décomposera en deux ou trois parties, le surchauffeur, par exemple :

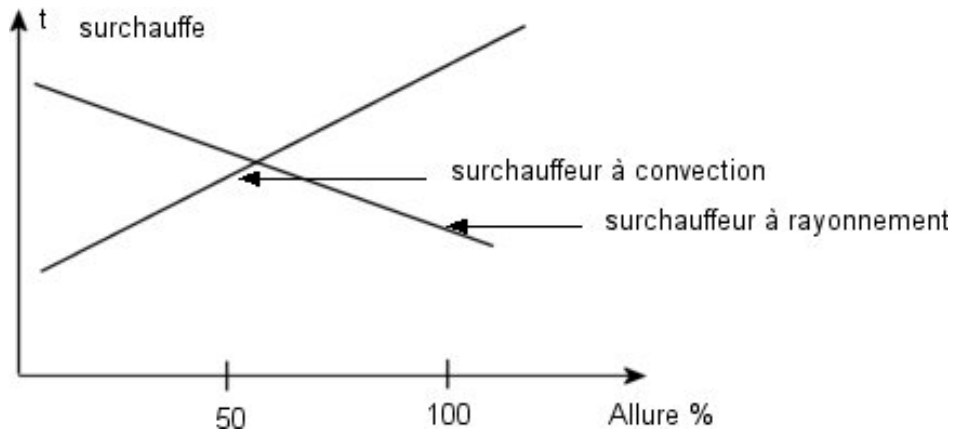
- Surchauffeur BT pour t métal 425°C
- Surchauffeur MT pour t métal 540°C
- Surchauffeur HT au-delà de 540°C

GENERATEUR DE VAPEUR DE 400 t/h STEIN & ROUBAIX
(Centrale de CREIL)
SURCHAUFFEUR PRIMAIRE (Basse température)



II – 2 – 2 – Implantation des surchauffeurs dans la chaudière

Suivant le mode d'échange de chaleur, la caractéristique température de surchauffe en fonction de la charge a des allures différentes.



On voit que la combinaison astucieuse d'éléments à rayonnement et d'éléments à convection permet d'obtenir une température de surchauffe relativement constante avec la charge.

On peut ainsi placer une partie de surchauffeur dans la chambre de combustion où l'échange se fait presque exclusivement par rayonnement, une autre partie étant placée juste avant l'économiseur où l'échange se fait par convection.

Entre ces deux positions extrêmes les échanges se font à la fois par rayonnement et par convection.

En général, la circulation est méthodique : la vapeur circule en sens inverse des fumées de façon à réduire la surface nécessaire ; dans certains cas, pour limiter la température de métal des tubes on adopte une circulation antiméthodique.

II – 2 – 3 – Cas particulier des resurchauffeurs

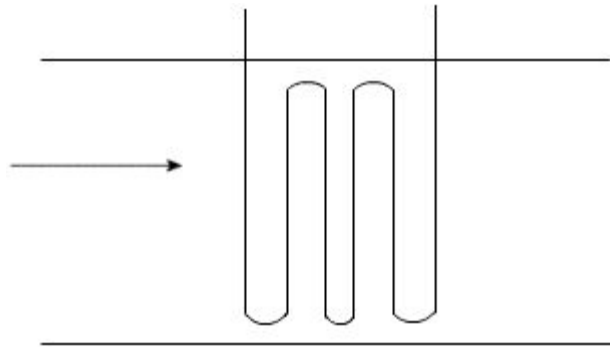
La température de resurchauffe est le plus souvent très voisine de la température de surchauffe ; par contre la pression dans les resurchauffeurs est beaucoup plus faible que dans les surchauffeurs ; au total il semblerait donc que le resurchauffeur pose moins de problème que le surchauffeur. En réalité il faut résoudre en outre :

- le problème de la répartition de vapeur entre tous les tubes, la perte de charge autorisée ne dépassant pas 1 ou 2 bars ;
- le problème de la température du tube ; à basse pression les coefficients de transmission de chaleur étant moins bons qu'à hautes pressions, la température du métal du tube dépend d'une façon plus importante de la température des fumées.

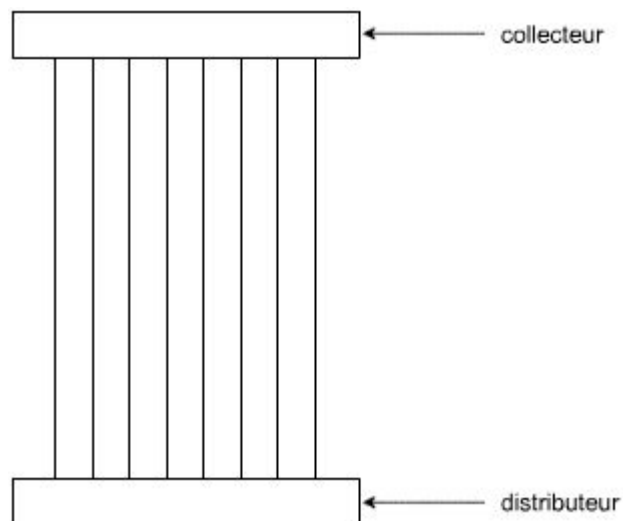
II – 2 – 4 – Construction

Les tubes ont des diamètres de 38 à 63,5 mm, les vitesses de vapeur variant de 20 à 30 m/s. Suivant l'emplacement des surchauffeurs on rencontre différentes constructions.

- surchauffeurs pendentifs situés dans le carneau horizontal ;



- surchauffeurs vidangeables. Placés dans les carnaux verticaux des chaudières
- surchauffeurs à panneaux situés dans les chambres de combustion



II – 2 – 5 – Protection des surchauffeurs et des resurchauffeurs

Les collecteurs de sortie des surchauffeurs et des resurchauffeurs sont équipés de soupapes de sûreté.

Ces soupapes sont tarées de façon à s'ouvrir avant celles du réservoir.

Avantages

- L'étanchéité de soupapes en vapeur surchauffée se conserve mieux que celle de soupapes en vapeur saturée
- En cas de suppressions, le surchauffeur continue à être alimenté en vapeur et les tubes sont protégés à des températures excessives.

II – 2 – 6 – Réglage de la surchauffe

1/- But du réglage de surchauffeur (ou de resurchauffe)

Une température excessive peut entraîner des contraintes dans les surchauffeurs ou dans la turbine dépassant les valeurs admissibles et provoquer des accidents graves.

Une température trop faible pénalise le rendement du cycle et augmente l'érosion dans les derniers étages BP de la turbine.

La température de vapeur variant avec la charge même si on combine les échanges par rayonnement et par convection, on dispose de différents moyens pour régler ou pour limiter la température de surchauffe :

- Recyclage des gaz de combustion
- Injection d'eau
- Inclinaison des brûleurs
- By-pass des gaz de combustion

2/- Recyclage des gaz de combustion

Une partie (0 à 30%) des gaz sortent de l'économiseur est renvoyée par un ventilateur à la partie inférieure de la chambre de combustion.

L'effet de recyclage est double :

- La température des gaz dans la chambre de combustion diminue, ce qui réduit l'échange par rayonnement sur les écrans : la température des gaz à la sortie de la chambre de combustion augmente
- Le débit de gaz sortant de la chambre de combustion augmentant, l'échange par convection dans le surchauffeur et dans le resurchauffeur augmente

Donc le recyclage des fumées augmente la température de surchauffe et de resurchauffe.

3/- Injection d'eau

On injecte dans la vapeur surchauffée ou resurchauffée une quantité d'eau réglable

L'injection se fait à un étage de surchauffe intermédiaire de manière à être assuré d'une vapeur sèche, de température uniforme, à la sortie. La qualité chimique de l'eau injectée doit être au moins équivalente à celle de la vapeur.

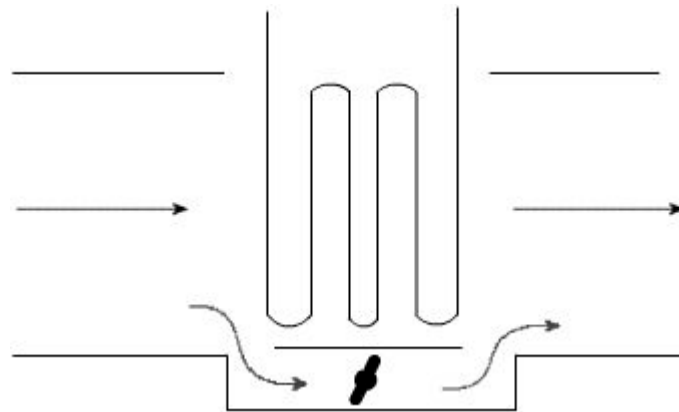
L'eau est pulvérisée pour faciliter sa vaporisation

4/- Inclinaison des brûleurs

Ce procédé très particulier n'est employé qu'avec des brûleurs conçus spécialement.

La température sortie chambre de combustion, donc la température de surchauffe augmente en dirigeant les brûleurs vers le haut.

5/- Contournement des gaz de combustion



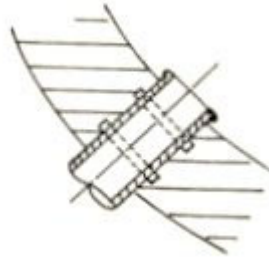
La diminution de la température de surchauffe est obtenue en réduisant le débit de gaz traversant le surchauffeur.

II – 3 – LES VAPORISATEURS

Dans les grandes chaudières modernes la totalité de la vaporisation est assurée par les écrans de la chambre de combustion.

Dans ces écrans, il faut s'assurer que la vaporisation est « nucléée » (en bulles) et non en film, de façon à conserver un bon coefficient de transmission interne qui garantit une température de métal acceptable.

Les chaudières industrielles sont, le plus souvent, équipées d'un faisceau vaporisateur complémentaire. Dans les chaudières à circulation naturelle, ce faisceau est constitué de tubes le plus droit possible piqués entre le réservoir supérieur et le réservoir inférieur. Les tubes sont courbés de façon à pénétrer radialement dans les réservoirs et à absorber les dilatations différentielles. Les tubes sont en général dudgeonnés (mandrinés) au moyen d'un appareil expenseur conique.



Dans les chaudières à circulation contrôlée, on dispose d'une plus grande souplesse de construction et les vaporisateurs ont des formes analogues à celles des surchauffeurs.

II – 4 – LES ÉCONOMISEURS

II – 4 – 1 – Rôle des économiseurs

L'eau en provenance du condenseur est réchauffée dans le poste d'eau ; la pompe alimentaire l'amène à la chaudière à une pression un peu supérieure à celle des vaporisateurs.

Avant d'envoyer cette eau dans le réservoir de la chaudière, on lui fait traverser un économiseur placé sur le parcours des gaz de combustion. Cette disposition présente les avantages suivants :

- Les gaz de combustion subissent un refroidissement complémentaire et la perte par chaleur sensible à la cheminée est diminuée.
- En réchauffant l'eau on réduit l'écart de température par rapport à la température dans le réservoir (température de saturation) ; on réduit ainsi les contraintes thermiques auxquelles le réservoir est soumis.

L'économiseur est placé dans des fumées à environ 500°C, la circulation est méthodique. Il n'y a donc pas de problèmes liés aux températures élevées. L'échange de chaleur se fait exclusivement par convection, les vitesses d'eau varient de 0,1 à 0,7 m/s suivant le type d'économiseur.

L'eau ayant un coefficient de convection élevé par rapport aux gaz, les tubes sont pratiquement à la température de l'eau. Les fumées contiennent du SO₃ et de la vapeur d'eau qui se condensent sur les tubes sous forme d'acide sulfurique, si leur température est inférieure au point de rosée.

La construction des économiseurs doit donc prendre en compte les éléments suivants :

- Grande surface d'échange du fait des faibles températures de fumées et leur faible coefficient de convection
- Résistance à la corrosion
- Encrassement des surfaces

En aucun régime de fonctionnement, l'économiseur ne doit être vaporisant, pour éviter les instabilités d'écoulement.

