

4/95

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**DIMENSIONNEMENT D'UNE USINE
D'INCINERATION DE DECHETS
MENAGERS AVEC RECUPERATION
D'ENERGIE**

Proposé par :
Mr. H. BENNOUR

Etudié par :
Mr A. BENKENIDA

Dirigé par :
Mr H. BENNOUR

PROMOTION
JUILLET 1995

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**DIMENSIONNEMENT D'UNE USINE
D'INCINERATION DE DECHETS
MENAGERS AVEC RECUPERATION
D'ENERGIE**

Proposé par :

Mr. H. BENNOUR

Etudié par :

Mr A. BENKENIDA

Dirigé par :

Mr H. BENNOUR

PROMOTION

JUILLET 1995

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A mes très chers parents

Pour tous les sacrifices, sans lesquels ce travail n'aurait pas vu le jour.

A mon frère Boubakeur

A mes frères et ma soeur

A toute ma famille

A tous mes amis

Puissent-ils trouver un humble témoignage de ma profonde gratitude

A. BENKENIDA.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur Mr. H. BENNOUR pour son aide permanente et ses encouragements qu'il m'a prodigués durant tout ce travail.

Je saisis cette opportunité, pour exprimer mes remerciements les plus sincères à Mrs. Y. BELKACEMI, Y. HALLI et S. LARBI pour l'aide qu'ils m'ont offerte.

Que Mr. A. GUIRAA trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour ces précieux conseils et critiques.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres du jury pour m'avoir honoré en acceptant de juger ce modeste travail.

Qu'il me soit enfin permis, de témoigner ma reconnaissance à tout le personnel de la bibliothèque, spécialement Sabina des périodiques, Salah, Krimou, Karim ; ainsi que tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ce travail.

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد مختلف أبعاد محطة لحرق النفايات الحضرية مزودة بمولد للبخار الساخن. يوجه هذا الأخير بعد مروره عبر غرفة بخارية، لتوليد الطاقة الكهربائية من جهة ولإعطائه درجة حرارة وضغط محددين من جهة أخرى، إلى مصنع للورق وشبكة للتسخين الحضري.

Résumé

Ce travail a pour objet le dimensionnement d'une usine d'incinération de déchets ménagers combinée avec une chaudière qui génère de la vapeur d'eau surchauffée. Cette dernière et après une détente dans une turbine à contre-pression alimentera une usine de production de papier et un réseau de chauffage urbain, et contribuera à la production d'énergie électrique.

Abstract

This work aims at dimensioning an incineration factory combined with a boiler. The steam generated will feed a paper-manufacturing and a heating device, after passing through a turbine, when it contributes to produce electricity.

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I

GENERALITES

I.1. LES DECHETS MENAGERS 3

I.1.1. LE DECHET - DEFINITION REGLEMENTAIRE 3

- DECHETS INDUSTRIELS 3

- ORDURES MENAGERES 3

I.1.2. QUANTITES DES ORDURES MENAGERES 4

I.1.3. CARACTERISTIQUES DES ORDURES MENAGERES 5

I.1.3.1. COMPOSITION 5

I.1.3.2. CLASSIFICATION 5

I.1.3.3. VALORISATION DES ORDURES MENAGERES 5

I.1.3.3.1. DENSITE 6

I.1.3.3.2. DEGRE D'HUMIDITE 6

I.1.3.3.3. POUVOIR CALORIFIQUE 6

I.1.3.3.4. RAPPORT CARBONE/AZOTE (C/N) 7

I.1.4. EVOLUTION DES ORDURES MENAGERES 7

I.2. LES MODES DE TRAITEMENT 7

I.2.1. INTRODUCTION 7

I.2.2. LA MISE EN DECHARGE 8

I.2.3. LE COMPOSTAGE 9

I.2.4. L'INCINERATION 12

CHAPITRE II

L'USINE D'INCINERATION

II.1. CONSIDERATIONS GENERALES 14

II.2. DIMENSIONNEMENT DE L'USINE D'INCINERATION 15

II.2.1. FOSSE DE RECEPTION	15
II.2.1.1. DEFINITIONS	15
II.2.1.2. DIMENSIONNEMENT	16
II.2.1.3. CONSIDERATIONS TECHNIQUES	17
II.2.2. PONTS ROULANTS	18
II.2.2.1. DIMENSIONNEMENT	19
A/ MOUVEMENT DE LEVAGE	20
B/ CRITERES DE CHOIX POUR LE MOUVEMENT DE LEVAGE	
D'UN PALAN	21
B.1. Groupes des mécanismes	21
B.2. Capacité de charge	22
B.3. Vitesse de levage	22
B.4. Course verticale de la benne	22
B.5. Facteur de marche	23
B.6. Conditions de service	23
C/ MOUVEMENT DE DIRECTION	23
D/ CRITERES DE CHOIX POUR LE MOUVEMENT DE DIRECTION	24
E/ MOUVEMENT DE TRANSLATION	24
F/ CRITERES DE CHOIX POUR LE MOUVEMENT DE TRANSLATION	27
G/ CYCLE DE CHARGEMENT	27
II.2.3. FOURS	29
II.2.3.1. DESCRIPTION GENERALE	29
A/ GRILLE ET ANNEXES	29
B/ CHAMBRE DE COMBUSTION	30
II.2.3.2. DIMENSIONNEMENT	30

CHAPITRE III

LES CHAUDIERES A VAPEUR

III.1. INTRODUCTION	32
III.2. CALCUL PRELIMINAIRE	32
III.2.1. VOLUME D'AIR THEORIQUE	32
III.2.2. EXCES D'AIR	33
III.2.3. VOLUME DES FUMÉES	34

III.2.4. COMPOSITION DES FUMÉES	34
III.3. CONSTITUTION DE LA CHAUDIERE A VAPEUR	36
A/ LES ECRANS D'EAU	36
B/ LE SURCHAUFFEUR	36
C/ LE FAISCEAU VAPORISATEUR	36
D/ L'ECONOMISEUR	36
E/ LE RECHAUFFEUR D'AIR	37
III.4. EVALUATION DES PERTES DE PRESSION	38
III.5. TAUX DE PRODUCTION DE VAPEUR	39
III.6. LES ECRANS D'EAU	39
III.6.1. TEMPERATURE DE SORTIE DES FUMÉES	39
III.6.2. HAUTEUR DES TUBES ET SURFACE D'ÉCHANGE	40
III.6.3. COEFFICIENT DE TRANSMISSION GLOBAL	41
III.7. LE SURCHAUFFEUR	43
III.7.1. TEMPERATURE DE SORTIE DES FUMÉES	43
III.7.2. NOMBRE DE TUBES	43
III.7.3. DIAMETRE ET LONGUEUR DES COLLECTEURS	44
III.7.4. COEFFICIENT DE TRANSMISSION GLOBAL	45
III.7.5. SURFACE D'ÉCHANGE DE CHALEUR TOTALE	52
III.7.6. NOMBRE DE NAPPES ET LONGUEUR DU SURCHAUFFEUR	52
III.8. LE FAISCEAU EVAPORATEUR	53
III.8.1. TEMPERATURE DES FUMÉES	53
III.8.2. SURFACE D'ÉCHANGE TOTALE	54
III.8.3. BALLONS	55
III.9. L'ECONOMISEUR	55
III.9.1. TEMPERATURE DES FUMÉES	56

III.9.2. NOMBRE DE TUBES	56
III.9.3. SURFACE D'ECHANGE TOTALE	57
III.9.4. LONGUEUR UNITAIRE ET NOMBRE DE COUCHES	57
III.10. LE RECHAUFFEUR D'AIR	58
III.10.1. QUANTITE DE CHALEUR ECHANGEE	59
III.10.2. SURFACE D'ECHANGE TOTALE	59
III.10.3. NOMBRE ET LONGUEUR DES TUBES	59

CHAPITRE IV

LES DEPOUSSIERS ET LE CIRCUIT DES FUMES

IV.1. DEPOUSSIERS	61
IV.1.1. INTRODUCTION	61
IV.1.2. TECHNIQUES DE DEPOUSSIERAGE	61
IV.1.2.1. SEPARATEURS MECANQUES	61
IV.1.2.2. DEPOUSSIERS HUMIDES OU LAVEURS	62
IV.1.2.3. SEPARATEURS A COUCHE FILTRANTE	63
IV.1.2.4. SEPARATEURS ELECTRIQUES OU ELECTROFILTRÉS	64
IV.1.3. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT	65
IV.2. PERTES DE CHARGE DANS LE CIRCUIT DES FUMES	67
IV.2.1. PERTES DANS LA CHAMBRE DE COMBUSTION	68
IV.2.2. PERTES DANS LE SURCHAUFFEUR	68
IV.2.3. PERTES DANS LE FAISCEAU VAPORISATEUR	69
IV.2.4. PERTES DANS L'ECONOMISEUR	70
IV.2.5. PERTES DANS LE RECHAUFFEUR D'AIR	70
IV.3. CHEMINEES	70
IV.3.1. CALCUL DE LA HAUTEUR	71
A/ Calcul de h_p	71
B/ Calcul de H_0	72
IV.3.2. DIAMETRE DE LA CHEMINEE	72
IV.3.3. REALISATION	73

IV.4. VENTILATEURS	73
IV.4.1. INTRODUCTION	73
IV.4.2. ELEMENTS NECESSAIRES AUX CHOIX D'UN VENTILATEUR	73
A/ VENTILATEURS DE TIRAGE	74
B/ VENTILATEURS DE SOUFFLAGE	75

CHAPITRE V

LA TURBINE A VAPEUR

V.1. INTRODUCTION	76
V.2. LA TURBINE	77
V.3. LA POMPE D'ALIMENTATION	78
CONCLUSION GENERALE	80

ANNEXE A : DETERMINATION DU POUVOIR CALORIFIQUE

ANNEXE B :

Fig.B.1 - VUE EN COUPE TRANSVERSALE DE L'USINE D'INCINERATION.

Fig.B.2 - VUE DE DESSUS DE L'USINE D'INCINERATION.

ANNEXE C : AUTOMATISATION DES CALCULS

BIBLIOGRAPHIE

TABLES DES FIGURES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات BIBLIOTHEQUE — المكتبة Ecole Nationale Polytechnique
--

Page

Fig.2.1	- Déchargement des véhicules de collecte	15
Fig.2.2	- Vue de dessus de la fosse	17
Fig.2.3	- Pont roulant bipoutre-birail	19
Fig.2.4	- Pont roulant monopoutre-monorail	19
Fig.2.5	- Pont roulant suspendu monorail	19
Fig.2.6	- Différentes formes de galets	25
Fig.2.7	- Translation par moteur central	26
Fig.2.8	- Translation par deux moteurs indépendants	26
Fig.2.9	- Position de la trémie	29
Fig.2.10	- Schéma général d'un four	29
Fig.2.11	- Four à grilles sans fin Stein Industrie	31
Fig.3.1	- Volume d'air théorique pour une combustion neutre	33
Fig.3.2	- Schéma général d'une chaudière	37
Fig.3.3	- Section transversale de la chambre de combustion	41
Fig.3.4	- Paroi de la chambre de combustion	41
Fig.3.5	- Coefficient de correction pour les échangeurs à courants croisés	42
Fig.3.6	- Schéma général du surchauffeur	43
Fig.3.7	- Section longitudinale du collecteur	45
Fig.3.8	- Valeurs du coefficient f_n	47
Fig.3.9.a	- Emissivité du gaz carbonique	50
Fig.3.9.b	- Emissivité de la vapeur d'eau	51
Fig.3.10	- Correction du facteur total d'émission	52
Fig.3.11	- Valeurs du coefficient i	53
Fig.3.12	- Hauteur du surchauffeur	53
Fig.3.13	- Schéma général du vaporisateur	55
Fig.3.14	- Schéma général de l'économiseur	58
Fig.3.15	- Section longitudinale d'un tube	56
Fig.3.16	- Schéma général du réchauffeur d'air	60
Fig.4.1	- Dépoussiéreur cyclone	62
Fig.4.2	- Dépoussiéreur multicyclones	63
Fig.4.3	- Dépoussiéreur humide	64
Fig.4.4	- Dépoussiéreur à couche filtrante	65
Fig.4.5	- Dépoussiéreur électrostatique	66

Fig.4.6	- Coefficient de perte de charge f_B	69
Fig.4.7	- Ensemble dépoussiéreur- ventilateur de tirage-cheminée	74
Fig.4.8	- Position du ventilateur de soufflage	75
Fig.5.1	- Cycle à vapeur de l'usine d'incinération	76
Fig.5.2	- Cycle thermodynamique de la turbine à vapeur	77

TABLE DES TABLEAUX

		Page
Tab.2.1	- Classement en groupes des mécanismes	22
Tab.2.2	- Facteur de marche et fréquence des démarrages à ne pas dépasser en fonction du groupe des mécanismes	23
Tab.4.1	- Caractéristiques générales des dépoussiéreurs	67

Nomenclature des principales notations utilisées
dans le document

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

- g : Pesanteur.
 C_p : Capacité de charge de la benne.
 M, m : Masse.
 \dot{m} : Débit massique.
 C : Capacité horaire maximale du four.
 V : Volume.
 ρ : Masse volumique.
 M_0 : Masse de la benne à vide.
 τ : Temps.
 U : Vitesse.
PCS: Pouvoir calorifique supérieur.
PCI: Pouvoir calorifique inférieur.
 X : Fraction massique.
 Y : Fraction volumique.
 μ : Masse molaire.
 P : Pression.
 H, h : Enthalpie.
 c_p : Chaleur massique.
 T : Température des fumées.
 t : Température de l'eau ou de l'air.
 η : Rendement.
 \dot{V} : Débit total de vapeur.
 d : Diamètre.
 n : Nombre de tubes.
 N_m : Nombre de mole.
 S : Surface.
 Q : Quantité de chaleur.
 Δt_m : Différence de température moyenne logarithmique.
 F : Facteur de correction.
 l : Longueur.
 e : Epaisseur.
 p_m : Périmètre mouillé.
 Re : Nombre de Reynolds.
 S_p : Section de passage.
 q : Débit massique dans un tube.
 N : Nombre de nappes.
 s : Surface d'une nappe.

- \dot{D} : Débit volumique.
 SS : Entropie.
 k : Coefficient de transmission global de chaleur.
 π : Pertes de charge dans le circuit des fumées.
 P_t : Puissance de la turbine.
 P_p : Puissance de la pompe.
 P_n : Puissance nette.
 x : Titre de la vapeur saturée.

INDICES

- b : Benne.
 u : Utile.
 d : Ordures ménagères.
 m : Moyenne.
 ps : Fosse.
 a : Air.
 f : Fumées.
 0 : Entrée du composant.
 1 : Sortie du composant.
 c : Ecrans d'eau.
 s : Surchauffeur.
 \dot{v} : Vaporisateur.
 e : Economiseur.
 r : Réchauffeur d'air.
 cc : Chambre de combustion.
 v : Vapeur.
 in : Intérieur.
 ex : Extérieur.
 cl : Collecteur.
 p : Paroi.
 ct : Oxyde de carbone.
 el : Eau (liquide ou vapeur).
 un : Unitaire.
 li : Liquide.
 g : Gaz.
 ar : Air réel.
 ch : Cheminée.
 x1 : Premier soutirage.

- x2 : Deuxième soutirage.
x3 : Troisième soutirage.



INTRODUCTION GENERALE

Le monde croule sous ses déchets, encombrants, sales et polluants, personne n'en veut et pourtant tout le monde en produit, et de plus en plus. A tel point qu'ils seront un des problèmes écologiques majeurs du prochain millénaire.

Aujourd'hui, les grands pays industrialisés se préoccupent de leurs déchets de toute sorte. Depuis une trentaine d'années, l'éveil d'une nouvelle conscience écologique dans ces pays les a amenés à développer une politique dont les résultats sont indéniables de nos jours dans les domaines de la collecte des ordures ménagères, de leur traitement et de leur recyclage.

Doit-on continuer à considérer le traitement des déchets comme un luxe réservé aux seuls pays industrialisés, alors que nous savons toutes les conséquences de notre négligence dans ce domaine sur la santé des populations urbaines ? A cet égard, il serait d'ailleurs intéressant, d'un point de vue purement économique de comparer d'une part, la facture des soins nécessaires aux malades, oh ! combien nombreux dans nos villes, atteints de l'asthme, d'allergies de toute sorte et d'autres maladies contagieuses et parasitaires qui prospèrent à proximité de nos décharges publiques, avec d'autre part, le prix qu'on devrait payer pour traiter correctement nos déchets. Ceci évidemment sans parler de la contribution que cela va apporter à l'amélioration de la qualité de vie des populations.

Les statistiques mondiales montrent que la part des matières organiques dans les ordures ménagères a chuté, tandis que les métaux et chiffons restaient à peu près stables. Les verres, plastiques, papiers et cartons ont grimpés dans le même temps d'une façon remarquable. L'élévation du niveau de vie, mais aussi l'évolution des modes de consommation et l'utilisation croissante d'emballages en papier, carton, verre, plastique, etc..., expliquent cette évolution. Une étude réalisée en 1982 par la banque mondiale dans les différentes villes du monde montre clairement que le degré de développement des pays est inversement proportionnel au pourcentage de matières organiques, que l'on trouve dans les poubelles de leurs habitants.

Or, si les sociétés modernes et industrielles ont su résoudre le problème de la collecte de leurs déchets ménagers, le stade de "l'après-poubelle" est encore largement sous-développé.

L'incinération avec ou sans récupération d'énergie est la technique de valorisation qui a connu le plus grand succès. Les déchets sont déchargés dans une fosse, puis repris par une

benne à pont roulant qui les jette dans un four où ^{ils} elles sont brûlées aux alentours de 900°C. Si l'incinération représente un progrès énorme par rapport à une simple mise en décharge, elle n'est pas cependant sans inconvénients. D'abord, l'énergie produite sous forme de chaleur n'est pas stockable. Ensuite, les ordures brûlées libèrent dans l'atmosphère d'importantes quantités de poussières, de métaux lourds (plomb, mercure, zinc, etc...) et de gaz chlorhydrique (HCl) extrêmement polluants. Il reste donc à régler l'épineux problème des "déchets de déchets", on cherche, avec ardeur, une solution ultime pour ces résidus, sans quoi les incinérateurs deviendraient aussi impopulaires que les décharges qu'ils doivent en partie remplacer.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur le dimensionnement d'une usine d'incinération avec récupération d'énergie. Cette dernière est prévue non seulement pour la production d'électricité, mais aussi pour alimenter une usine de production de papier et un réseau de chauffage en vapeur d'eau.

CHAPITRE I

GENERALITES

1.1. LES DECHETS MENAGERS

1.1.1. LE DECHET - DEFINITION REGLEMENTAIRE

Qu'entend t-on par déchet ? Le bon sens nécessite qu'on l'oppose au produit de qualité, élaboré, directement utilisable, consommable et commercialisable.

Du point de vue de la réglementation : "Est un déchet, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon."

- DECHETS INDUSTRIELS

On peut distinguer trois groupes de déchets industriels :

- 1/ Les déchets banals, contenant les mêmes composants que les ordures ménagères et qui peuvent être alors traités de la même façon que ces derniers.
- 2/ Les déchets spéciaux, issus de l'activité industrielle et caractérisés par une faible teneur en éléments nocifs.
- 3/ Les déchets toxiques et dangereux, dont la concentration en substances nocives est suffisamment importante pour nécessiter des traitements spécifiques.

L'analyse de ces déchets permet de conclure que :

- les groupes 2 et 3 nécessitent des traitements spéciaux afin d'éliminer les substances nocives ;
- le premier groupe peut être en fait rangé dans la catégorie des ordures ménagères.

- ORDURES MENAGERES

Selon la réglementation, sont compris dans la dénomination d'ordures ménagères :

- a) Les détritrus de toute nature, comprenant notamment : ordures ménagères, cendres, mâchefers de chauffage central, débris de verre ou de vaisselle, feuilles, balayures, et résidus de toutes sortes déposés même indûment, aux heures de la collecte dans des récipients individuels ou collectifs placés devant les immeubles ou à l'entrée des voies inaccessibles aux camions.
- b) Les déchets provenant des établissements industriels et

commerciaux, bureaux, administrations, cours et jardins privés, déposés dans des récipients dans les mêmes conditions que les ordures ménagères avec l'agrément de l'administration.

- c) Les crottins, fumiers, feuilles mortes, Boues et, d'une façon générale, tous les produits provenant du nettoyage des voies publiques, jardins publics, parcs, cimetières et de leurs dépendances, rassemblés en vue de leur évacuation.
- d) Les produits du nettoyage et détritrus des halles, foires, marchés, lieux de fêtes publiques, lieux d'attache des bêtes de somme ou de trait, rassemblés en vue de leur évacuation.
- e) Les résidus en provenance des écoles, casernes, hôpitaux, hospices, prisons et tous bâtiments publics, groupés sur des emplacements déterminés dans des récipients réglementaires.
- f) Le cas échéant, tous objets abandonnés sur la voie publique, ainsi que les cadavres des petits animaux.

Ne sont pas compris dans la dénomination d'ordures ménagères :

- 1/ Les déblais, gravois, décombres et débris provenant des travaux publics et particuliers.
- 2/ Les cendres et mâchefers d'usines et, en général, tous les résidus provenant d'un commerce ou d'une industrie quelconque, ou des cours et jardins privés (sauf l'exception prévue au paragraphe b ci-dessus), les déchets anatomiques ou infectieux provenant des hôpitaux ou cliniques, ainsi que les déchets et issues d'abattoirs.
- 3/ Les objets visés par le paragraphe f ci-dessus qui, par leurs dimensions, leur poids ou leur nature, ne pourraient être chargés dans les camions.

I.1.2. QUANTITE DES ORDURES MENAGERES

La quantité d'ordures ménagères varie en fonction de plusieurs facteurs, elle dépend essentiellement :

- du niveau de vie de la population : elle croît avec celui-ci ;
- de la saison : elle est généralement minimale en été ;
- du mode de vie des habitants : elle est influencée par les déplacements quotidiens entre les grandes villes et les petits villages ;

- du mouvement des populations pendant les vacances ;
- des nouvelles méthodes de conditionnement des marchandises.

I.1.3. CARACTERISTIQUES DES ORDURES MENAGERES

I.1.3.1. COMPOSITION

De nombreux facteurs influent sur la composition des ordures ménagères :

- le caractère de l'agglomération : qu'elle soit une zone urbaine ou une zone industrielle ;
- le climat et la saison : les ordures collectées sont riches en fruits et en légumes en été ;
- le type de l'habitat et le niveau de vie de la population : utilisation des boîtes de conserve et des produits alimentaires conditionnés.

I.1.3.2. CLASSIFICATION

Le caractère hétérogène des ordures ménagères nécessite l'adoption d'un classement des éléments constituants. Ce dernier varie selon l'objectif recherché.

Généralement, le classement comporte cinq grandes catégories :

- 1/ fines (inférieures à 20 mm) ;
- 2/ matières spécialement combustibles (chiffons, plastiques, os, bois, etc...) ;
- 3/ matières inertes (métaux, verres, porcelaines, faïences, etc...) ;
- 4/ matières plus spécialement fermentescibles (toute matière végétale putrescible, tout déchet de cuisine, fruits, viandes, etc...) ;
- 5/ papiers et cartons.

I.1.3.3. VALORISATION DES ORDURES MENAGERES

La valorisation des ordures ménagères est caractérisée par :

- leur densité ;
- leur taux d'humidité ;
- leur pouvoir calorifique ;

- leur rapport carbone/azote (C/N).