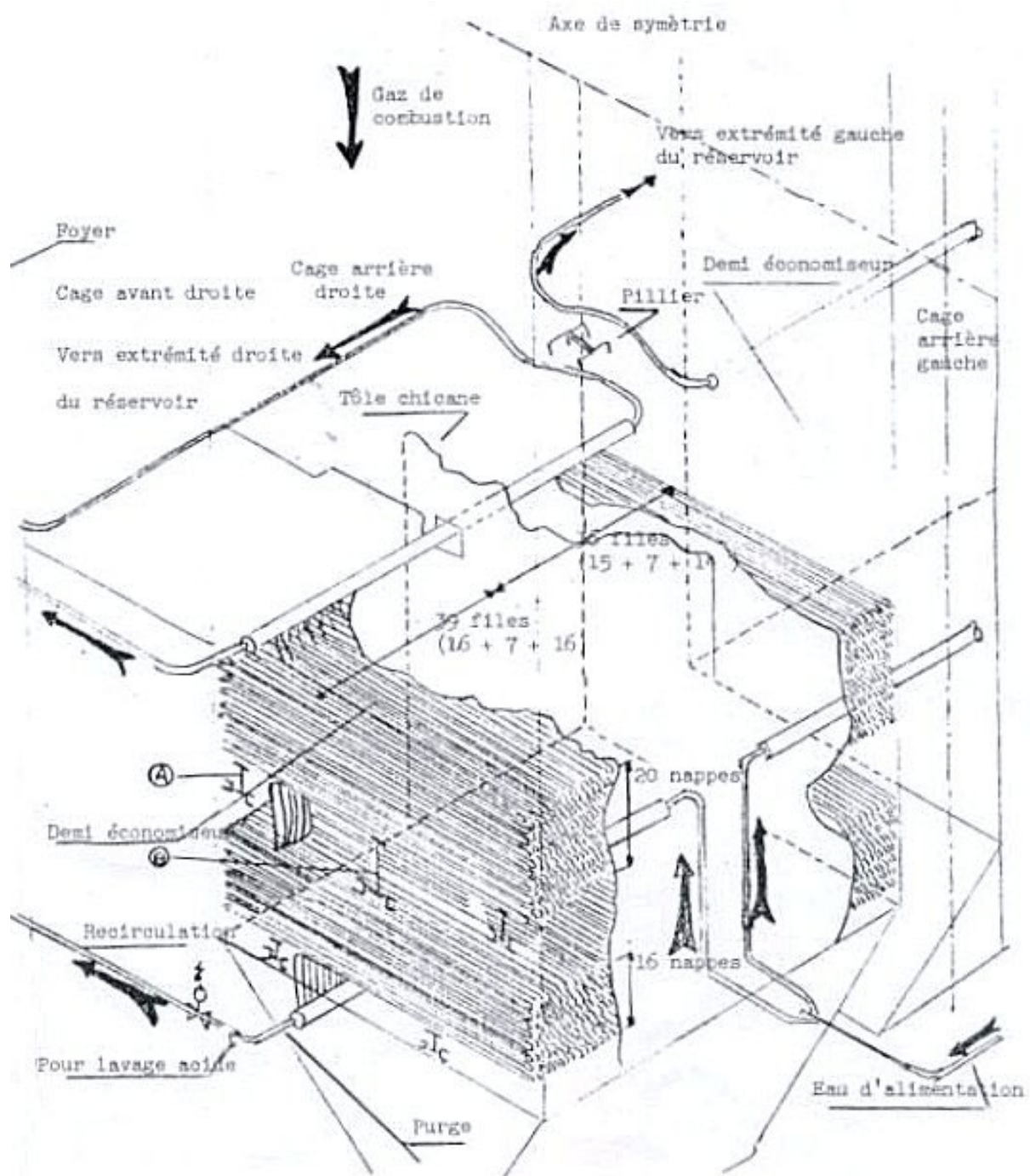
II – 4 – 2 – Economiseurs en fonte

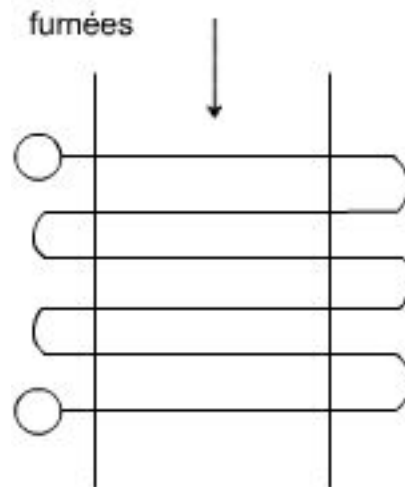
La fonte résiste mieux que l'acier à la corrosion, mais les tubes en fonte sont limités aux pressions inférieures à 40 bars. Pour des pressions plus élevées, on peut utiliser des tubes en acier chemisés d'ailettes en fonte.

II – 4 – 3 – Economiseurs en acier

Quand les corrosions ne sont pas à craindre (grandes chaudières où $t = 240^{\circ}\text{C}$) on utilise des faisceaux de tubes en acier. Ces tubes peuvent être lisses ou à ailettes. Dans ce dernier cas les coudes sont rapportés et placés à l'extérieur des conduits de fumées, comme les collecteurs et distributeurs.

ECONOMISEUR D'UN GENERATEUR DE 900 t/h BABCOCK WILCOX (CHAMPAGNE-SUR-OISE)





II – 5 – LES RÉSERVOIRS

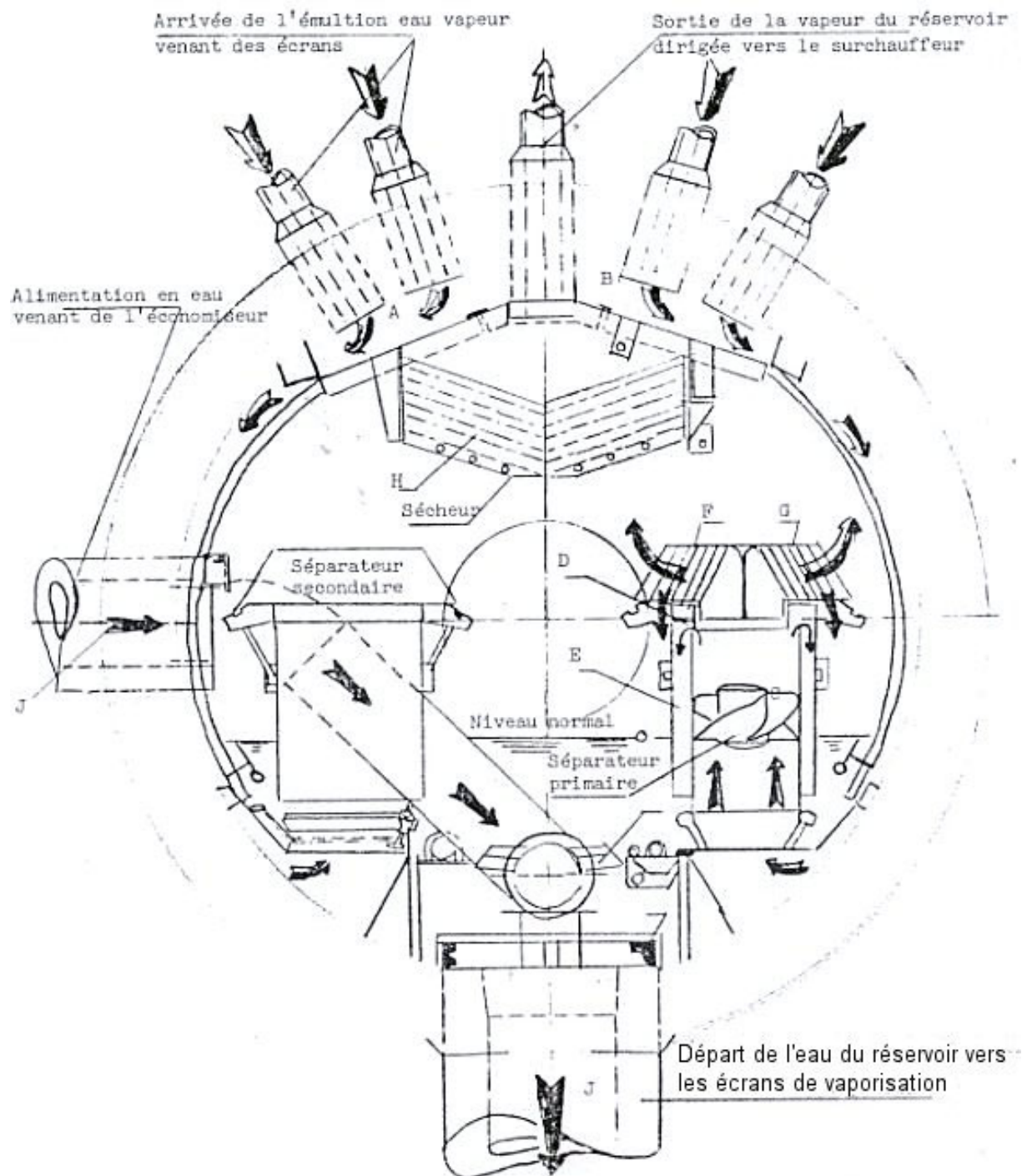
Les réservoirs n'existent pas dans certains types de chaudières (chaudières à traversée forcée). Ils font partie du circuit de vaporisation, mais ne sont pas chauffés par les gaz de combustion.

Le réservoir reçoit l'eau sortant de l'économiseur et alimente en eau, par des tubes non chauffés les différents vaporisateurs. L'émulsion sortant de ces vaporisateurs se dégagent dans la partie haute du réservoir. Des séparateurs et des sécheurs séparent les phases eau et vapeur.

- l'eau retourne dans les vaporisateurs
- la vapeur est envoyée au surchauffeur

Il s'établit dans le réservoir un plan d'eau donc le niveau est contrôlé par le régulateur de la chaudière. Le réservoir constitue une réserve d'eau en cas de variation rapide de la charge

COUPE DU RESERVOIR D'UN GENERATEUR DE VAPEUR DE 770 t/h – STEIN & ROUBAIX



Pour une chaudière de 735 t/h le réservoir a les dimensions suivantes :

- diamètre extérieur : 1,950 m
- longueur : 18,2
- épaisseur : 138 mm
- poids : 145 tonnes

II – 5 – 1 – Construction

Les réservoirs sont construits en acier spécial à partir de viroles cylindriques et de fonds hémisphériques et semi-elliptiques.

Les viroles sont obtenues par cintrage à chaud et soudées longitudinalement. Le nombre de viroles constituant le réservoir résulte des dimensions des fours de traitement thermiques.

Le réservoir est soumis à la réglementation des Mines, son coût est élevé et son délai d'exécution est important. Pour ces différentes raisons, le réservoir subit de nombreux contrôles en cours d'exécution et également en exploitation.

En raison des contraintes thermiques élevées dont il est le siège, le réservoir pilote la vitesse de montée en température lors des démarrages.

II – 5 – 2 – Equipement externe

Le réservoir est équipé des piétements nécessaires au raccordement :

- des soupapes de sûreté
- des tuyauteries d'alimentation venant de l'économiseur
- des tuyauteries de départ vers les surchauffeurs
- des tuyauteries d'évents, de purges de déconcentration d'injection de réactifs, de prises d'échantillons d'eau et de vapeur.
- Des niveaux d'eau

Et bien entendu des raccordements aux vaporisateurs.

II – 5 – 3 – Soupapes de sûreté

Le décret du 2 Avril 1926 modifié impose d'équiper les récipients sous pression de vapeur de soupapes de sûreté dont le débit et le tarage soient tels que la pression dans le récipient ne dépasse jamais une valeur appelée timbre. Le réservoir subit une

épreuve hydraulique en fin de fabrication à 1,5 fois le timbre. Cette épreuve est effectuée en présence des Mines qui définissent le timbre réglementaire.

La réglementation impose une réépreuve décennale des récipients.

Le timbre est la valeur de pression à prendre en compte dans les calculs des réservoirs.

Les soupapes de sûreté sont des soupapes à ressort. Leur étanchéité est difficile à assurer, surtout après un premier fonctionnement.

II – 6 – LES RÉCHAUFFEURS D’AIR

II – 6 – 1 - Généralités

Les réchauffeurs d’air sont, à la différence de tous les échangeurs précédents, des appareils pratiquement sans pression. Ils sont placés, côté air à l’aval du ventilateur de soufflage et côté fumées à l’aval de l’économiseur. ce sont donc des échangeurs à basse pression et à basse température, avec des coefficients internes et externes du même ordre.

Le réchauffeur d’air a pour but de refroidir les fumées de façon à réduire la perte par chaleur sensible des gaz ; cette chaleur ainsi récupérée est utilisée pour le réchauffage dont on sait qu’il améliore la combustion.