I.1.3.3.1. Densité

La densité des ordures ménagères n'a de sens que si on définit les conditions dans lesquelles on la détermine. En effet, les ordures sont compressibles et leur densité varie au cours des différents processus qu'elles subissent du lieu de production au lieu d'élimination, elle est de l'ordre de 0,20 en été et de 0,30 en hiver. Cette caractéristique semble varier *en sens inverse* du niveau de vie, elle est plus faible dans les quartiers modernes que dans les quartiers anciens.

Une étude statistique a permis d'estimer la valeur de la masse volumique des ordures ménagères en différents points :

- à la chute en fosse : 0,15 à 0,25 t/m³ ;
- en fosse : 0,30 à 0,40 t/m³ ;
- dans la benne de reprise : 0,40 à 0,60 t/m³ ;
- dans la goulotte d'alimentation des fours : 0,25 à 0,35 t/m³.

I.1.3.3.2. Degré d'humidité

La composition des ordures ménagères indique leur forte teneur en eau. Cette quantité influe considérablement sur le pouvoir calorifique ainsi que sur le phénomène de décomposition des matières organiques. L'humidité dépend essentiellement du climat, elle est plus importante en été et cela à cause d'une grande proportion de matières vertes.

I.1.3.3.3. POUVOIR CALORIFIQUE

Le pouvoir calorifique des ordures ménagères est la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un kilogramme d'ordures.

Du fait que la vapeur d'eau formée peut être revenue ou non à son état initial, on définit :

- Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) : dans ce cas on suppose que la vapeur d'eau formée a été condensée d'où restitution de la chaleur de vaporisation.
- Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) : la vapeur d'eau formée s'échappe avec les gaz de combustion, il n'y aura pas donc une restitution de la chaleur de vaporisation; ce cas est prépondérant dans les installations industrielles.

L'augmentation de la proportion de la cellulose (pouvoir calorifique de l'ordre de 4000 kcal/kg) et de matières plastiques (pouvoir calorifique de l'ordre de 8000 à 10000 kcal/kg) durant les dernières années n'a fait qu'accroître le

PCI des ordures ménagères, ce qui a influencé le dimensionnement des fours d'incinération.

En pratique, le PCI est d'environ :

- 1900 kcal/kg l'hiver et 1500 kcal/kg l'été, dans une agglomération où la production/hab/jour est de l'ordre de 0,9 kg ;
- 1600 kcal/kg l'hiver et 1300 kcal/kg l'été, dans une agglomération où la production/hab/jour est de l'ordre de 0,7 kg.

1.1.3.3.4. Rapport Carbone/Azote (C/N)

Les ordures ménagères renferment beaucoup de matières organiques susceptibles d'entrer rapidement en fermentation. Ce phénomène est lié à une élévation de température pouvant atteindre 60 à 70°C, ce qui provoque une destruction des germes pathogènes. Une description détaillée du phénomène de fermentation sera donnée ultérieurement lorsque nous parlerons de la mise à la décharge.

L'évolution de la fermentation est généralement accompagnée par la détermination du rapport C/N qui n'est en fait qu'un moyen permettant d'estimer la richesse des ordures et leur aptitude au traitement par compostage.

1.1.4. EVOLUTION DES ORDURES MENAGERES

L'évolution industrielle et l'accroissement du nombre d'habitants dans les villes n'ont fait qu'augmenter les quantités d'ordures ménagères. Cette évolution quantitative a été accompagnée par une diminution remarquable de la densité. Ceci s'explique par une augmentation considérable du volume des ordures présentées à la collecte.

D'autre part, une évolution parallèle dans la composition des ordures a pu être remarquée, et qui se résume en :

- une diminution des cendres du fait de l'emploi du fuel, de l'électricité et du gaz ;
- une diminution des matières fermentescibles ;
- une augmentation des emballages, des métaux, et des matières plastiques.

1.2. LES MODES DE TRAITEMENT

1.2.1. INTRODUCTION

Autrefois, la valorisation d'un déchet consistait à récupérer tout ce qui pouvait présenter encore de la valeur ; aujourd'hui, différents procédés de valorisation globale ont

été mis au point. ces derniers peuvent être groupés en trois catégories :

- la mise en décharge ;
- le compostage ;
- l'incinération.

Dans ce qui suit nous allons essayer de présenter brièvement ces trois modes de traitement.

I.2.2. LA MISE EN DECHARGE

La mise en décharge des ordures ménagères est le procédé le plus simple et souvent le plus économique. Cependant, une décharge brute peut être à l'origine de nombreux problèmes, parmi lesquels on cite :

- Dégagement d'odeurs désagréables.
- Le risque de pollution des eaux souterraines par le ruissellement des eaux de pluie ou leur infiltration à travers le dépôt.
- La profusion des déchets alimentaires, favorisant la reproduction des mouches et des rongeurs, agents propagateurs de maladies contagieuses.
- De très grands risques d'incendies.

En conséquence, si l'on a recours à la mise en décharge pour l'élimination des ordures ménagères, seule la méthode de la décharge contrôlée, qu'on définira plus loin, répond aux exigences de l'hygiène et de la protection de l'environnement.

Une décharge contrôlée vise à obtenir une fermentation aérobie des matières organiques. Cette dernière est réalisée en suivant un mode opératoire bien précis et qui se résume en ce qui suit :

- Les ordures sont répandues sur toute la surface de la couche précédente avec une épaisseur modérée (2 m environ) toute nouvelle couche n'étant posée que lorsque la température de la couche précédente s'est abaissée à la température du sol naturel.
- Les couches doivent être répandues avec une légère inclinaison à l'intérieur de toutes les bornes afin d'éviter une remise au jour par les pluies.
- Le dépôt doit être effectué d'une façon compacte pour éviter les vides importants qui ne font que favoriser les risques d'incendie.
- Toute nouvelle couche, y compris les bornes, doit être recouverte de terre (avec une épaisseur de 10 à 30 cm) dans un délai de 48 heures.

Il est à remarquer que ce procédé permet d'éliminer ou au moins de minimiser les inconvénients résultant d'une décharge brute.

Actuellement, une opération qui consiste à broyer les résidus a été introduite dans le but de rendre le procédé plus efficace, en combinant le compostage et la mise en décharge.

Une fois leur exploitation achevée, les décharges contrôlées peuvent avoir des utilisations très diverses :

- la mise en culture, qui convient aux très grandes décharges ;
- la réalisation de l'infrastructure d'un équipement collectif ;
- la construction de bâtiments ;
- l'utilisation des produits de décharge comme matériaux de remblai, comme matériaux de couverture d'une autre décharge en cours d'exploitation ou encore comme matériaux améliorant des sols destinés à la culture.

1.2.3. LE COMPOSTAGE

La fermentation, procédé permettant la transformation des ordures ménagères en produits fertilisants, a été utilisée depuis longtemps par les cultivateurs. Actuellement, ce processus est dit compostage et comporte deux phases, un traitement mécanique et la fermentation proprement dite.

Le traitement mécanique consiste à :

- écarter certains produits indésirables ;
- séparer les ordures ménagères afin d'éliminer tout objet ou matière n'ayant aucun rapport avec la fermentation ;
- broyer les ordures afin de réduire la dimension des éléments pour permettre une fermentation plus rapide.

On peut classer les produits pouvant subir la fermentation en deux catégories :

- 1/ Matières organiques difficilement dégradables (matière plastiques, tissus, cuirs, etc...) : ces produits se dégradent difficilement et parfois nécessitent l'utilisation de bactéries spécialisées.
- 2/ Matières organiques facilement dégradables (hydrates de carbone, protides, etc...).

Pour avoir un bon compost, il est nécessaire de prendre en considération les facteurs suivants :

- a) La teneur en eau : elle doit être suffisante pour assurer une bonne fermentation. L'expérience montre que pour une proportion de 50 % de matières organiques, la teneur en eau doit atteindre 45 %. On doit noter que la fermentation doit se faire à l'abri de la pluie pour éviter tout excès d'eau pouvant empêcher une bonne circulation d'air entre les particules.
- b) L'air : théoriquement la quantité d'air à fournir est de 4,5 à 5 litres par kilogramme de matière fraîche à 45 % d'eau et par heure. La circulation d'air à travers les produits en cours de compostage peut être réalisée de diverses façons :
- remuage des tas, au moyen d'une pelleteuse ou avec des engins spéciaux ;
 - utilisation d'un ensemble d'injecteurs d'air alimentés à partir de ventilateurs ;
 - création d'une légère dépression provoquant l'aspiration de l'air à travers les tas ;
 - utilisation d'un système de conduits perforés.

Pour obtenir un compost de qualité, il est nécessaire que les matières organiques ne soient pas toutes détruites. Ceci est réalisé par une bonne circulation d'air provoquant une chute de température de fermentation.

- c) La composition des produits à fermenter : la richesse du substrat à composter dépend essentiellement de la teneur en matières organiques, plus cette dernière est importante plus la fermentation est rapide.
- d) Les facteurs accessoires : en plus des trois facteurs examinés ci-dessus, l'homogénéité, l'état de division du matériau, et la disposition des tas sont également des facteurs supplémentaires qu'on doit prendre en considération. En effet, l'hétérogénéité provoque des différences entre deux points très voisins pouvant atteindre 10 à 15°C, une dilacération trop poussée conduit, surtout en présence d'une forte teneur en eau, à la formation de mottes, facteur de mauvaises odeurs; du moment qu'il y a anaérobiose.

La fermentation est un processus de décomposition très compliqué, qui s'effectue en plusieurs phases :

- 1/ La phase de latence : elle correspond au temps nécessaire aux micro-organismes pour envahir tout le milieu constitué par les ordures ménagères.
- 2/ La phase de croissance : elle correspond à la montée en température, sa durée est donc fonction des trois facteurs principaux : air, eau et composition.

- 3/ La phase thermophile : l'obtention d'un compost riche nécessite une intervention au niveau de cette phase, car elle correspond à la plus haute température.

En effet, pour des raisons d'hygiène, ce produit doit être, maintenu un certain temps aux environs de 60°C, et il faut ensuite arrêter rapidement la phase thermophile qui ne sert, à partir de ce moment-là, qu'à détruire inutilement les matières organiques en les transformant soit en corps volatils (gaz carbonique, eau) qui s'échappent du compost, soit en composés minéraux.

- 4/ La phase de maturation ou de décroissance : elle représente une fermentation secondaire provoquant la transformation des matières organiques, sous l'action des micro-organismes, en colloïdes humiques étroitement associés à des éléments minéraux (fer, calcium, etc...) et finalement en humus ; cette phase est à éviter en minimisant la durée de stockage surtout si le compost sera destiné à une utilisation en culture.

Suivant la façon par laquelle on essaye de réunir les facteurs en cause, les différentes méthodes de compostage peuvent se classer en deux catégories : compostage avec fermentation naturelle à l'air libre et compostage avec fermentation accélérée.

A/ COMPOSTAGE AVEC FERMENTATION NATURELLE :

Les ordures broyées sont disposées en tas sur une aire réservée à cet effet. Pour fournir l'oxygène nécessaire on retourne les tas selon le rythme suivant : premier retournement au bout de 3 à 10 jours, deuxième retournement entre 10 à 20 jours, troisième retournement entre un mois et demi et deux mois et demi. Aucun retournement n'est nécessaire avant que les couches intérieures n'atteignent 65°C. La fermentation est considérée comme suffisamment avancée lorsque après un retournement la température interne du tas ne remonte pas.

B/ COMPOSTAGE AVEC FERMENTATION ACCELEREE :

Ce procédé est basé sur une manipulation de l'un des facteurs principaux agissant sur la fermentation en vue d'obtenir un bon compost dans un minimum de temps (4 à 20 jours). Dans la pratique une fermentation accélérée est réalisée :

- par adjonction d'eau, pour avoir l'humidité adéquate ;
- par soufflage d'air à travers les tas d'ordures ;
- par brassage, pour aérer et homogénéiser la masse à traiter.