Les problèmes rencontrés dans les réchauffeurs d’air sont de deux sortes :

- corrosion par les fumées
- incendie

Il existe une très grande variété de solutions au problème du réchauffage d’air.

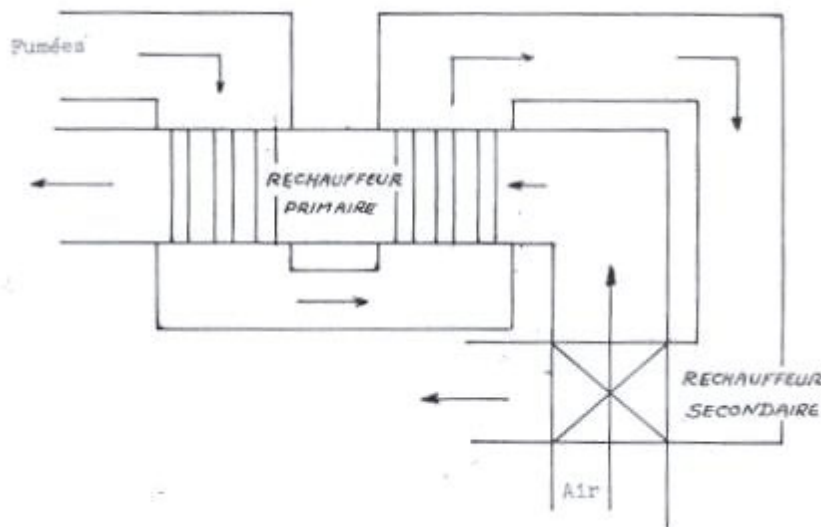
II – 6 – 2 – Réchauffeurs d’air tubulaires

Ces réchauffeurs sont en général des réchauffeurs primaires, c’est à dire qu’ils sont suivis d’un autre réchauffeur placé juste avant la cheminée dans des zones de température plus froides.

Les réchauffeurs primaires n’ont donc pas à craindre les corrosions sulfériques.

Les appareils sont constitués de faisceaux de tubes droits piqués entre deux plaques tubulaires. L’air ou les fumées peuvent circuler à l’intérieur des tubes ; le nettoyage est plus facile quand c’est l’air qui circule à l’intérieur des tubes.

La circulation est généralement croisée.



II – 6 – 3 – Réchauffeurs DEKA

Ils sont constitués de tubes en fonte de section rectangulaire comportant des ailettes à l'extérieur pour accroître la surface d'échange.



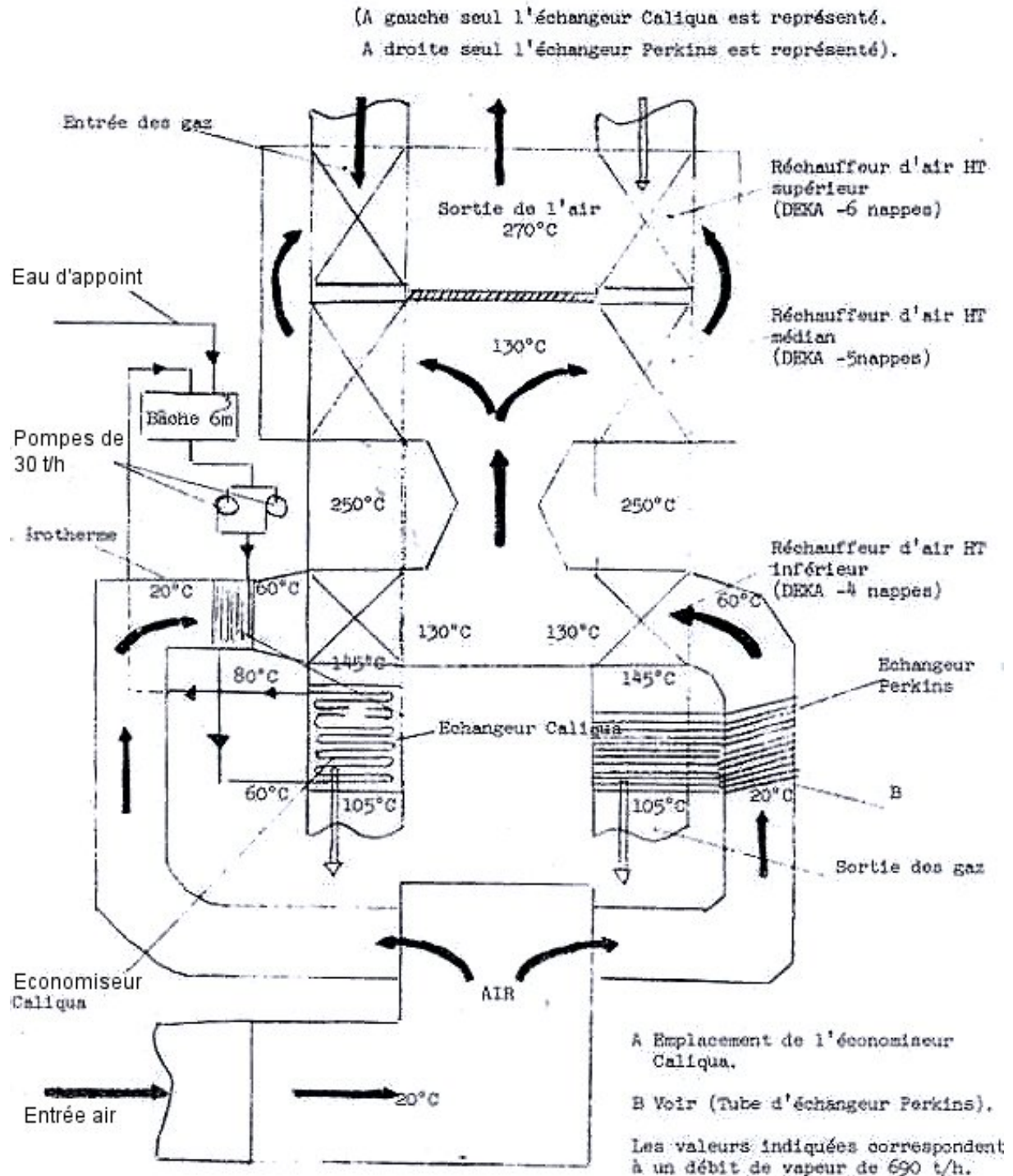
Ces appareils sont utilisés comme réchauffeurs secondaires grâce à leur bonne résistance à la corrosion.

Leur encombrement et leur poids sont importants.

II – 6 – 4 – Réchauffeurs rotatifs

Principe : des tôles chauffées par les gaz de combustion sont ensuite placées dans le circuit d'air froid qu'elles réchauffent avant d'être à nouveau placées dans les gaz chauds.

SCHEMA DU RECHAUFFEUR DE VAPEUR 770 T/H DE LA CENTRALE DE SAINT-OUEN



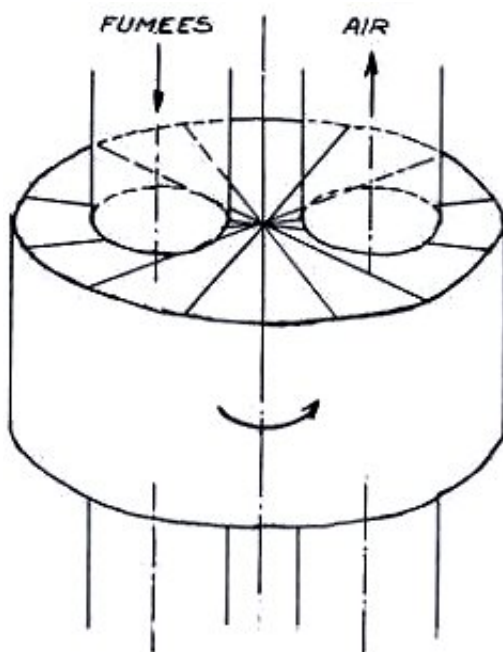
Deux réalisations correspondent à ce principe :

- Réchauffeurs LJUNGSTRÖM

Cet appareil est constitué d'un empilement vertical de tôles en secteurs constituant un rotor en tournant à 1 tr/mn.

Des gaines d'air et de fumées parallèles à l'axe de rotation font traverser ce rotor par moitié par les fumées.

Les secteurs de tôles passent donc successivement dans les fumées puis dans l'air.



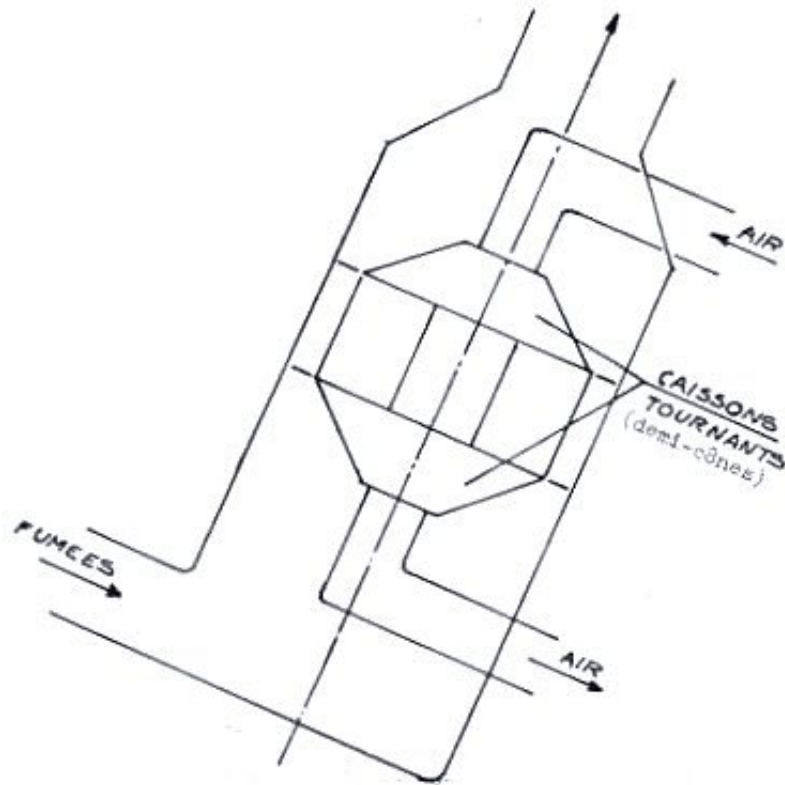
Les deux faces des tôles, qui en outre sont modulées, interviennent dans l'échange de chaleur. On dispose donc, dans un espace limité, d'une surface d'échange importante. Ce faible encombrement constitue le principal avantage de ce type de réchauffeurs.

Il est difficile d'assurer l'étanchéité entre les circuits d'air et les circuits de gaz. Comme l'air est à une pression plus élevée il se produit une fuite d'air vers les gaz de combustion (4 à 8%). Cette étanchéité se dégrade dans le temps, ce qui fait que l'entretien de ces appareils est coûteux.

Ils présentent par ailleurs le risque de prendre feu en cas d'arrêt accidentel du rotor.

- Réchauffeur d'air ROTHEMÜHLE

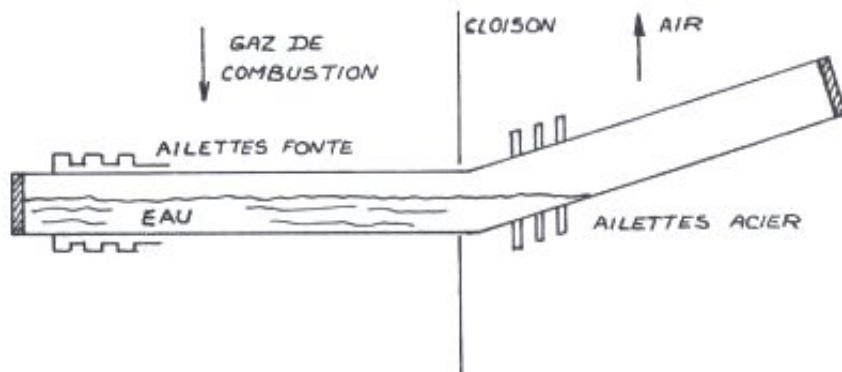
Ces appareils sont assez semblables aux précédents, mais au lieu de faire tourner les secteurs de tôles, ce sont les gaines d'air qui tournent, l'ensemble gaines d'air et tôles étant placé dans la gaine de fumées.



Par rapport au type précédent, le réchauffeur ROTHEMÜHLE présente un certain nombre d'avantages :

- mécanismes d'entraînement plus simple
- étanchéité air/fumées qui ne se dégrade pas dans le temps, donc entretien moins coûteux
- risques d'incendie moins importants

II – 6 – 5 – Réchauffeurs Perkins



Les tubes sont fermés à leurs extrémités. Ils sont remplis à 1/3 d'eau pure et sous vide (saturation 35°C)

L'eau se vaporise dans la partie horizontale ; la vapeur produite se condense dans la partie inclinée en cédant sa chaleur à l'air et retombe dans la partie horizontale.

II – 6 – 6 – Réchauffeurs à tubes de verre

Dans les parties les plus froides de la chaudière, on a imaginé de remplacer l'acier, très sensible aux corrosions sulfuriques, par du verre pyrex. Pour éviter les risques de rupture par vibrations provoquées par les gaz, les tubes sont de préférence horizontaux. Les plaques tubulaires restent en acier et sont, elles, sensibles à la corrosion sulfurique.

III – 1 – VENTILATEURS

La chaudière utilise un ou plusieurs ventilateurs :

- Ventilateur de soufflage (toutes les chaudières),
- Ventilateur de tirage (chaudières en dépression),
- Ventilateur de recyclage d'air,
- Ventilateur de recyclage des fumées,
- Ventilateur de réinjection des suies.
- Ventilateur de transport du charbon pulvérisé vers les brûleurs

III – 1 – 1 – Ventilateurs de soufflage et de tirage

III – EVACUATION ET TRAITEMENT DES PRODUITS DE COMBUSTION

Quand la chaudière est en pression, le ventilateur de soufflage doit non seulement refouler l'air comburant jusqu'à la chambre de combustion, mais également assurer la circulation des gaz à travers tous les échangeurs de la chaudière jusqu'à la cheminée

Dans les chaudières en dépression, le rôle du ventilateur de soufflage se limite à vaincre les pertes de charge dans le réchauffeur d'air, les gaines d'air, l'équipement de chauffe ; la circulation des gaz brûlés est assurée depuis la chambre de combustion jusqu'à la cheminée par le ventilateur de tirage.

Le ventilateur de soufflage aspire l'air atmosphérique, le ventilateur de tirage refoule à la cheminée. Le ventilateur de soufflage fonctionne à la température ambiante, le ventilateur de tirage est à la température des gaz à la cheminée (150 à 20° C).

Le ventilateur de soufflage peut être dédoublé en ventilateur d'air primaire et en ventilateur d'air secondaire ; dans certains cas, il y a également un ventilateur d'air tertiaire (charbon pulvérisé cendrex).

2/- Dimensionnement

Soit :

- P_f : débit de gaz en kg/h à l'allure maxi,
- P_a : débit d'air
- ΔP_a : somme des pertes de charge dans les gaines d'air, le réchauffeur d'air, l'équipement de chauffe pour le débit P_a ,
- ΔP_f : somme des pertes de charge dans les vaporisateurs, surchauffeurs, resurchauffeurs, économiseurs, réchauffeur d'air (côté gaz) pour le débit P_f .
- Chaudières en dépression

Ventilateur de soufflage	Température	20°C	20°C	20°C
	Débit en kg/h	0,5 P_a	P_a	1,1 P_a
	Pression	$\Delta P_a / 4$	ΔP_a	$(1,1)^2 \Delta P_a$
Ventilateur de tirage	Température	180	200	210
	Débit	0,5 P_f	P_f	1,1 P_f
	Pression	$\Delta P_f / 4$	ΔP_f	$(1,1)^2 \Delta P_f$

- Chaudières en pression

Température	20°C	20°C	20°C
Débit	$P_a / 2$	P_a	1,1 P_a
Pression	$\frac{1}{4}(\Delta P_a + \Delta P_f)$	$(\Delta P_a + \Delta P_f)$	$1,1^2 (\Delta P_a + \Delta P_f)$

On dimensionne les ventilateurs avec une marge de 10% sur le débit et une marge de $(10\%)^2$ sur les pressions. Cette marge est indispensable pour garantir la production maximum de la chaudière en raison des incertitudes des calculs, et de l'encrassement des faisceaux.

3/- Technologie

Les ventilateurs de soufflage et de tirage sont soit du type centrifuge, soit du type hélicoïde, soit enfin du type hélico-centrifuge.

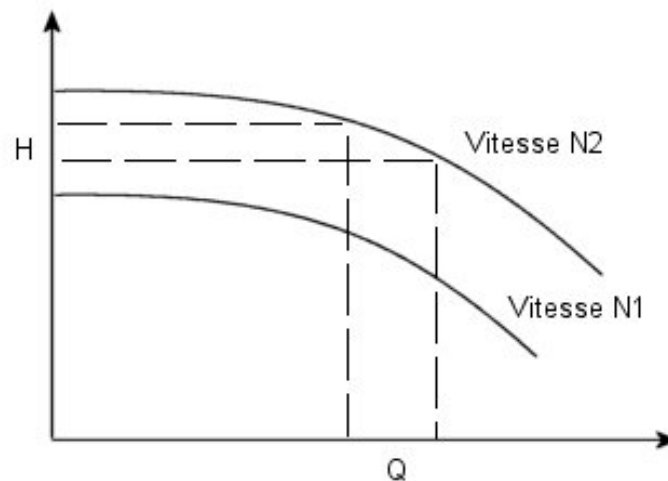
- Ventilateur centrifuge : aspiration axiale, refoulement radial,
- Ventilateur hélicoïdale : aspiration axiale, refoulement axial,
- Ventilateur hélico-centrifuge : intermédiaire entre les 2 types ci-dessus.

Les ventilateurs centrifuges conviennent pour des faibles débits et des pressions élevées ; les ventilateurs hélicoïdes sont utilisés pour les grands débits et les faibles pressions.

Le ventilateur peut être entraîné par un moteur électrique ou par une turbine.

Un récupérateur à l'échappement du ventilateur permet de récupérer une partie de la pression dynamique.

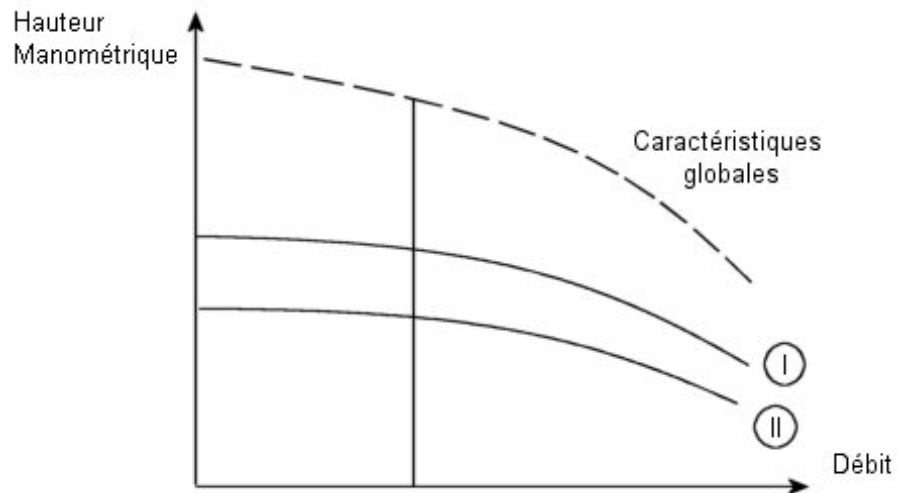
4/- Courbes caractéristiques



Plus la caractéristique est plate plus la variation de débit correspondant à une même variation ΔH de pression est importante. En raison des incertitudes sur les pertes de charge du circuit il est préférable d'avoir une caractéristique inclinée.

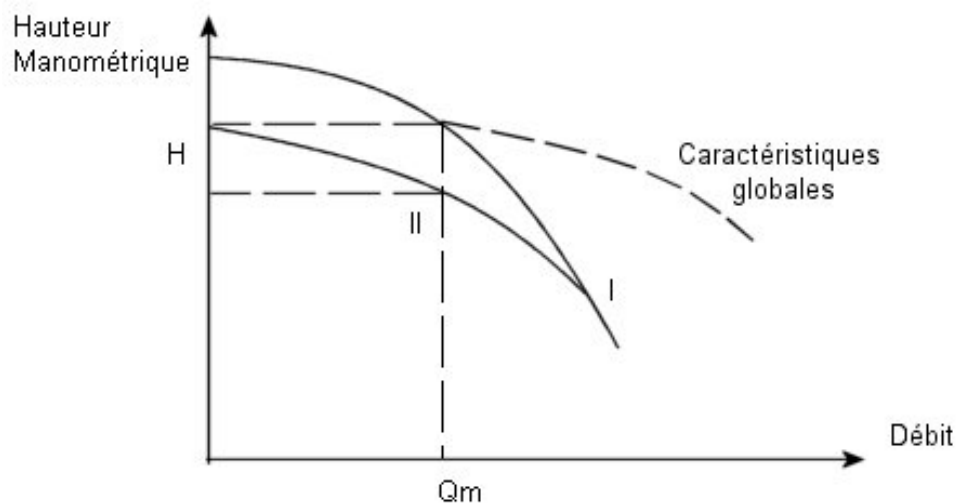
Les ventilateurs peuvent être couplés :

- en série :



- en parallèle :

Les ventilateurs fonctionnent à la même pression mais leurs débits s'ajoutent.

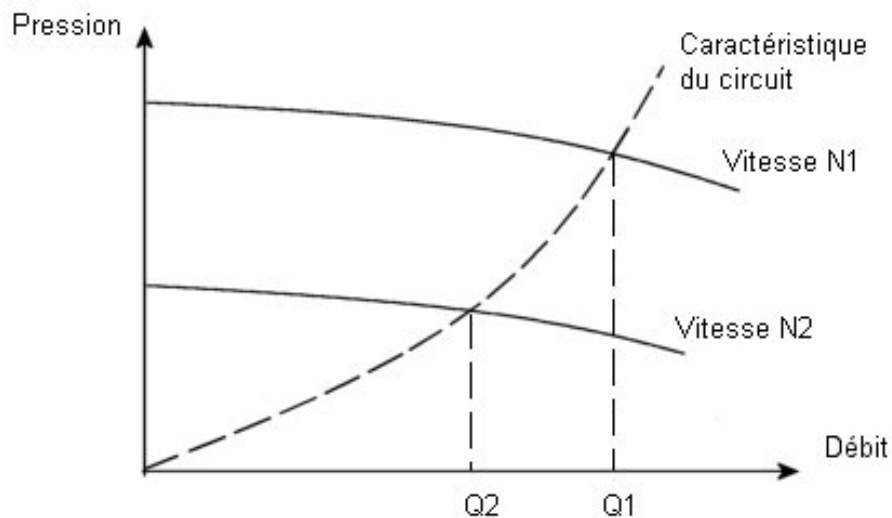


Si le débit total est inférieur à Q_m , seul le ventilateur (I) débite. Pour cette raison on couple en parallèle des ventilateurs identiques.

5/- Réglage du débit en fonction de la charge

Le débit peut être réglé de trois façons :

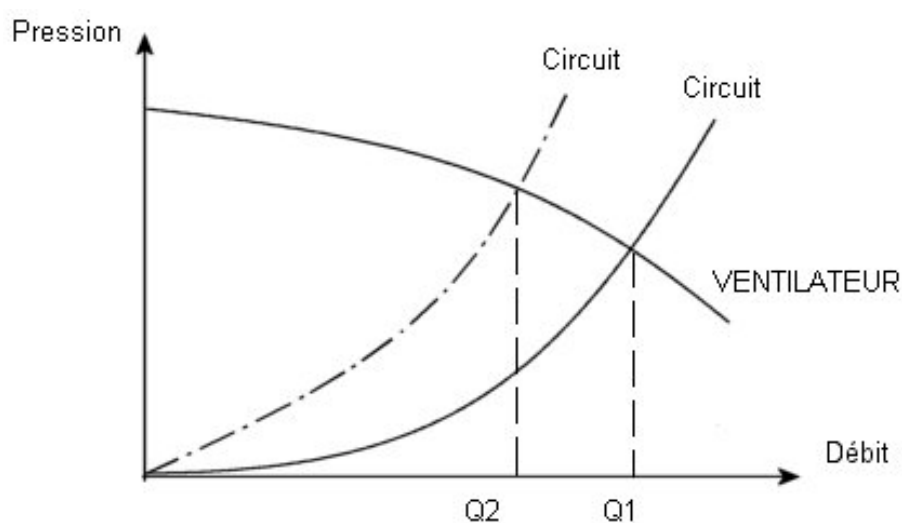
- **Variation de la vitesse d'entraînement du moteur**



Le variation de la vitesse est obtenue en utilisant par exemple un moteur asynchrone dont on fait varier l'intensité du courant dans le rotor ou en plaçant un coupleur hydraulique entre le moteur et le ventilateur.