Le compost peut être utilisé dans plusieurs domaines, parmi lesquels on cite :

- les grandes cultures ;
- les prairies ;
- les espaces verts ;
- les cultures florales ;
- aliment pour le bétail ;
- équilibre physique, chimique et microbien des sols fatigués.

I.2.4. L'INCINERATION

L'incinération par combustion simple qui est apparue en 1912 représentait jusqu'aux années 70 un moyen des plus utilisés pour traiter les ordures ménagères. Ce processus a fait l'objet de construction de plusieurs installations qui n'ont pu fonctionner longtemps dans ce sens à cause du choc pétrolier des années 70. Depuis, la nécessité d'introduire des équipements de récupération sur ces installations est devenue une exigence très forte.

Une première évolution a consisté à récupérer la chaleur dégagée lors de la combustion en vue de l'utiliser pour le chauffage urbain.

Depuis les années 80, une seconde étape d'évolution est franchie, elle a pour objectif de produire de l'énergie électrique à partir de la chaleur récupérée sous forme de vapeur surchauffée.

L'évolution actuelle des ordures ménagères favorise l'incinération, par une présence de plus en plus importante dans ces ordures de matières combustibles facilement inflammables, alors que la diminution des matières d'origine végétale et animale tend à réduire le rendement du compostage.

Lorsqu'on envisage le traitement par incinération avec récupération de chaleur, on doit faire face à certains problèmes délicats tels que :

- 1/ L'excès d'air : il permet de garantir une combustion complète. Cependant on ne doit pas dépasser un certain taux afin d'éviter des pertes de chaleur préjudiciables au rendement de l'installation.
- 2/ La récupération de la chaleur à partir des gaz de combustion : le choix d'une chaudière convenable permettant la récupération de la chaleur reste délicat surtout qu'il s'agit d'une opération d'échange avec des gaz très pollués par la présence d'une énorme quantité de poussière.
- 3/ Le traitement des fumées : la pollution de l'atmosphère par l'incinération des ordures ménagères peut résulter d'une part, des poussières entraînées par les fumées, d'autre part, de la présence dans celles-ci de certains éléments polluants comme le soufre et le chlore.

- 4/ Le traitement des mâchefers : ils sont souvent utilisés comme remblai, ou comme couverture dans les décharges ; cependant, leur vente nécessite parfois, l'utilisation de certains procédés ayant pour objectif la séparation des ferrailles par exemple.

Tous ces problèmes rendent, il est vrai, assez délicate l'opération qui consiste à concevoir une installation d'incinération avec récupération ; mais les avantages qu'elle offre par rapport aux autres modes de traitement, aussi bien sur le plan du traitement lui même que sur celui de la récupération d'énergie font que son utilisation se généralise de plus en plus à travers les pays développés où la protection de l'environnement, et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie occupent les premières loges des préoccupations des pouvoirs publics et de la société civile.

CHAPITRE II

L'USINE D'INCINERATION

II.1. CONSIDERATIONS GENERALES

Nombreuses sont les considérations qu'on doit prendre en compte pour la réalisation d'une usine d'incinération.

- Le choix de l'emplacement d'une usine d'incinération dépend des différents réseaux nécessaires à l'exploitation de l'usine :

- réseau routier extérieur ;
- réseau ferré (cas des grandes installations) ;
- réseau d'eau industrielle ou d'eau de rivière ;
- réseau électrique pour la fourniture d'énergie récupérée.

Les techniques modernes permettant d'éviter, le bruit, les poussières et les fumées ont rendu le choix d'un terrain à proximité immédiate des agglomérations très fréquent.

- L'aménagement général doit tenir compte de la séparation entre le bloc-usine et les locaux sociaux (réfectoire, douches, vestiaires), afin que ces derniers soient protégés au maximum des poussières issues des fosses ou des lieux de stockage des mâchefers.

- Les sens de circulation à l'intérieur de l'usine doivent être bien définis :

- arrivée des véhicules à la bascule ;
- cheminement vers la fosse ;
- sortie par une autre voie.

On doit réaliser une voirie identique, à l'arrière de l'usine afin de permettre l'évacuation des mâchefers.

Il est indispensable, dans le cas des grandes agglomérations de prévoir des files d'attente à l'intérieur de l'usine afin d'éviter l'encombrement sur la voie publique.

- Le quai de manoeuvre et de déchargement qui précède la fosse de réception doit être suffisamment large pour permettre l'évolution des camions de collecte (15 à 20 m de largeur à compter du bord de la fosse). L'aire de déchargement doit être surmontée d'une toiture ou englobée par un hall pour éviter l'envol des poussières et des papiers à cause des vents.

- Le pesage des ordures se fait au moyen de bascules automatiques ayant de 30 à 40 tonnes de capacité. Une fois le véhicule est sur la bascule, le conducteur déclenche le système de pesage automatique par l'introduction d'une carte portant les caractéristiques du véhicule (tare, provenance), un ticket indiquant la charge en ordures du véhicule lui est alors

délivré.

Dans notre cas, l'usine d'incinération est très importante, on doit alors prévoir un autre dispositif de pesage pour les mâchefers qui seront vendus.

II.2. DIMENSIONNEMENT DE L'USINE D'INCINERATION

II.2.1. FOSSE DE RECEPTION

II.2.1.1. DEFINITIONS

Une fois l'opération de pesage effectuée, les camions de collecte se dirigent vers la fosse de réception pour décharger leurs contenus par vidage direct (fig.2.1).

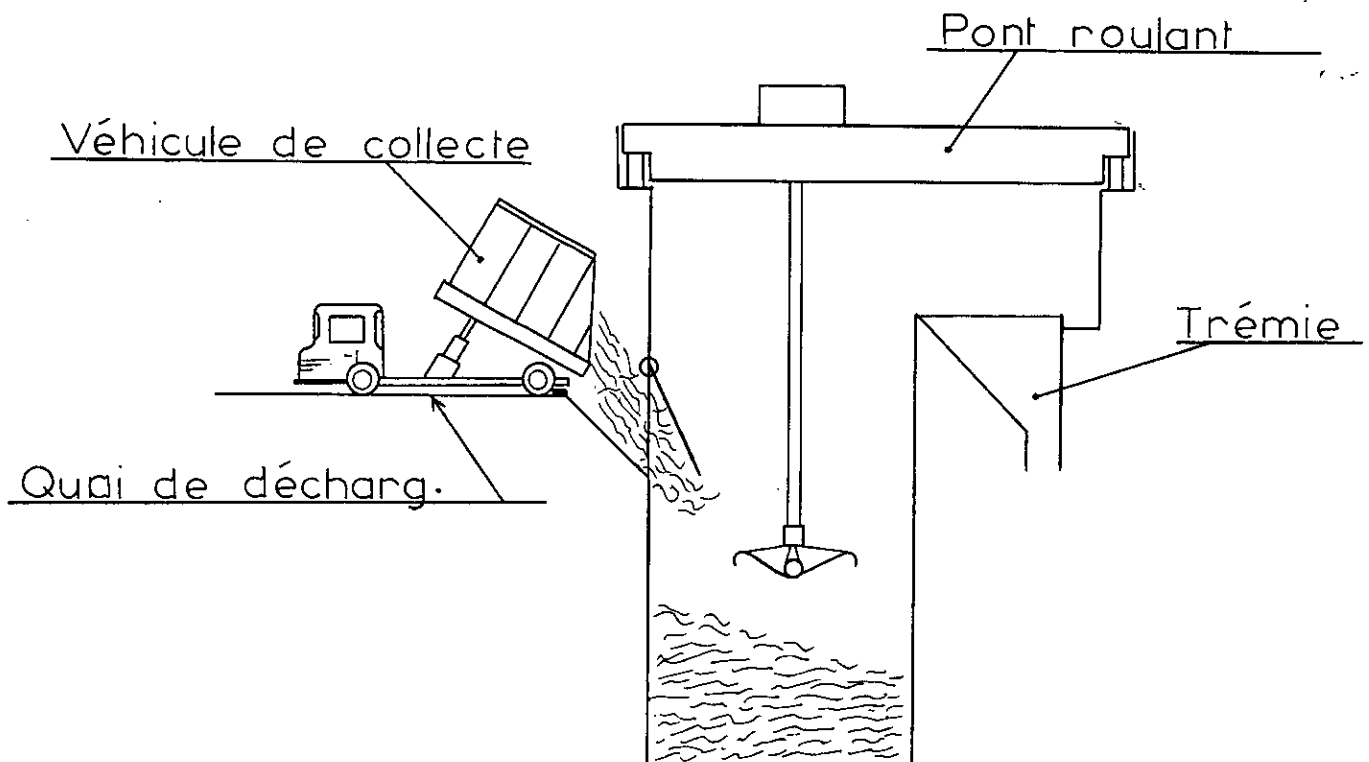


Fig.2.1 - Déchargement des véhicules de collecte.

Une fosse de réception est caractérisée par trois volumes :

- Le volume minimum, ou volume des ordures déversées en fosse sans intervention des ponts roulants.
- Le volume géométrique, ou volume correspondant à un remplissage de la fosse au niveau du quai de déchargement, comme si la fosse était remplie de liquide.
- Volume maximal, ou volume susceptible d'être reçu en fosse

par "gerbage". (voir ci-après).

L'opération de gerbage consiste à augmenter la hauteur utile de la fosse en accumulant les déchets au-dessus du niveau du quai de déchargement au moyen des ponts roulants. Il est alors indispensable de prévoir des zones de gerbage dans la fosse, inaccessibles au déchargement des camions.

L'évaluation de l'efficacité d'une fosse est liée à la détermination de deux coefficients :

- 1/ Coefficient de remplissage naturel, rapport du volume minimum au volume géométrique : il est toujours inférieur à 1 à cause de la formation d'un talus d'éboulement approximativement incliné à 45°, il augmente en fonction du rapport profondeur-largeur.
- 2/ Coefficient de gerbage, rapport du volume effectif réalisé après gerbage au volume géométrique : il peut atteindre 2 ou 3 suivant la hauteur disponible.

Afin d'éviter les risques de choc entre la benne de collecte et le grappin du pont roulant pendant le déversement, on annule la pénétration des camions en établissant un plan incliné juste après le quai de déchargement. Cette disposition présente l'inconvénient de diminuer la partie de la fosse qu'on peut remplir sans gerbage (fig.2.1).

II.2.1.2. DIMENSIONNEMENT

La détermination du volume de la fosse dépend de plusieurs critères :

- la capacité journalière maximale d'incinération ;
- les jours de collecte les plus chargés au cours de la semaine ;
- la masse volumique des ordures en fosse ;
- la capacité supplémentaire pour ne pas interrompre la réception en cas de panne de matériel.

A partir de là, on peut conclure qu'une alimentation continue de l'usine nécessite un volume géométrique correspondant, au moins, au double du volume maximum d'ordures pouvant être collectées par jour.

Dans notre cas la consommation horaire d'ordures ménagères est fixée à 100 t/h soit 2400 t/j d'où un volume géométrique de la fosse variant entre 12000 m³ (pour une masse volumique de 0,4 t/m³) et 16000 m³ (pour une masse volumique de 0,3 t/m³).

Le volume géométrique de la fosse étant ainsi déterminé, il reste maintenant à définir ses différentes dimensions.

LA LONGUEUR. Elle dépend essentiellement du nombre de travées souhaité, permettant le déchargement simultané des véhicules, ainsi que du nombre de fours contenus dans l'installation. On verra lors du dimensionnement des fours d'incinération que notre installation dispose de deux fours, on prévoit alors pour chaque four deux travées, chacune de 20 m de largeur (dimension déterminée auparavant), la première pour le vidage direct et la seconde pour le gerbage, la fosse aura donc 80 m de longueur totale (fig.2.2).

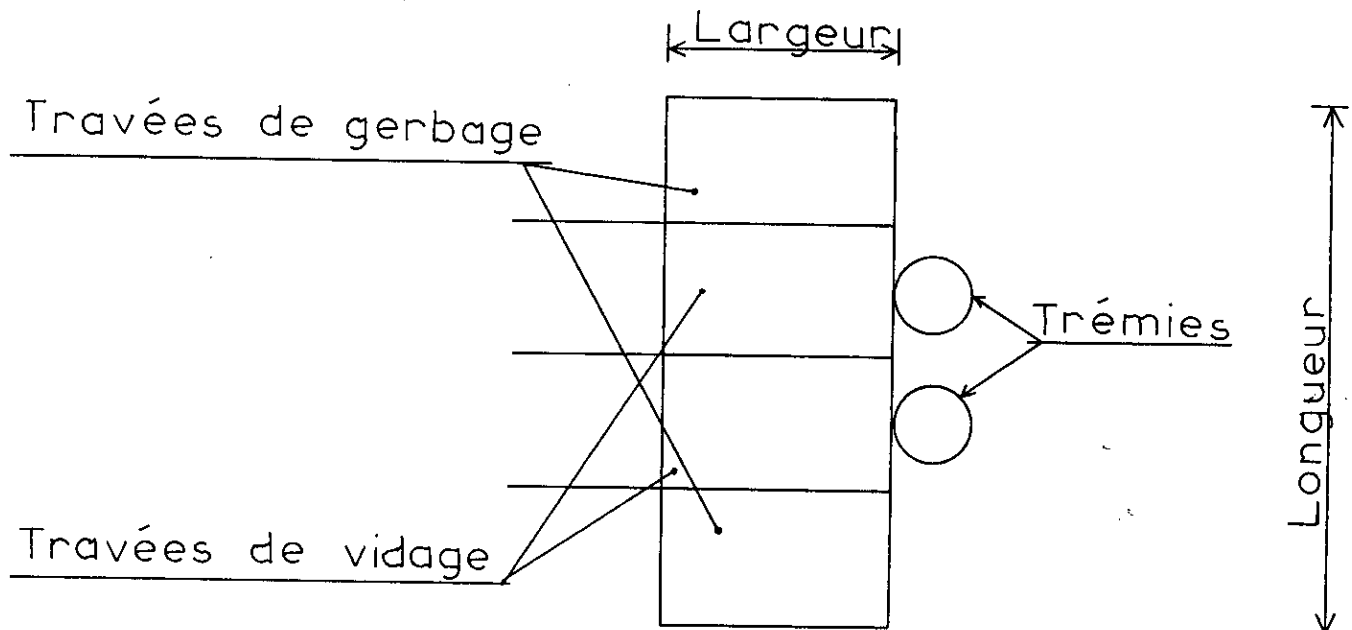


Fig.2.2 - Vue de dessus de la fosse.

LA LARGEUR. Plus la fosse est large, plus le coefficient de remplissage est faible, ce qui nécessite un travail supplémentaire du pont roulant répartissant les déchets sur toute la largeur.

LA PROFONDEUR. Le coefficient de remplissage naturel s'améliore au fur et à mesure que la profondeur devient plus importante. Cependant, plus la fosse est profonde plus la course de levage du grappin augmente, ainsi que le coût de la construction.

On remarque que le choix d'une profondeur et d'une largeur adéquates dépend des caractéristiques du pont roulant qui sera choisi (vitesse de translation, vitesse de direction, etc...), on ne pourra donc à ce stade évaluer ces deux dimensions.

II.2.1.3. CONSIDERATIONS TECHNIQUES

Les envols des poussières lors du déchargement et de la manoeuvre des ponts roulants sont considérables. Afin d'éviter au maximum les dispersions vers l'extérieur du bloc-usine, on peut prévoir deux techniques :

- La première consiste à mettre au point une fermeture pour

la fosse, cette dernière peut être réalisée au moyen de :

- . portes pivotantes ;
 - . portes à glissières verticales ou horizontales ;
 - . portes souples.
- La deuxième consiste à mettre la fosse en dépression par l'installation de ventilateurs qui assurent le soufflage de l'air dans les fours; cependant une situation élevée des ventilateurs s'avère nécessaire pour que les ouvertures d'aspiration ne soient pas obstruées par des papiers ou autres détrit.

Généralement, les parois d'une fosse sont réalisées en béton armé, mais cela ne signifie en aucun cas que la fosse puisse être enterrée profondément, on préfère au contraire qu'elle soit surélevée afin d'éviter des fouilles importantes (augmentation sensible du coût) et la nécessité de réaliser une étanchéité onéreuse à cause des risques de remontées d'eau dans la fosse.

II.2.2. PONTS ROULANTS

Les usines d'incinération sont souvent équipées en ponts roulants comme moyen de reprise en fosse car ils apportent les avantages suivants :

- Ils offrent une possibilité de manoeuvre dans les trois directions.
- Ils libèrent entièrement la surface au sol car ils s'appuient sur le bâtiment.
- Ils permettent la manutention des charges les plus variées, avec l'aide éventuelle de certains accessoires interchangeables.

Un pont roulant comprend :

- Une charpente métallique constituée elle même de deux sommiers se déplaçant chacun sur un chemin de roulement (à une certaine distance du sol et de part et d'autre de l'aire balayée) dans le sens de la longueur du bâtiment (mouvement de translation) et reliés entre eux par une ou deux poutres transversales.
- Un chariot avec palan (mouvements de direction et de levage) circulant sur la ou les poutres; le chariot est généralement soit bipoutre-birail (fig.2.3), soit monopoutre-monorail (fig.2.4).

On distingue par ailleurs les ponts posés (fig.2.3 et fig.2.4) qui roulent sur des rails reposant sur une structure métallique, et les ponts suspendus (fig.2.5) qui roulent sur les ailes inférieures de poutrelles en I.

Notre installation (grande capacité d'incinération) nécessite l'emploi de trois ponts roulants ; deux en service et le troisième en réserve. Chacun des deux ponts roulants en service s'occupera de deux travées, il aura donc pour tâche : l'alimentation d'un four et le gerbage dans une travée.

II.2.2.1. DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement d'un pont roulant est lié à l'étude de ces trois principaux mouvements :

- le mouvement de levage ;
- le mouvement de direction ;

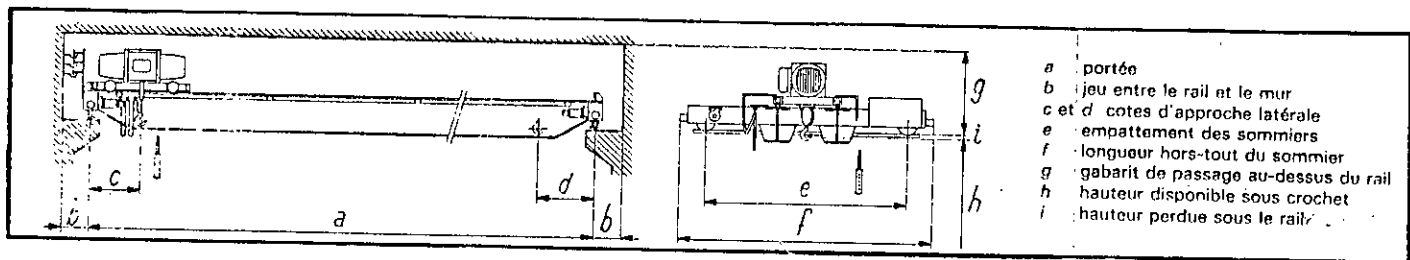


Fig.2.3 - Pont roulant bipoutre-birail.

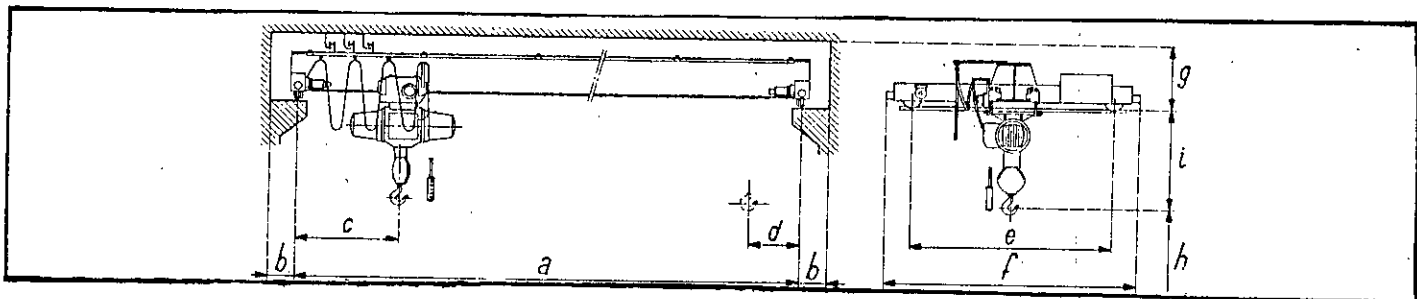


Fig.2.4 - Pont roulant monopoutre-monorail.

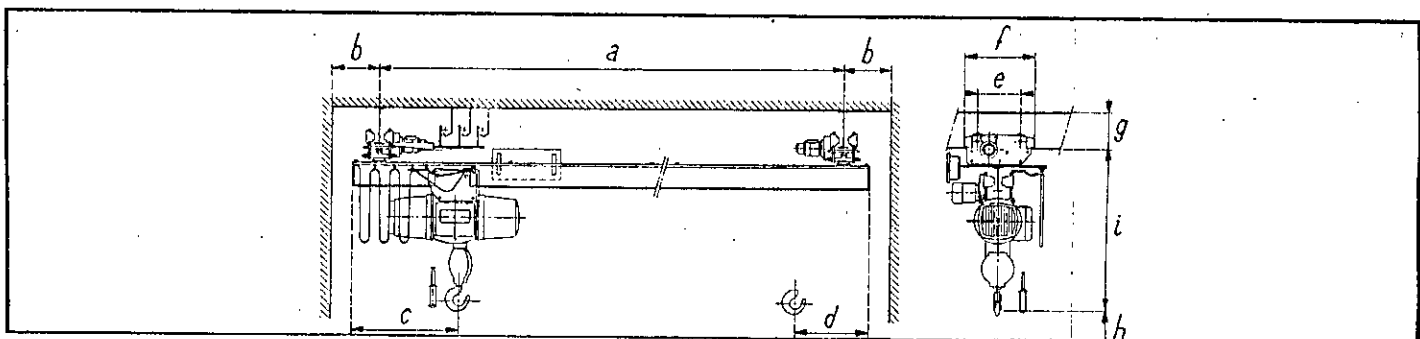


Fig.2.5 - Pont roulant suspendu monorail.

- le mouvement de translation ;

A/ MOUVEMENT DE LEVAGE

Le mouvement de levage (ainsi que le mouvement d'ouverture-fermeture de la benne) est garanti par le palan; ce dispositif comprend :

- Un moteur électrique : il est généralement du type asynchrone, ayant un bobinage pour les deux tensions (220 et 380 V), 50 Hz, avec une alimentation en courant triphasé.
- Un réducteur à engrenages : on utilise souvent trois types de réducteurs :
 - 1/ engrenages planétaires ;
 - 2/ engrenages épicycloïdaux ou hélicoïdaux ;
 - 3/ roue et vis sans fin.

A la sortie du réducteur le pignon attaque l'axe du tambour.

- Deux tambours : ils doivent être rainurés pour permettre un bon enroulement des câbles sur une seule couche.
- Une benne preneuse : il existe actuellement deux types de bennes pour la manutention des déchets ménagers, la benne coquille et la benne polype.

La benne coquille se compose de deux parties articulées et munies de fourches, ces dernières offrent une prise en profondeur; ce type de bennes a l'avantage d'être de conception simple et d'un entretien facile; par contre il n'est pas efficace pour les grandes capacités.

La benne polype se compose d'un nombre de pales variant entre six et huit en général, articulées en étoile; ce type de bennes présente l'avantage d'être très efficace pour les grandes capacités, mais il rend le prélèvement en fond de fosse moins aisé et un entretien plus compliqué que celui de la benne coquille.

Le volume utile de la benne varie entre 1 et 4 m³ pour les installations courantes, on choisira donc le volume maximum afin de garantir une alimentation régulière des fours.