- **Modification de la caractéristique du circuit résistant en faisant varier sa perte de charge**

Cette variation de perte de charge est obtenue en modifiant l'ouverture d'un registre placé dans les gaines de fumées.



- Modification de l'inclinaison des pales

Ne s'applique qu'aux ventilateurs hélicoïdes.

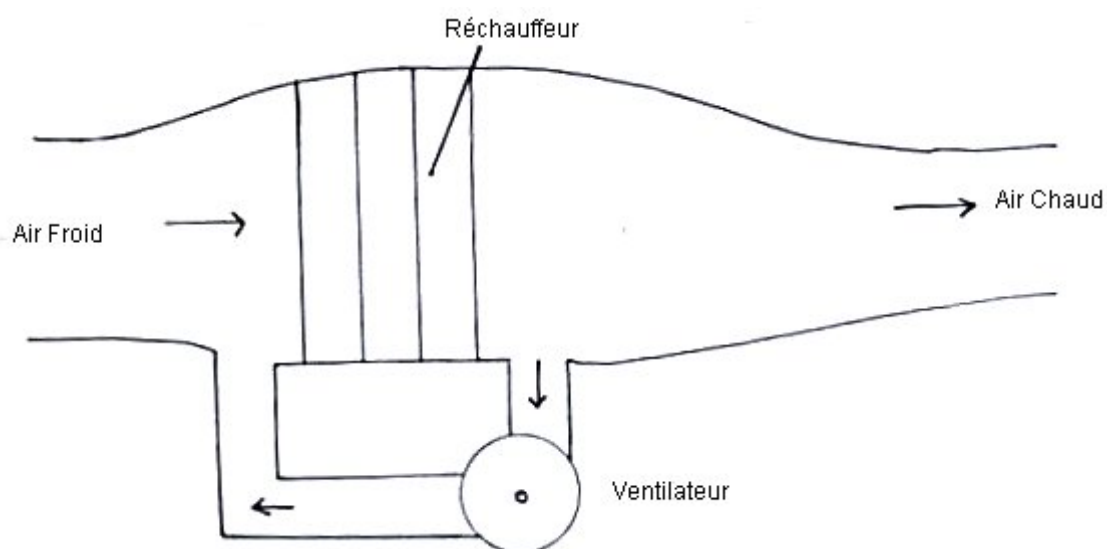
L'énergie consommée par les ventilateurs de soufflage et tirage est importante : 1 à 2% de l'énergie de la tranche.

III – 1 – 2 – Ventilateur de recyclage d'air

Le réchauffeur d'air étant sensible à la corrosion sulfurique, on a intérêt à relever la température de l'air à l'entrée de réchauffeur pour que la température du métal soit supérieure au point de rosée acide des fumées.

Ce réchauffage peut être obtenu en faisant passer le débit d'air dans un pré-réchauffeur à vapeur avant de l'envoyer dans le réchauffeur d'air.

Il peut également être obtenu en recyclant une partie de l'air réchauffé à la sortie du réchauffeur d'air vers l'entrée.



Contrairement au ventilateur de soufflage, le ventilateur de recyclage d'air est traversé par de l'air chaud (débit volume plus important qu'en air froid).

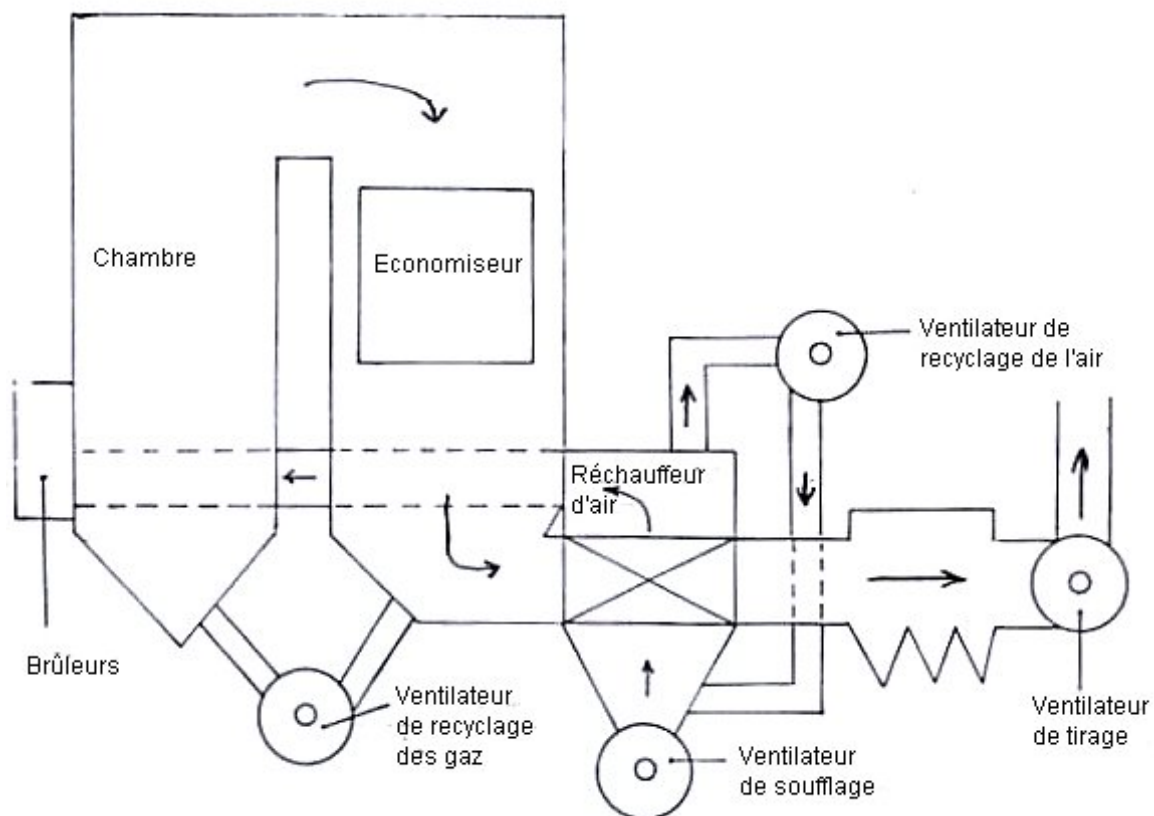
Le mélange d'air froid et d'air chaud n'est pas très homogène et il arrive que certaines parties du réchauffeur d'air soient en-dessous du point de rosée.

III – 1 – 3 – Ventilateur de recyclage des fumées

On a vu, en étudiant les différents modes de réglage de la température de surchauffe et de resurchauffe qu'un moyen d'augmenter ces températures était de renvoyer des gaz sortant de l'économiseur.

Des précautions particulières doivent être prises pour éviter que l'entraînement du ventilateur de recyclage ne s'arrête accidentellement, ou tout au moins pour isoler le ventilateur côté chambre en cas d'arrêt ; en effet, si un tel incident se produit, les gaz à plus de 1000°C de la chambre de combustion traversent le ventilateur et provoquent sa destruction.

III – 1 – 4 – Implantation des ventilateurs



III – 2 – LES RAMONEURS

III – 2 – 1 – Généralités

La combustion des charbons ou des fuels produit des résidus solides entraînés par les gaz dans les échangeurs de la chaudière. Ces résidus peuvent se déposer sur les tubes des faisceaux, et, suivant leur température et leur nature former des dépôts qui adhèrent fortement aux tubes. Il en résulte plusieurs inconvénients :

- le dépôt forme un isolant thermique et réduit l'échange de chaleur, d'où un rendement moins bon de chaudière,
- la section de passage des gaz à travers des tubes est diminuée et par conséquent, la perte de charge augmente, entraînant une augmentation de la puissance absorbée par le ventilateur et une réduction du débit qui peut aller jusqu'à une réduction de la puissance de la chaudière.

Le ramonage a pour but de décoller les dépôts formés sur les tubes pour qu'ils soient entraînés dans les gaz de combustion. Il est effectué par soufflage d'air comprimé ou de vapeur. Pour certaines parties de la chaudière (économiseur) ce soufflage peut être remplacé par un nettoyage mécanique, grenailage par exemple, ou par un lavage à l'eau.

Le ramonage est effectué périodiquement pendant le fonctionnement de la chaudière, la périodicité dépendant de la nature et de l'importance des dépôts.

III – 2 – 2 – Différents types de ramoneurs

Le fluide de soufflage est introduit dans des tubes :

- soit percés d'une ou plusieurs tuyères à leur extrémité : lance,
- soit percés d'une série de tuyères sur toute sa longueur : rampe.

Suivant la température qui règne dans la zone à nettoyer, les ramoneurs pourront être laissés en permanence dans les faisceaux (ramoneurs à tuyères multiples) ou au contraire introduits dans le faisceau au moment du ramonage seulement (ramoneurs rétractiles).

1/- Ramoneurs rétractiles

L'introduction de la rampe est effectuée par un moteur qui commande également sa rotation.

Quand la rampe est complètement engagée, le fluide est admis dans le ramoneur qui est soumis à un mouvement de rotation autour de son axe. Quand la rotation est

terminée, le fluide est coupé et la lance revient en arrière dans sa position de repos. Ce type de ramoneur est appelé « ramoneur à effacement ».

Dans les ramoneurs rétractiles proprement dits, le fluide est introduit dès que le ramoneur pénètre dans la chaudière. La zone balayée est plus importante que précédemment.

2/- Ramoneurs à tuyères multiples

La rampe de ces ramoneurs reste en permanence dans la zone à nettoyer. Pendant la période de nettoyage la rampe est animée d'un mouvement de rotation autour de son axe.

En général, on utilisera :

- les ramoneurs à effacement dans la chambre de combustion,
- les ramoneurs rétractiles dans les surchauffeurs et les resurchauffeurs ,
- les ramoneurs à tuyères multiples dans les autres faisceaux.

A titre indicatif, une chaudière de 770 t/h (palier 250 MW) comporte :

- 20 ramoneurs à effacement dans la chambre,
- 32 ramoneurs rétractiles dans les surchauffeurs et resurchauffeurs,
- 8 ramoneurs à tuyères multiples pour les économiseurs.

III – 2 – 3 – Commande des ramoneurs

Le fluide de ramonage peut être, soit de l'air comprimé fourni par un compresseur à 20-30 bars, soit de la vapeur à 15-20 bars.

La commande des ramoneurs est effectuée depuis la salle de commande suivant une séquence déterminée. Un seul ramoneur fonctionne à la fois.

III – 2 – 4 – Nettoyage par grenailage

On fait tomber en pluie de la grenailage de fonte de 6 à 8 mm sur les tubes à nettoyer. La grenailage et les dépôts détachés tombent à la partie inférieure de l'échangeur sur des tôles déflectrices ; les dépôts sont entraînés en partie par les gaz de combustion vers la dépollueur.

La grenaille et les dépôts les plus lourds s'écoulent sur une tôle inclinée ; en roulant la grenaille se débarrasse des dépôts adhérents qui sont réentraînés par un courant d'air

III – 3 – LES DÉPOUSSIÉREURS

III – 3 – 1 – Généralités

La pollution par les poussières contenues dans les gaz de combustion peut être réduite par l'emploi de cheminées de grande hauteur et de dépoussiéreurs.