La manoeuvre de la benne se fait par câbles : deux câbles pour le levage, deux câbles pour l'ouverture-fermeture ; malgré le fait que la commande hydro-électrique offre les possibilités d'alléger le chariot d'un côté et de développer une grande force de fermeture de la benne d'un autre côté, elle reste peu utilisable dans une fosse à ordures ménagères en raison des risques de chocs.

- Un frein : le palan est muni d'un frein devant immobiliser la charge sans glissement :

- . dès que l'opérateur abandonne le bouton de montée ou de descente ;
- . dès que la benne est arrivée en position de fin de course haut ou bas ;
- . en cas de coupure accidentelle de courant.
- Un appareillage de commande : dans notre cas l'utilisation d'un transformateur de sécurité permettant de réaliser une tension inférieure ou au maximum égale à 50 V est nécessaire.

B/ CRITERES DE CHOIX POUR LE MOUVEMENT DE LEVAGE D'UN PALAN

Pour un choix rationnel, on doit tout d'abord déterminer les caractéristiques du palan, ensuite, on choisira d'après les normes celui qui satisfait au mieux ces caractéristiques.

B.1. Groupe des mécanismes

La détermination du groupe des mécanismes nécessite l'évaluation :

- a) Du temps moyen de fonctionnement quotidien : qui est dans notre cas 24 heures.
- b) De l'état de sollicitation : on distingue quatre états :
 - 1- Léger : mécanismes soumis exceptionnellement à la sollicitation maximale et couramment à des sollicitations très faibles.
 - 2- Moyen : mécanismes soumis assez souvent à la sollicitation maximale et couramment à des sollicitations faibles.
 - 3- Lourd : mécanismes soumis fréquemment à la sollicitation maximale et couramment à des sollicitations moyennes.
 - 4- Très lourd : mécanismes soumis régulièrement à des sollicitations voisines de la sollicitation maximale.

D'après la description donnée ci-dessus, les ponts roulants qu'on doit choisir font partie de la troisième catégorie (état de sollicitation n° 3).

Le tableau 2.1 présente les différents groupes des mécanismes en fonction des deux paramètres cités ci-dessus, notre cas correspond au groupe 5_m.

Notons que le groupe choisi doit être compatible avec la fréquence des démarrages (§ B.5).

B.2. Capacité de charge

Elle est généralement exprimée en daN. On trouve sur le marché des palans à câbles de 250 à 63000 daN.

Etant donné que nous avons choisi une benne preneuse ayant un volume utile de 4 m³ et en notant que la masse volumique moyenne est de l'ordre de 0,5 t/m³ (§ I.1.3.3.1) la capacité de charge C_p est alors :

$$C_p = (4 \times 0,5 \times 10^3 + M_b) \times \frac{g}{10} \quad [daN] \quad (2.1)$$

Il faut se garder des deux interprétations erronées suivantes :

- a) Penser qu'en levant toujours 1t avec un palan de force 2000 daN (2t), la durée de vie du palan sera doublée : en réalité, la durée de vie sera seulement allongée de 20 % environ, et ce choix peut s'avérer onéreux.

Temps moyen de fonctionnement quotidien (h)

Etat de sol.	< 0,25	< 0,5	< 1	< 2	< 4	< 8	< 16	> 16
1		1D _m	1C _m	1B _m	1A _m	2 _m	3 _m	4 _m
2	1D _m	1C _m	1B _m	1A _m	2 _m	3 _m	4 _m	5 _m
3	1C _m	1B _m	1A _m	2 _m	3 _m	4 _m	5 _m	
4	1B _m	1A _m	2 _m	3 _m	4 _m	5 _m		

Tab.2.1 - Classement en groupes des mécanismes.

- b) Croire que, compte tenu des marges de sécurité imposées aux constructeurs, on peut facilement avec un palan de force 5000 daN, lever 6t et exceptionnellement 7,5t : l'utilisateur met alors en cause non seulement la durée de vie du palan, mais la sécurité du personnel opérateur et sa responsabilité sera en cas d'accident entièrement engagée.

B.3. Vitesse de levage

Elle varie généralement de 3 à 30 m/min, on choisira 30 m/min comme vitesse de levage afin de minimiser la durée du cycle de chargement des fours.

B.4. Course verticale de la benne

Son évaluation est liée à celle de la hauteur de la fosse, elle ne peut donc être évaluée à ce stade.

B.5. Facteur de marche

C'est le rapport entre le temps réel d'utilisation et le temps total de travail. Le tableau 2.2 permet de constater que le groupe des mécanismes choisi correspond au plus grand nombre de démarrages à l'heure, ce qui est tout à fait compatible avec les nécessités de notre usine.

B.6. Conditions de service

Les ponts roulants des usines d'incinération se caractérisent par des conditions de fonctionnement particulièrement sévères, dues au service continu et intensif, dans une atmosphère très poussiéreuse ; par conséquent, le matériel doit être robuste et largement dimensionné.

C/ MOUVEMENT DE DIRECTION

Le mouvement de direction est réalisé au moyen d'un chariot associé au palan et se déplaçant sur une voie de roulement. On distingue :

- Les chariots dont les galets roulent sur l'aile inférieure d'un fer standard de commerce.

Groupe des mécanismes	Facteur de marche (%)	Nombre de démarrages à l'heure
1D _m	15	90
1C _m	20	120
1B _m	25	150
1A _m	30	180
2 _m	40	240
3 _m	50	300
4 _m	60	360
5 _m	60	360

Tab.2.2 - Facteur de marche et fréquence des démarrages à ne pas dépasser en fonction du groupe des mécanismes.

- Les chariots dont les galets roulent sur deux rails carrés (chariots birails).
- Les chariots dont les galets roulent à l'intérieur d'une gaine métallique spéciale, fournie par le constructeur.

Dans le cas du pont roulant, on utilise le plus souvent un chariot birail ; ce dernier est constitué par un bâti métallique, apte à recevoir un palan du type posé à pattes, et muni de quatre galets (deux galets roulant sur chaque rail).

Le mouvement de direction permettant le déplacement de la benne en largeur est assuré au moyen d'un moto-réducteur électrique équipé d'un frein caractérisé par un faible couple pour éviter les balancements de la benne.

La commande du mouvement de direction s'effectue à l'aide de deux boutons (mouvement vers la droite et mouvement vers la gauche), et généralement on prévoit des butoirs mécaniques à chaque extrémité de la voie afin d'éliminer les risques de choc avec les parois de la fosse.

D/ CRITERES DE CHOIX POUR LE MOUVEMENT DE DIRECTION

Il est important de souligner que, la benne chargée étant suspendue au tambour par quatre câbles, l'ensemble constitue un véritable pendule. De ce fait, le moindre déplacement du chariot va provoquer nécessairement des oscillations de la benne. Ces oscillations sont évidemment nuisibles, et peuvent même être dangereuses si l'opérateur donne des impulsions qui les amplifient.

Les deux causes possibles de la naissance de ces oscillations parasites sont :

- un couple de démarrage du moteur trop fort ;
- un couple de freinage du moteur de direction trop fort.

Comme le couple de démarrage est fonction de la vitesse de direction, on doit donc :

- limiter la vitesse de direction ;
- exiger du fournisseur un couple très progressif.

Les vitesses standards proposées par les constructeurs vont de 5 à 30 m/min, et exceptionnellement à 45 ou 50 m/min. Etant donné les restrictions citées ci-dessus, la vitesse de direction ne peut être trop élevée, on choisira donc 30 m/min comme vitesse de direction.

E/ MOUVEMENT DE TRANSLATION

Il est effectué au moyen d'un dispositif comprenant les éléments suivants :

- a) Poutres : le chariot avec palan repose sur une ou plusieurs poutres, les plus courantes sont :

- les poutrelles du commerce ;
 - les poutres-caissons, constituées par quatre tôles soudées en rectangle.
- b) Sommiers : ils sont généralement constitués par des profils en U du commerce, ou des tôles pliées. Les sommiers reçoivent :
- la ou les poutres ;
 - les galets ;
 - les moto-réducteurs ;
 - les butoirs.
- c) Galets : ils sont montés sur les sommiers et assurent ainsi le déplacement du pont par effet du roulement sur des rails normalisés ; les galets sont des éléments facilement remplaçables (comparativement aux rails), il serait donc plus logique que ces derniers soient fabriqués à partir de matériaux moins durs que ceux utilisés pour la réalisation des rails.
La forme des galets dépend de la nature du pont auquel ils sont adaptés :
- Ponts suspendus : les galets sont taillés de la même façon que ceux des chariots monorails et possèdent un seul boudin latéral (fig.2.6.a).
 - Ponts posés : les galets sont généralement à double boudin (fig.2.6.b).
- On utilise également des galets lisses (sans boudin) qui abordent uniquement l'effort vertical, les efforts transversaux étant repris par des contre-galets horizontaux (fig.2.6.c).
- d) Moto-réducteurs : ils assurent l'entraînement des galets moteurs, et peuvent avoir trois dispositions :
- La première consiste à installer un moto-réducteur

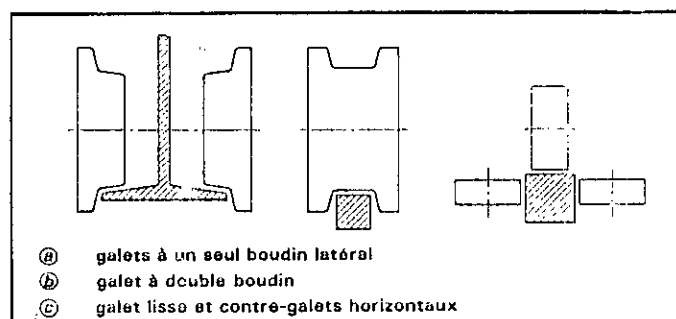


Fig.2.6 - Différentes formes de galets.

central avec deux sorties d'arbres attaquant chacun un galet-moteur sur chaque sommier (fig.2.7). Dans ce cas le synchronisme est réalisé mécaniquement d'une façon très satisfaisante, cette disposition nécessite une place importante et une passerelle de visite, ce qui limite son emploi actuel au

cas de très gros ponts.

- La deuxième est connue sous le nom d'arbre électrique : les deux galets-moteurs sont attaqués chacun par un moto-réducteur avec moteur asynchrone à rotor bobiné, les stators sont reliés au réseau d'alimentation par un conducteur unique.
- La troisième ressemble à la deuxième, mais dans ce cas les rotors ne sont pas bobinés et sont absolument indépendants (fig.2.8).

La dernière disposition a été adoptée avec succès par tous les constructeurs de ponts roulants légers et moyens, catégorie dont font partie les appareils de levage que nous allons choisir.

On doit noter que les moto-réducteurs utilisés doivent être équipés de moteurs assurant un démarrage progressif et un freinage doux afin de limiter les balancements de la benne preneuse.

- e) Fins de course : comme pour le mouvement de direction, on prévoit à chaque extrémité du rail de roulement :
- un fin de course électrique ;
 - un butoir d'extrémité qui interviendra seulement en cas de défaillance du dispositif précédent.

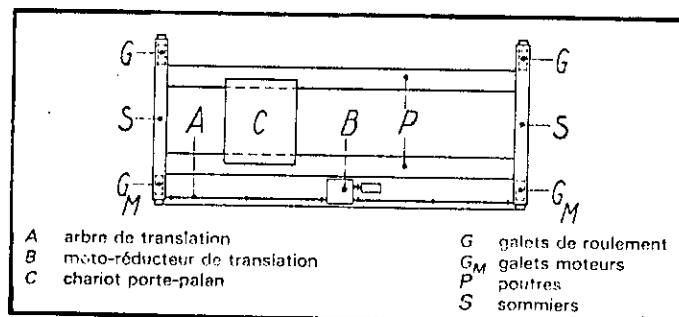


Fig.2.7 - Translation par moteur central.

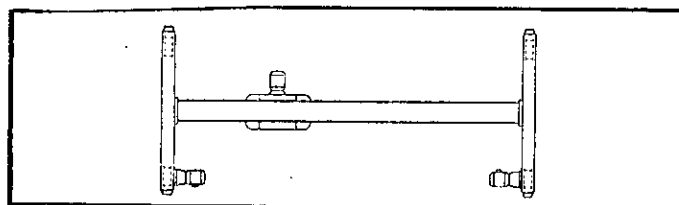


Fig.2.8 - Translation par deux moteurs indépendants.

- f) Commande du mouvement de translation : elle peut être réalisée de diverses façons :
- par boîte pendante au chariot ;
 - par télécommande à distance ;
 - en cabine.

Les conditions de travail auxquelles sont soumis les ponts

roulants dans une usine d'incinération exigent l'installation de tous les dispositifs de commande des différents ponts roulants dans une seule cabine, réalisant ainsi un moyen de communication directe entre les pontiers. La cabine utilisée doit être solidaire au bloc-usine et doit bénéficier d'une vue globale de la fosse.

F/ CRITERES DE CHOIX POUR LE MOUVEMENT DE TRANSLATION

En ce qui concerne le mouvement de translation, le constructeur doit connaître :

- Le groupe des mécanismes : compatible avec celui du mouvement de levage.
- La capacité de charge : identique à celle du palan associé au pont.
- La vitesse de translation : elle peut atteindre facilement 60 m/min, elle est généralement variable en suivant la progression nécessaire du démarrage.

G/ CYCLE DE CHARGEMENT

Un cycle de chargement comprend les opérations élémentaires suivantes :

- prise sur tas ;
- levage, translation (les deux mouvements sont opérés en partie simultanément) ;
- direction vers la trémie, freinage, arrêt ;
- descente sur la trémie, freinage, arrêt ;
- ouverture de la benne preneuse pour vidage dans la trémie ;
- remontée ;
- direction, translation (mouvements simultanés) ;
- descente de la benne, ouverture et achèvement de la translation.

En réalité, la durée d'un cycle de chargement est supérieure à la somme des durées des différentes opérations élémentaires citées ci-dessus du moment que le dégagement de la travée de réception ainsi que le gerbage entre dans le cadre des fonctions d'un pont roulant.

La durée d'un cycle de chargement correspond donc au temps s'écoulant entre deux chargement successifs de la trémie du four, soit :

$$C = NS \times M_b \quad (2.2)$$

avec :

C : capacité horaire maximale du four (50 t/h) ;

NS : nombre de chargements par heure ;

M_b : capacité massique de la benne.

$$M_b = \rho_d \times V_u \quad (2.3)$$

où :

ρ_d : est la masse volumique moyenne des ordures estimée à peu près à $0,5 \text{ t/m}^3$ (§ I.1.3.3.1) ;

V_u : est le volume utile de la benne.

Le nombre de chargements par heure de fonctionnement sera donc :

$$NS = \frac{C}{M_b} = \frac{C}{\rho_d \times V_u} = \frac{50}{0,5 \times 4} = 25 \text{ char/h} \quad (2.4)$$

A partir de là, on peut déterminer la durée du cycle de chargement, soit :

$$\tau = \frac{3600}{NS} = \frac{3600}{25} = 144 \text{ s} = 2,4 \text{ mn} \quad (2.5)$$

A présent, on peut déterminer la largeur et la hauteur de la fosse à partir de la connaissance de la durée du cycle et des paramètres de marche des ponts roulants.

Considérons la benne lorsqu'elle est à l'endroit de la fosse le plus éloigné de la trémie du four (fig.2.9). Admettons en plus que la durée totale des moments : arrêts, freinages, ouvertures et fermetures de la benne par cycle ne dépasse pas 1 mn. On aura alors (fig.2.9) :

$$L^2 + 30^2 = (U_m \times \frac{\tau - 1}{2})^2 \quad (2.6.a)$$

où :

U_m : est la vitesse moyenne du mouvement combiné (translation-direction).

Etant donné que la vitesse correspondant au mouvement de direction a été fixée à 30 m/mn et celle correspondant au mouvement de translation à 60 m/mn , la vitesse U_m sera donc voisine de 45 m/mn .

La largeur pourra être donc déterminée à partir de l'équation (2.6.a) :

$$L = 9,605 \text{ m} \quad (2.6.b)$$

La connaissance du volume total de la fosse nous permet de déduire directement la hauteur h de la fosse :

$$h = \frac{V_{ps}}{L \times l} = \frac{16000}{9,605 \times 80} = 20,822 \text{ m} \quad (2.7)$$

où :

l est la longueur de la fosse.

Notons qu'on a pris en considération le plus grand volume (16000 m^3) et cela afin de disposer d'une fosse largement dimensionnée.

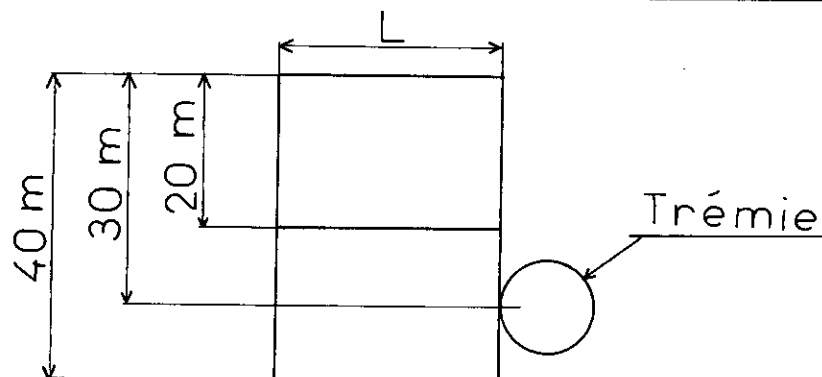


Fig.2.9 - Position de la trémie.

II.2.3. FOURS

II.2.3.1. DESCRIPTION GENERALE (fig.2.10)

Un four à incinération se compose essentiellement de la grille et ses annexes et de la chambre de combustion.

A/ GRILLE ET ANNEXES

Cet ensemble comporte :

- Un dispositif d'introduction des déchets dans le foyer, constitué par une trémie ayant la forme d'un tronc de pyramide renversé et une goulotte ayant la forme d'une gaine. La trémie doit avoir une ouverture suffisante afin d'éviter les débordements lors des chargements du four. La goulotte doit être aussi large que possible pour que les gros objets puissent y passer.
- Une ou plusieurs grilles permettant la combustion des ordures au moyen de l'air primaire soufflé sous ces mêmes grilles.
- Un dispositif d'avancement des ordures.

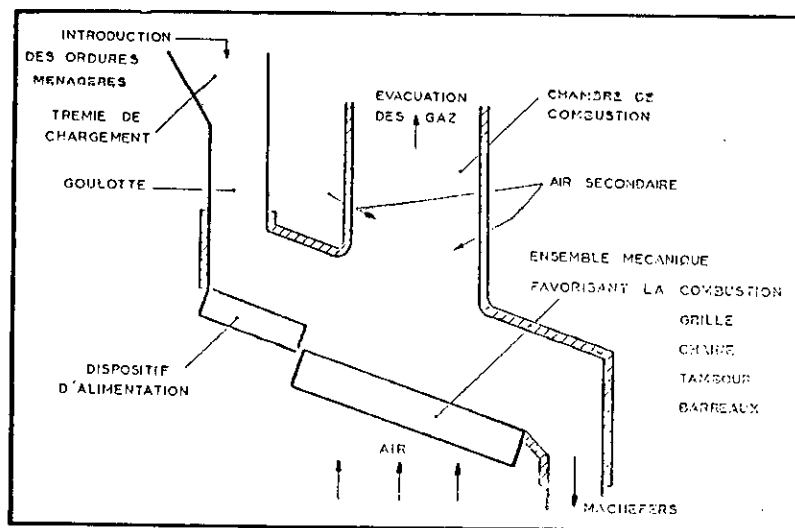


Fig.2.10 - Schéma général d'un four.

- Un dispositif de retournement des ordures.

B/ CHAMBRE DE COMBUSTION

La chambre de combustion est située au dessus des grilles et est formée de parois revêtus intérieurement de réfractaires. Elle permet de réaliser un mélange intime entre l'air secondaire introduit au dessus des grilles et les gaz imparfaitement brûlés pour permettre l'achèvement de la combustion. Une ouverture dans la chambre de combustion permet l'évacuation des gaz, vers la chaudière de récupération.

II.2.3.2. DIMENSIONNEMENT

La catégorie des fours à laquelle on s'intéresse est caractérisée par un fonctionnement continu étant donné que la capacité d'incinération est très importante. Cependant, les fours les plus performants n'excède guère une capacité de 50 t/h. Notre installation comportera donc deux fours de 50 t/h chacun. Il existe plusieurs types de fours répondant à ces conditions. On choisit parmi eux le four à grilles sans fin (à tapis continu) (fig.2.11). Il est caractérisé par une surface de combustion constituée de trois grilles mécaniques à tapis mobile disposées en escaliers, offrant ainsi un moyen adéquat d'avancement et de retournement des ordures.

La première grille, légèrement inclinée, a pour fonction:

- d'alimenter le four ;
- de permettre leur séchage en les exposant le temps nécessaire au rayonnement des parois du four et des gaz de combustion ;
- de permettre l'amorçage de la combustion.

Les deux autres grilles sont horizontales et servent à la combustion proprement dite. Notons que ce four dispose d'un moyen de réglage du débit d'air ainsi que de la vitesse d'avancement des tapis et ce en fonction de la charge.

Le dimensionnement thermique du four est assujetti aux critères suivants :

- La charge pondérale incinérée au mètre carré de surface de grille : de 250 à 450 kg d'ordures par m² et par heure.
- La charge calorifique au m² de surface utile de grille : de 500000 à 900000 kcal par m² et par heure.
- La charge calorifique au m³ de la chambre de combustion : de 80000 à 150000 kcal par m³ et par heure.

Le pouvoir calorifique des ordures ménagères à traiter étant fixé à 2000 kcal/kg et compte tenu de la capacité horaire

du four, on aura : une surface de 111,111 m² des grilles et un volume de 1250 m³ de chambre de combustion pour chaque four.

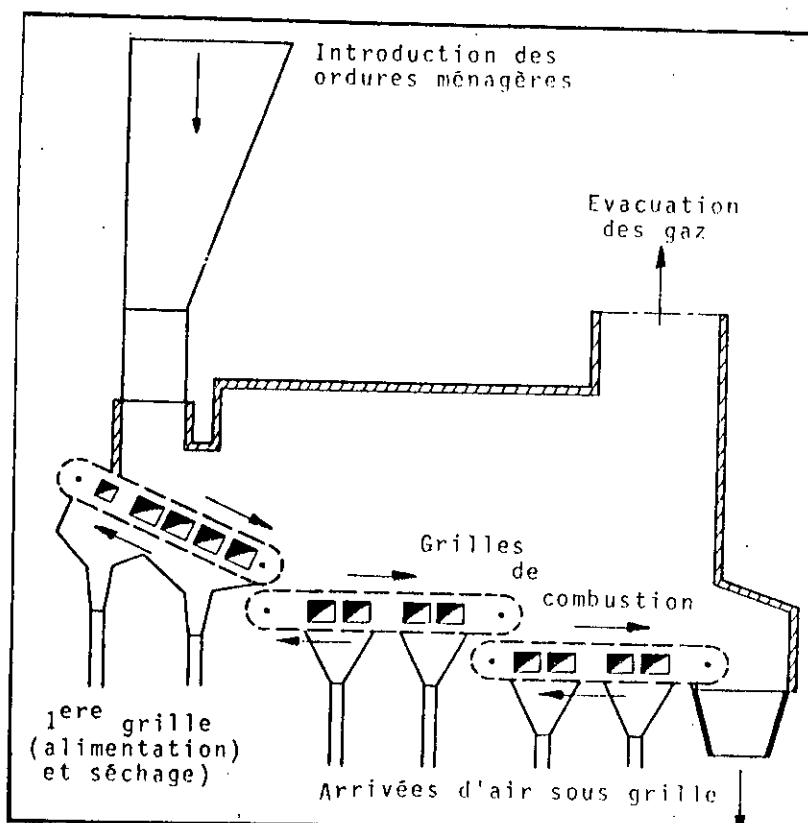


Fig.2.11 - Four à grilles sans fin Stein Industrie.