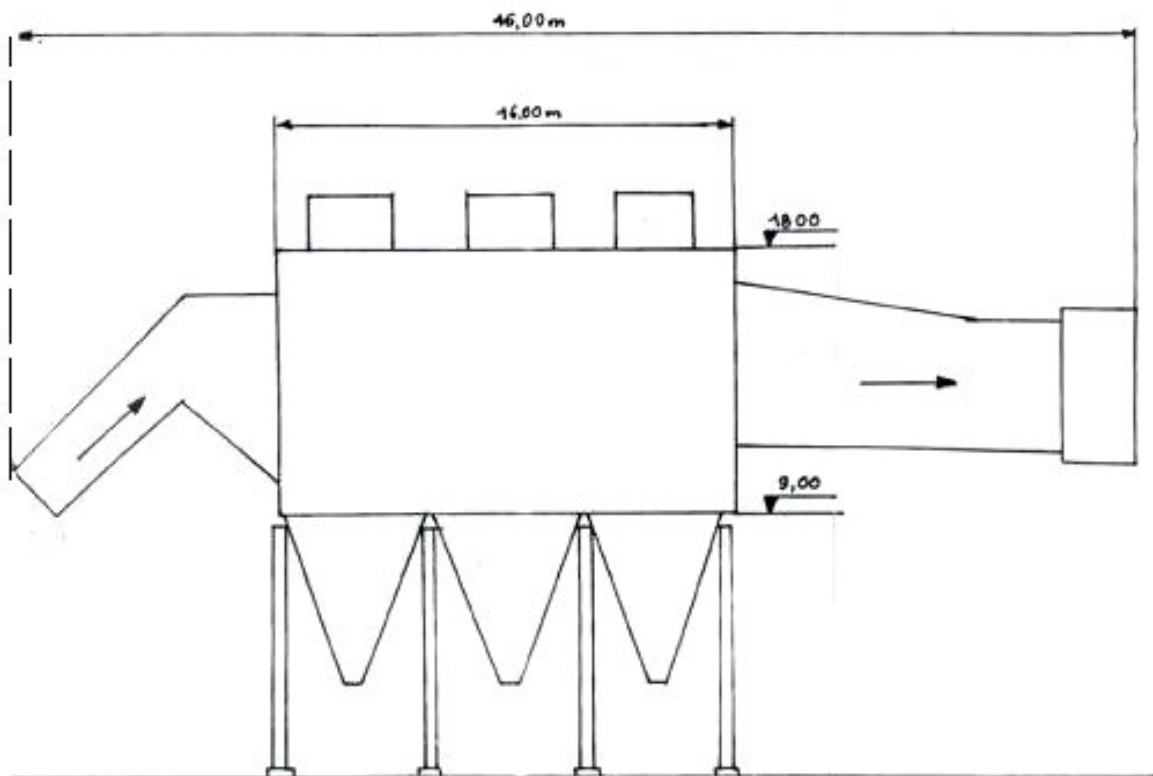
Les cheminées jouent un rôle important dans la pollution atmosphérique. Les gaz rejetés sont d'autant mieux dispersés que la cheminée est plus haute, que les gaz s'en échappent à grande vitesse (supérieure à 9 m/s) et que leur température est plus élevée. C'est ainsi que les centrales construites depuis moins de 20 ans comportent des cheminées de 120 mètres de haut d'où les gaz s'échappent à 20 m/s à pleine charge. Pour les centrales récentes au charbon, ces hauteurs sont encore plus importantes : 240 m pour la Centrale 600 MW du Havre.

Les centrales ont déversé en 1967 42000 tonnes de poussières sur l'ensemble du pays. Ces 42000 tonnes représentent moins de 5% de la quantité totale des poussières produite par l'ensemble de l'industrie.

Pour une tranche de 600 MW consommant 220 t/h de charbon à 20% de cendres, la quantité de cendres produite journalièrement est de 44 x 24, soit environ 1000 tonnes, dont 200 tonnes sont récupérées au foyer et 800 tonnes arrivent au dépoussiéreur. Si celui-ci a un rendement de 99% il reste encore 8 tonnes/jour soit près de 3000 tonnes par an qui sont envoyées à l'atmosphère

Encombrement d'un dépoussiéreur

Ex. : Centrale de 250 MW



ENCOMBREMENT DU DEPOUSSEIEREUR

III – 3 – 2 – Les différents types de dépoussiéreurs mécaniques

1/- Les dépoussiéreurs mécaniques

Ces dépoussiéreurs, quel que soit leur type, ont un fonctionnement basé sur la différence de poids spécifiques entre les particules de poussière et les gaz.

On distingue trois types :

- Les appareils à gravité

Ils sont constitués par des chambres de décantation au fond desquelles se déposent les poussières sous le seul effet de la pesanteur.

- Les appareils à inertie

La séparation est obtenue en faisant subir au gaz poussiéreux de brusques changements de direction au cours desquels les poussières se séparent par inertie.

- Les appareils à centrifugation

Ce sont des appareils multicyclônes dans lesquels les gaz sont soumis à des mouvement tourbillonnaires ; sous l'effet de la force centrifuge les particules sont projetées sur les parois et les gaz s'écoulent dans l'axe des cyclônes.

2/- Les dépoussiéreurs poreux

Ce sont des filtres (étoffes, papier ...) qui retiennent les poussières.

3/- Les dépoussiéreurs laveurs

Dans ces appareils, les gaz chargés de poussières sont mis au contact d'eau qui agglomère les poussières sous forme de boues.

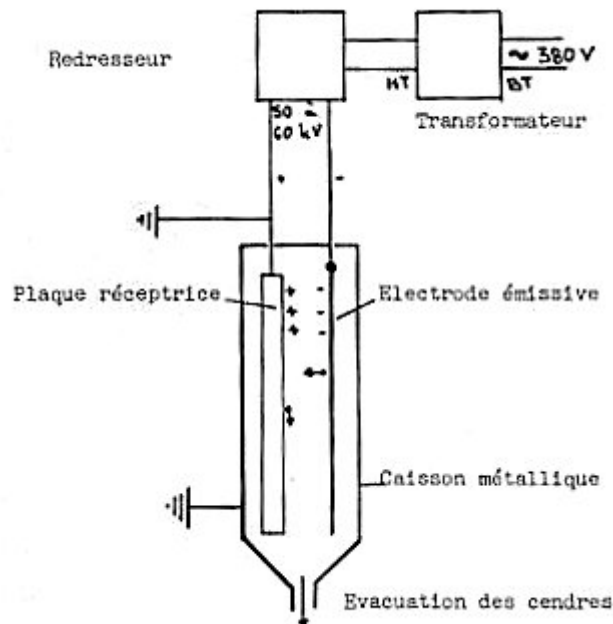
Le contact peut être réalisé par léchage de films qui ruissellent dans des chambres ou par ou par pulvérisation d'eau dans les gaz.

4/- Dépoussiéreurs électrostatiques

Les poussières sont ionisées en traversant un champ électrique de 50 à 60 kV et se déposent sur une électrode où elles se déchargent électriquement.

Elles tombent ensuite dans le fond sous l'effet de chocs ou de vibrations périodiques sur les électrodes.

4/- Principe



L'électrode émissive provoque l'électrisation des particules de cendres par « effet couronne ». les particules sont alors attirées par l'électrode réceptrice sur laquelle elles se déposent.

Les vitesses de gaz doivent être modérées, de l'ordre de 1,5 m/s. les dépoussiéreurs sont constitués de plusieurs étages de dépoussiérage.

Pour une tranche de 250 MW le volume du dépoussiéreur est d'environ 3000 m³, la longueur totale d'électrodes émissives est de 70 km.

III – 3 – 3 – Caractéristiques des dépoussiéreurs

Le rendement des dépoussiéreurs mécaniques est de 85 à 90% ; avec les dépoussiéreurs électrostatiques on atteint des rendements supérieurs à 98%. C'est ainsi que pour une tranche de 250 MW au charbon, consommant 95 t/h de charbon, les gaz de combustion contiennent 17 à 19 t/h de cendres ; les gaz s'échappant à la cheminée n'en contiennent plus que 150 à 200 kg/h.

Le rendement des dépoussiéreurs mécaniques augmente avec la charge ; c'est le contraire pour le dépoussiéreur électrostatique.

III – 4 – POSTES DE PRÉPARATION DES COMBUSTIBLES

III – 4 – 1 – Préparation des combustibles solides

Dans le cas de la combustion du charbon sur grille, il n'y a pas de préparation spéciale du combustible qui est introduit directement sur la grille par une trémie de chargement. Par contre dans le cas d'une chauffe au charbon pulvérisé, il est nécessaire de disposer d'une installation de broyage. Cette installation devra permettre d'obtenir la finesse de grain désirée en consommant le minimum d'énergie et avec les frais d'entretien les plus réduits possibles.

Pour une quantité de charbon à broyer déterminée la consommation d'énergie dépend :

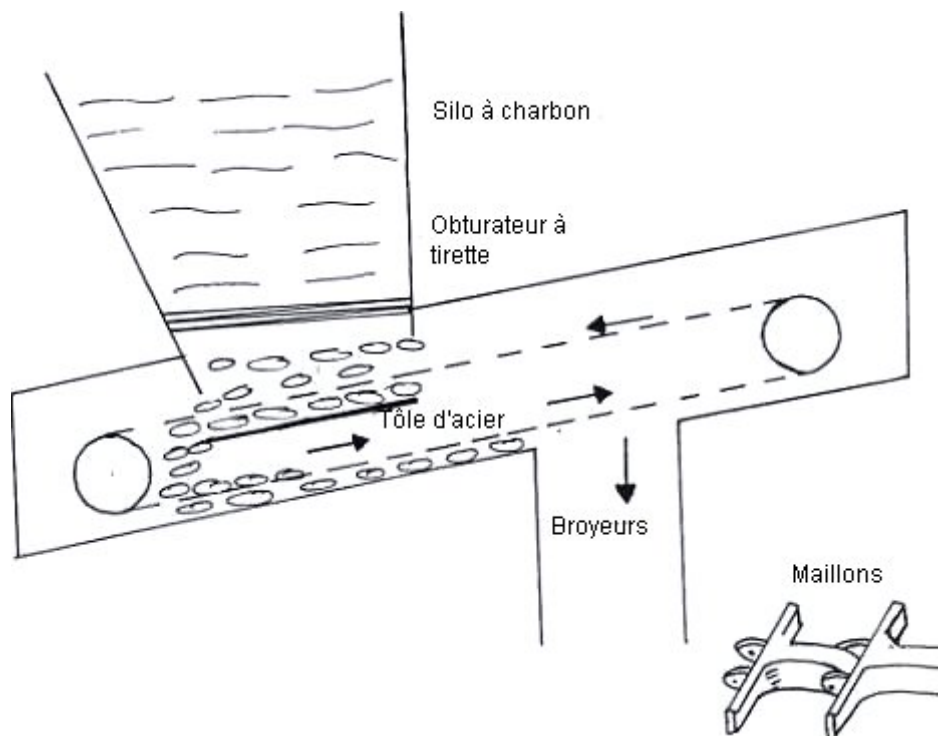
- du type de broyeur,
- de la qualité du charbon (dimensions du brut – fiabilité)
- de la finesse désirée,
- de l'humidité du charbon : au delà de 8% d'humidité, le broyage est impossible.

Les frais d'entretien des broyeurs résultent surtout des usures des pièces servant au broyage. Cette usure est d'autant plus importante que le charbon est plus abrasif et elle coûte d'autant plus cher que les pièces à remplacer sont plus chères ; certains broyeurs dont les dépenses de consommation sont plus élevées peuvent mieux convenir à des charbons abrasifs car les dépenses d'entretien sont moins importantes.

1/- Installations de broyage

une installation de broyage comporte essentiellement :

- une alimentation en charbon brut, en général par transporteur entraîné par un moteur et dont on règle la vitesse pour régler le débit de charbon. Le transporteur est constitué par une chaîne dont chaque brin forme raclette.



Le charbon est séché par soufflage d'air chaud pour que son humidité soit inférieure à 1%.

Il faut éviter toutefois une température trop élevée à laquelle les matières volatiles s'enflammeraient. en général, la température de réchauffage est comprise entre 70 et 110°C.

- les broyeurs proprement dits

Broyeurs à billes dans lesquels le charbon est écrasé entre des billes et un chemin de roulement.

Broyeurs à galets pendulaires dans lesquels le charbon est écrasé entre une cuve mobile et des galets.

Broyeurs à boulets constitués d'un cylindre horizontal tournant autour de son axe dans lequel sont placés le charbon et les boulets. Consommation importante mais frais d'entretien réduits.

- Transport du charbon pulvérisé

Le charbon pulvérisé est emporté du broyeur par l'air primaire. Le ventilateur d'air primaire peut être à l'amont ou à l'aval du broyeur :

- à l'amont :

Le broyeur est en pression, il peut y avoir des fuites de charbon pulvérisé vers l'extérieur.

- à l'aval :

Le broyeur est en dépression, les fuites ne sont plus à craindre, par contre le ventilateur est traversé par le mélange air charbon et s'use rapidement.

III – 4 – 2 – Préparation des combustibles liquides

Pour assurer un pompage et un transport convenable du fuel, il est nécessaire que sa viscosité ne dépasse pas certaines limites. La viscosité peut être réduite en réchauffant le fuel.

Les fuels domestiques et les fuels légers ne nécessitent pas de réchauffage. Celui-ci est indispensable par contre pour les fuels lourds.

Par ailleurs, pour obtenir une bonne pulvérisation dans les brûleurs, il est nécessaire de réduire encore la viscosité en effectuant un deuxième réchauffage.

Le réchauffage peut être effectué à la vapeur ; pour les démarrages, quand on ne dispose pas de vapeur, on utilise des réchauffeurs électriques.

Le poste de préparation comporte, outre les réchauffeurs, des filtres, des pompes pour mise en pression, des régulations de pression et de débit, des compteurs ; ces différents éléments sont le plus souvent multiples pour éviter un arrêt dû à la défaillance de l'un d'entre eux.

III – 4 – 3 – Préparation des combustibles gazeux

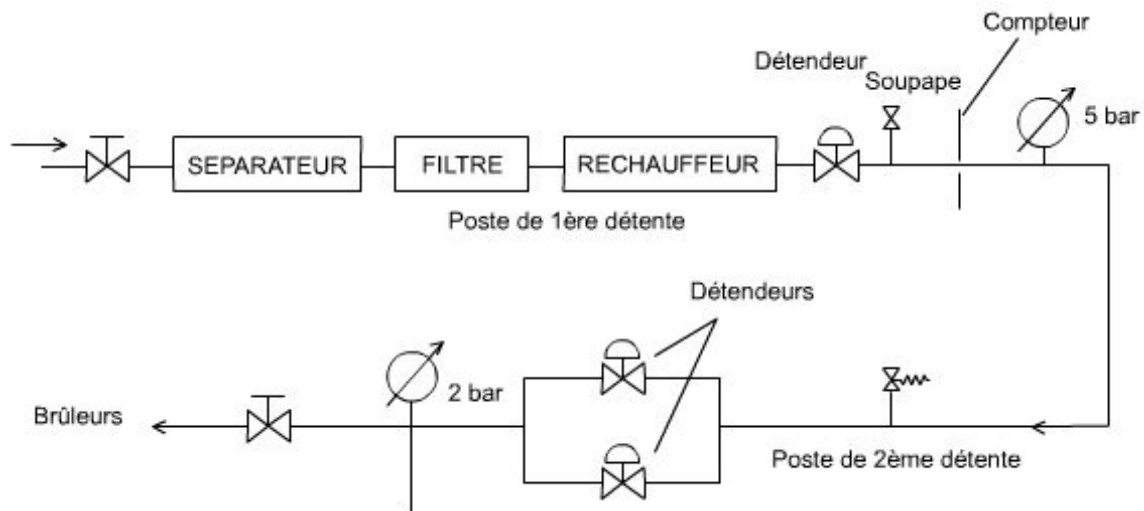
Le gaz arrivant à la centrale se trouve à une pression variable. Pour être brûlé, il doit être détendu, soit dans une turbine pour récupérer l'énergie de la détente, soit dans un détendeur classique sans récupération d'énergie. L'utilisation d'une turbine ne peut s'envisager que si le gaz est livré à la centrale à pression relativement constante.

En général, la détente se fait dans plusieurs détendeurs successifs.

- détente jusqu'à environ 5 bars,
- transport du gaz à 5 bars vers la chaudière,

- détente de 5 à 2 bars sur chaque générateur.

Un réchauffeur est installé avant la première détente. Il permet, quand la pression est élevée, d'éviter le givrage des appareils après la première détente.



Les pressions dans les différents tronçons du circuit ne doivent pas dépasser des valeurs maximales en cas de défaillance des détendeurs, des soupapes de sûreté sont obligatoires.

Des sécurités permettent de couper l'arrivée de gaz aux brûleurs en cas d'incident :

- manque de ventilation,
- pression de gaz trop élevée,
- extinction de la flamme.

Des précautions particulières sont à prendre au redémarrage de l'installation après un arrêt prolongé ; en effet, le gaz forme avec l'air un mélange détonnant quand la proportion de gaz dans l'air est d'environ 5%. Il est nécessaire de purger soigneusement les circuits de gaz avant de procéder à l'allumage des brûleurs.

IV – 1 – PRINCIPES D’ALIMENTATION EN EAU DE LA CHAUDIÈRE

Afin de compenser la diminution du volume d’eau contenue dans la chaudière due à la production de la vapeur, le remplissage de la chaudière doit se faire d’une façon automatique.

Le décret du 2 avril 1926 précise dans ses articles 14 et 15 :

ARTICLE 14

« Toute paroi en contact par une de ses faces avec la flamme ou les gaz de combustion (fumées) doit être baignée par l’eau sur sa face opposée.

Le niveau doit être maintenu en toute circonstance à 6 cm au moins au-dessus du plan pour lequel la condition précédente cesserait d’être remplie. »

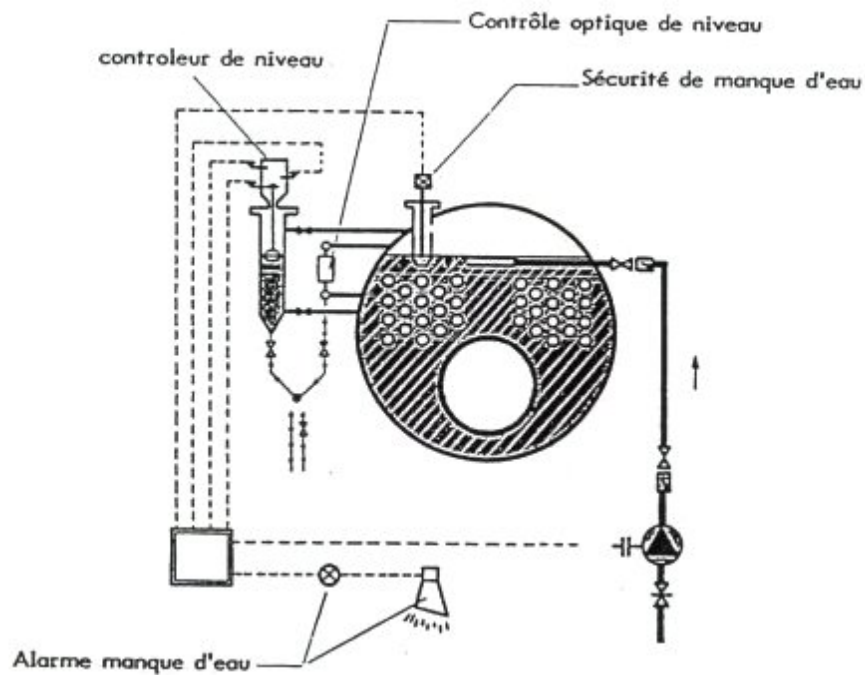
ARTICLE 15

« Chaque chaudière est munie de 2 appareils indicateurs indépendants l’un de l’autre. »

IV – ALIMENTATION EN EAU DE LA CHAUDIÈRE

ALIMENTATION AUTOMATIQUE D'UNE CHAUDIÈRE

Chaque conduite d'alimentation d'une chaudière doit être munie d'un appareil de retenue ou clapet, fonctionnant automatiquement, placé aussi près que possible du point d'insertion de la conduite sur la chaudière.



SCHEMA DE PRINCIPE D'ALIMENTATION EN EAU

IV – 2 – CONTRÔLE DE NIVEAU

Le maintien d'un niveau normal en chaudière doit être la préoccupation première du conducteur. La sécurité du matériel et du personnel en dépend en grande partie. Il ne doit pas y avoir de doute sur le niveau, quel que soit le moyen de contrôle.

Le dépassement des niveaux limites de l'eau dans une chaudière, peut avoir de très graves conséquences, surtout lorsque ce dépassement concerne la limite inférieure de niveau. Le niveau doit se maintenir dans les limites niveau haut – niveau bas.

En général, il est maintenu légèrement au-dessus du plan diamétral du ballon, pour les chaudières à ballon.

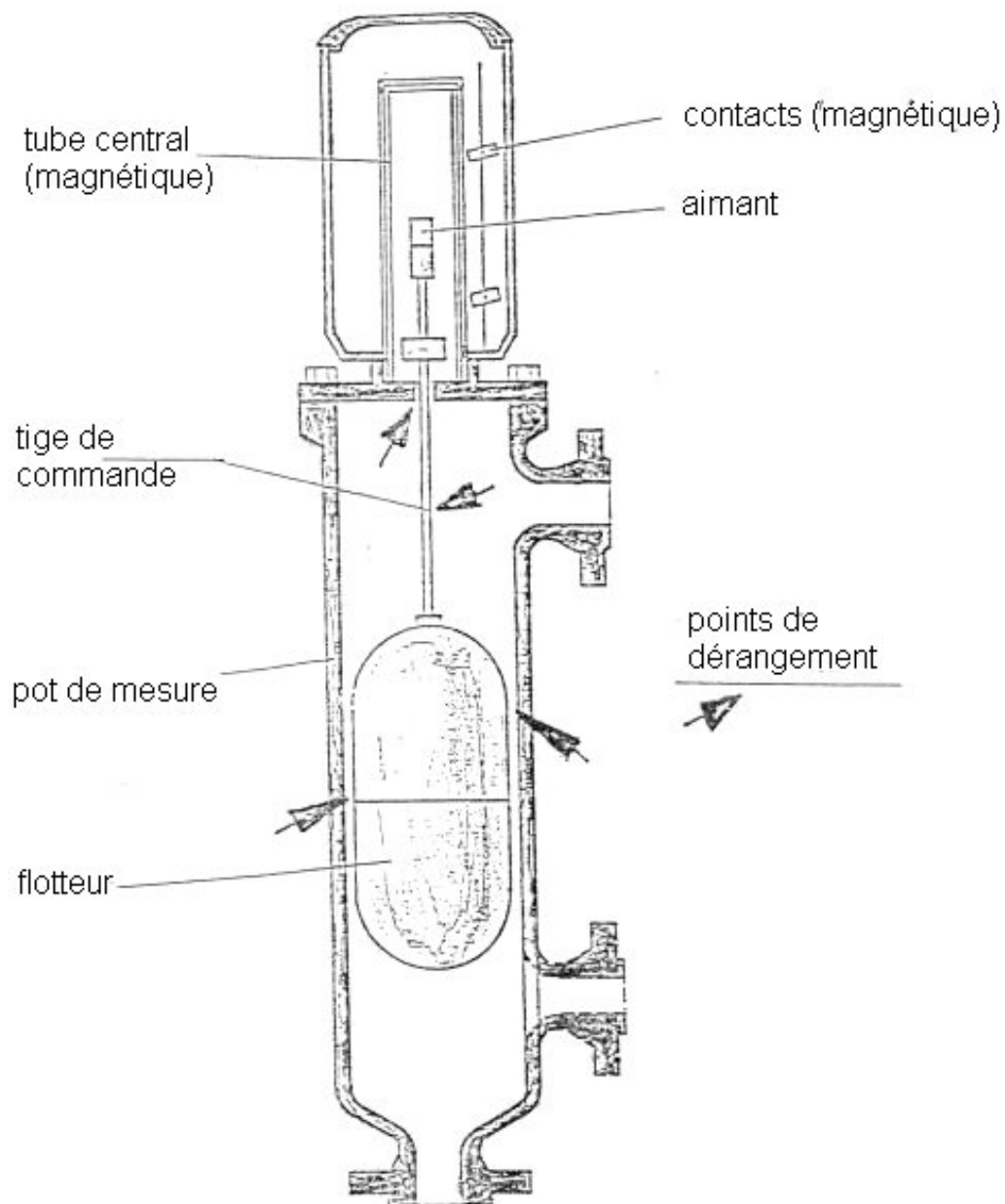
Dans les montures à glace, le niveau doit apparaître légèrement mobile, se méfier d'un niveau parfaitement stable : ce pourrait être l'indice que l'une des communications de la monture avec la chaudière est obstruée.

Dans les deux cas, le niveau peut varier brusquement sans qu'il y ait anomalie :

- appel brusque de vapeur : le niveau monte (gonflement)
- arrêt brusque de l'appel de vapeur : le niveau descend (tassement)

Dans les deux cas, le niveau normal se rétablit assez rapidement.

PRINCIPES DE MESURE POUR LE NIVEAU



MESURE entre 2 points PAR FLOTTEUR

IV – 3 – TRAITEMENT DES EAUX D’ALIMENTATION

L’eau alimentaire et l’eau de la chaudière jouent un rôle déterminant pour le bon fonctionnement et la longévité de tout générateur à vapeur.

Un traitement d’eau rigoureux est une exigence de base pour une exploitation sans risque.

Il faudra procéder aux différents traitements des eaux suivants :

- décarbonatation,
- adoucissement,
- dégazage.

En plus des risques classiques d’entartrage et de corrosion, il faut limiter le primage (entraînement de fines particules d’eau dans la chaudière par la vapeur).

Il faut donc conditionner l’eau . Pour de plus amples informations, se référer au module « traitement des eaux ».

PURGE DES INSTALLATIONS

Une grande partie des produits nécessaires à la préparation de l’eau n’est pas entraînée par la vapeur et reste dans la chaudière.

Afin de limiter la concentration de ces produits dans le générateur, on doit effectuer des purges ponctuelles ou continues.

CALCUL DES PURGES

Le pourcentage des purges en chaudières est définie :

- par le taux de concentration admissible (voir fournisseur)
- par la minéralisation de l’eau d’alimentation.

DÉGAZAGE DE L’EAU D’ALIMENTATION DES CHAUDIÈRES

Les chaudières à vapeur consomment une grande quantité d’eau.

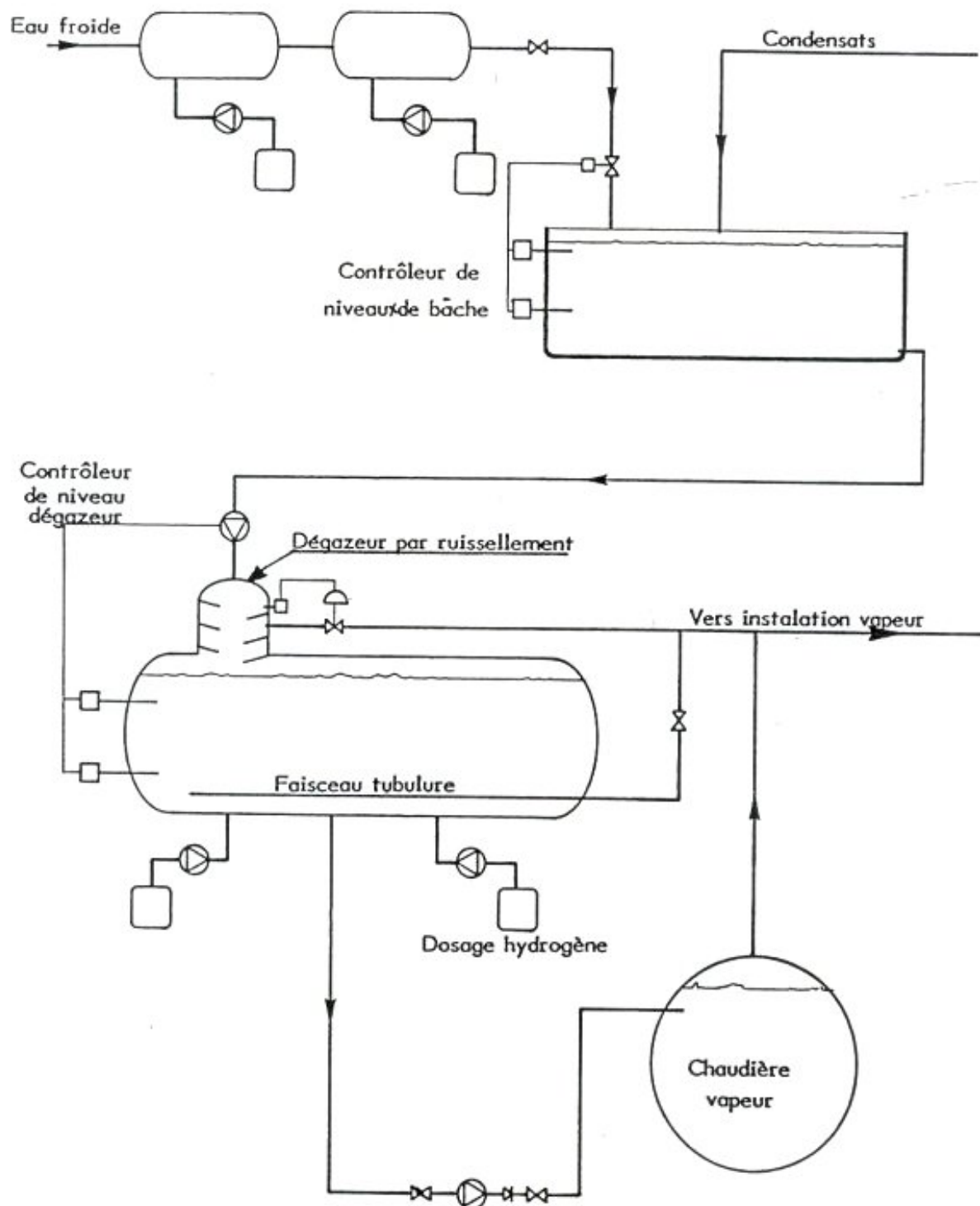
De même, une partie des condensats peut s’oxygéner dans les réseaux de récupération.

Afin d'éliminer au maximum l'air contenu dans l'eau d'appoint des chaudières, on traite celle-ci dans un dégazeur thermique.

Cet appareil se compose d'un cylindre dans lequel un injecteur à vapeur crée un vide partiel.

L'eau qui provient de la bêche roule en cascade à la partie supérieure de l'appareil où elle subit un dégazage partiel, puis elle tombe sur un faisceau tubulaire chauffé par de la vapeur prélevée sur la chaudière. Ce dernier dispositif permet d'augmenter le dégazage de l'eau.

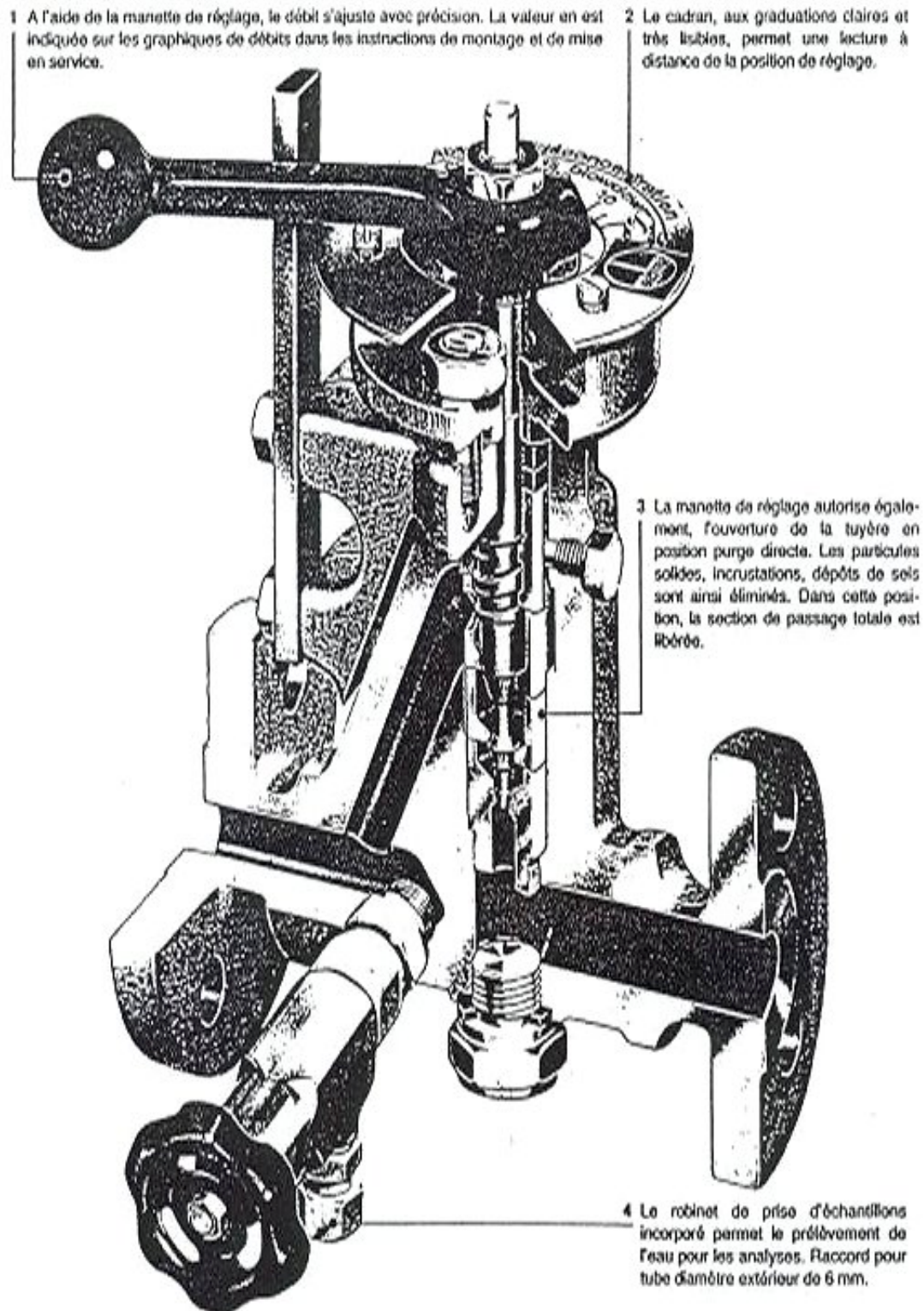
SCHEMA DE DÉCARBONATATION, ADOUCISSEMENT, DEGAZAGE



• DÉCONCENTRATION CONTINUE

**Construction et fonctionnement des soupapes de déconcentration continue
GESTRA Réactomats**

La vue montre le type BA 26, PN 40, DN 15-40



•

Module :
CHAUDIERES A VAPEUR
GUIDE DES TRAVAUX PRATIQUES

I. TP 1 :

I. 1. Objectif(s) visé(s) :

Simulateur chaudière avec contrôle et génération de pannes.

I. 2. Durée du TP :

12 heures

I. 3. Matériel (équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Equipement :

- Corps de chaudière en acrylique transparent
 - Tableau électrique de commande
 - Brûleur mixte gasoil/gaz
- Réservoir, pompe et équipement auxiliaires du groupe

b) Matière d'œuvre :

- Eau
- Electricité

I. 4. Description du TP :

*Le stagiaire doit : - identifier le rôle de chaque composant du groupe
- rechercher la panne qui permet au groupe de
fonctionner normalement*

I. 5. Déroulement du TP :

Ces travaux pratiques doivent être faites par 3 ou 4 stagiaires.

I. TP 2 :

I. 1. Objectif(s) visé(s) :

Conduite d'une chaudière à vapeur

- chaudière à tubes de fumées
- chaudière à tubes d'eau

I. 2. Durée du TP :

12 heures

I. 3. Matériel (équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Equipement :

- Chaudière à tubes de fumées dans l'atelier
- Chaudière à tubes d'eau dans l'atelier
- Equipements périphériques
- Outillage divers

b) Matière d'œuvre :

- Gasoil
- Sel marin

I. 4. Description du TP :

Le stagiaire doit :

- faire la conduite de la chaudière
- faire le dépannage d'une chaudière réelle

I. 5. Déroulement du TP :

Ces travaux pratiques doivent être faite par 6 stagiaires.

Evaluation de fin de module

Travail demandé (3 heures)

- *Faire la description d'une chaudière à tubes de fumées*
 - 1- *Constituants principaux et architecture générale*
 - 2- *Chaudronnerie*
 - 3- *Matériaux isolants – calorifuge*
- *Décrire par un schéma comment se fait l'alimentation en eau et le contrôle de niveau d'une chaudière à vapeur à tubes de fumées*

Liste de référence bibliographique

Ouvrage	Auteur	Edition
Chaufferies	Citech	
Chauffage	AFPA	
Chaudières	Projet C.E.M	