CHAPITRE III

LES CHAUDIERES A VAPEUR

III.1. INTRODUCTION

Auparavant, l'incinération consistait à opérer une combustion des résidus permettant de réaliser une réduction importante du volume du produit obtenu (environ 10 % du volume initial).

Actuellement, l'introduction d'un échangeur de chaleur ayant pour objet la récupération de la chaleur des fumées s'est avérée avantageuse ; cette chaleur pouvant ensuite être transformée à son tour en travail ou être utilisée comme telle dans l'industrie ou les réseaux de chauffage.

L'usine, pour le dimensionnement de laquelle, ce travail est en cours d'élaboration consiste non seulement à générer de l'électricité mais aussi de la vapeur d'eau avec des caractéristiques bien définies pour une industrie donnée. Le fait que dans notre cas le combustible est constitué par les déchets urbains attribue à notre chaudière un caractère spécifique.

III.2. CALCUL PRELIMINAIRE

Avant de commencer l'étude de la chaudière à vapeur, il est nécessaire de déterminer quelques paramètres (volume d'air théorique, excès d'air, volume des fumées, etc...) qui seront utilisés par la suite dans le calcul.

III.2.1. VOLUME D'AIR THEORIQUE (fig.3.1)

Il existe deux formules pour la détermination d'une valeur approchée de la quantité d'air théorique en combustion neutre; la première a été établie par Rosin et Fehling et est basée sur des statistiques (3.1) ; la seconde est une formule mnémotechnique qui a été établie par Véron (3.2) :

$$V_a = 1,01 \frac{PCI}{1000} + 0,5 \quad [Nm^3/kg] \quad (3.1)$$

$$V_a = \frac{PCI}{1000} \quad [Nm^3/kg] \quad (3.2)$$

où PCI = 2000 kcal/kg.

L'abaque de la fig.3.1 montre que la moyenne des deux volumes donne une bonne approximation du volume d'air théorique

$$V_a = 2,260 Nm^3/kg \quad (3.3)$$

III.2.2. EXCES D'AIR

L'excès d'air a pour but :

- d'assurer une combustion complète ;
- de limiter la température des gaz dans la chambre de combustion à une valeur inférieure ou égale à 1000°C (on prendra cette température égale à 950°C).

D'après la référence [2], l'excès d'air dans le cas d'une installation de récupération est environ 80 % du volume d'air théorique. Ce pourcentage a été choisi afin d'obtenir une température de l'ordre de 800°C au sommet de la chambre de combustion. Le volume d'air réel sera donc égal à :

$$V_{ar} = V_a + 0,8 \times V_a = 2,26 + 0,8 \times 2,26 = 4,068 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3.4)$$

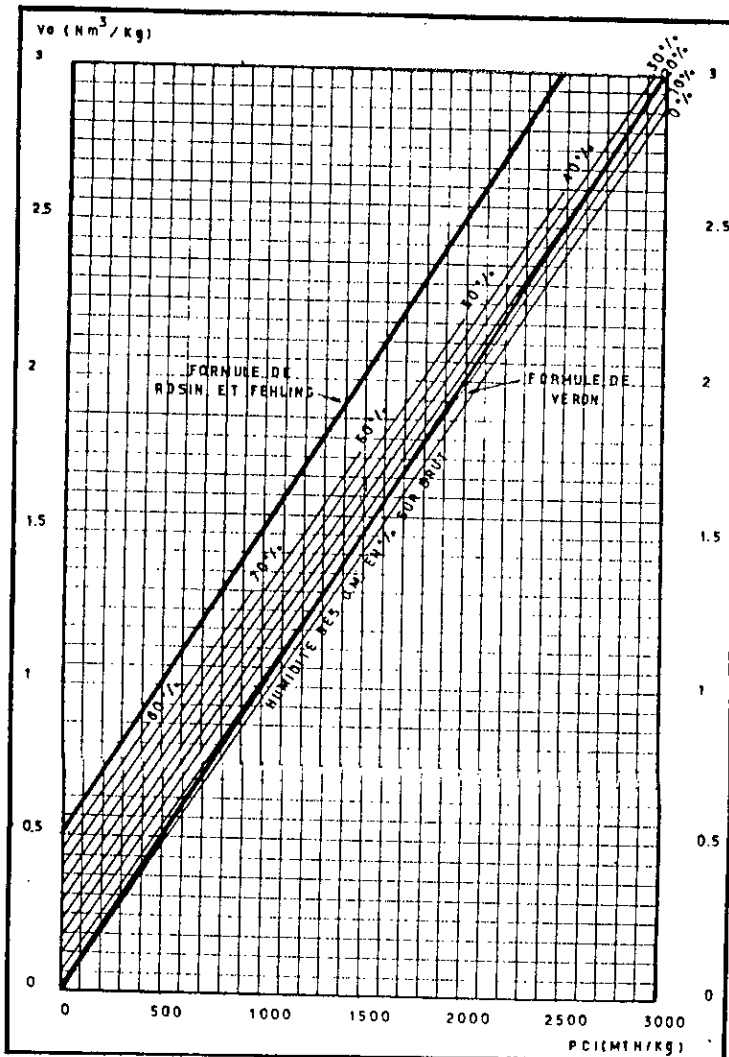


Fig.3.1 - Volume d'air théorique pour une combustion neutre.

III.2.3. VOLUME DES FUMÉES

Les gaz résultant de la combustion mélangés au surplus d'air constituent ce qu'on appelle les fumées. Le volume de ces dernières est donné par une formule empirique [1] :

$$V_f = \frac{3PCI}{1000} \quad [Nm^3/kg] \quad (3.5.a)$$

où :
[PCI] = kcal/kg.

$$V_f = 6Nm^3/kg \quad (3.5.b)$$

III.2.4. COMPOSITION DES FUMÉES [1]

La composition massique des fumées se dégageant lors de la combustion de déchets solides est la suivante :

azote : $X(N_2) = 65 \text{ à } 75 \%$;

oxyde de carbone : $X(CO_2) = 6 \text{ à } 14 \%$;

oxygène : $X(O_2) = 6 \text{ à } 14 \%$;

vapeur d'eau : $X(H_2O) = 5 \text{ à } 15 \%$.

De plus, on a toujours en volume [1]:

$$Y(CO_2) + Y(O_2) = 19,5 \% \quad (3.6)$$

L'oxygène contenu dans les fumées provient de l'excès d'air, son volume est donc de :

$$0,208 \times 0,8 \times V_a \text{ soit : } 0,376 Nm^3/kg$$

$$\text{d'où, } Y(O_2) = 100 \times \frac{0,376}{V_f} = 100 \times \frac{0,376}{6}$$

soit :

$$Y(O_2) = 6,267 \% \quad (3.7)$$

d'où :

$$Y(CO_2) = 13,233 \% \quad (3.8)$$

Il reste maintenant à déterminer le pourcentage volumique de N_2 et de H_2O .

Si :

m_i est la masse du composant i ;

m , la masse du mélange (fumées) ;

Nm_i , le nombre de mole du composant i contenu dans un volume déterminé du mélange ;

Nm , le nombre de mole total du mélange contenu dans le même volume ;

μ_i , la masse molaire du composant i ;

et μ , la masse molaire apparente du mélange ;

on aura :

$$Y_i = \frac{Nm_i}{Nm} = X_i \frac{\sum Y_i \times \mu_i}{\mu_i} \quad (3.9)$$

$$Y(H_2O) = X(H_2O) \left[\frac{Y(H_2O) \times \mu(H_2O) + Y(N_2) \times \mu(N_2)}{\mu(N_2) H_2O} + \frac{Y(O_2) \times \mu(O_2) + Y(CO_2) \times \mu(CO_2)}{\mu(N_2) H_2O} \right]$$

$$Y(N_2) = X(N_2) \left[\frac{Y(H_2O) \times \mu(H_2O) + Y(N_2) \times \mu(N_2)}{\mu(N_2)} + \frac{Y(O_2) \times \mu(O_2) + Y(CO_2) \times \mu(CO_2)}{\mu(N_2)} \right]$$

Un calcul itératif montre que ces deux équations sont satisfaites pour une valeur de $X(N_2)$ située entre 65 et 70 % ; prenons :

$$X(N_2) = 68 \%$$

Le système global permettant de déterminer $Y(N_2)$ et $Y(H_2O)$ sera donc le suivant :

$$Y(H_2O) = X(H_2O) \left[\frac{Y(H_2O) \times \mu(H_2O) + Y(N_2) \times \mu(N_2)}{\mu(H_2O)} + \frac{Y(O_2) \times \mu(O_2) + Y(CO_2) \times \mu(CO_2)}{\mu(H_2O)} \right] \quad (3.10.a)$$

$$Y(N_2) = X(N_2) \left[\frac{Y(H_2O) \times \mu(H_2O) + Y(N_2) \times \mu(N_2)}{\mu(N_2)} + \frac{Y(O_2) \times \mu(O_2) + Y(CO_2) \times \mu(CO_2)}{\mu(N_2)} \right] \quad (3.10.b)$$

$$X(N_2) = 0,68 \quad (3.10.c)$$

$$Y(H_2O) + Y(N_2) = 80,5 \% \quad (3.10.d)$$

d'où :

$$X(N_2) = 0,68 \quad (3.11)$$

$$Y(N_2) = 71,5 \%$$

$$X(H_2) = 0,55 \quad (3.11)$$

$$Y(H_2O) = 9 \%$$

III.3. CONSTITUTION DE LA CHAUDIERE A VAPEUR (fig.3.2)

Afin de permettre une récupération adéquate de la chaleur dégagée lors de la combustion, on se propose d'adopter une chaudière constituée des éléments suivants :

A/ LES ECRANS D'EAU

Ensemble de tubes parallèles disposés sur la paroi de la chambre de combustion, qui elle est construite en céramique minimisant les pertes de chaleur vers l'extérieur et favorisant le rayonnement vers les écrans. Ces écrans sont situés avant l'économiseur, ils offrent ainsi un moyen permettant d'élever la température de l'eau d'alimentation de 100 à 150°C.

On doit noter qu'il est nécessaire d'installer un dégazeur entre les écrans et l'économiseur afin de soutirer les gaz apparaissant du fait du chauffage de l'eau.

B/ LE SURCHAUFFEUR

Alimenté par la vapeur saturée issue du ballon supérieur, il élève la température de cette dernière jusqu'à la valeur désirée, c'est-à-dire celle que la vapeur doit avoir à l'entrée de la turbine où elle devra se détendre partiellement pour produire de l'énergie électrique avant d'être dirigée vers le process industriel pour lequel elle est finalement destinée.

C/ LE FAISCEAU VAPORISATEUR

Constitué essentiellement d'un ballon supérieur contenant de la vapeur d'eau et d'un ballon inférieur contenant de l'eau liquide. Ces deux ballons sont reliés entre eux par des tubes offrant ainsi un mécanisme de génération de vapeur basé tout simplement sur le principe gravitationnel.

D/ L'ECONOMISEUR

C'est un échangeur de chaleur permettant d'approcher la température de saturation, ce qui améliore le rendement thermique de l'ensemble four-chaudière.

L'eau d'alimentation doit être introduite dans

l'économiseur à une température de l'ordre de 150°C ; cette température est nécessaire pour le dégazage préalable de l'eau.

E/ LE RECHAUFFEUR D'AIR

Généralement, le rechauffeur d'air est placé après l'économiseur. Néanmoins, la température des fumées à sa sortie doit être supérieure à 80°C pour éviter la condensation des fumées acides qui constituent un facteur de corrosion très important.

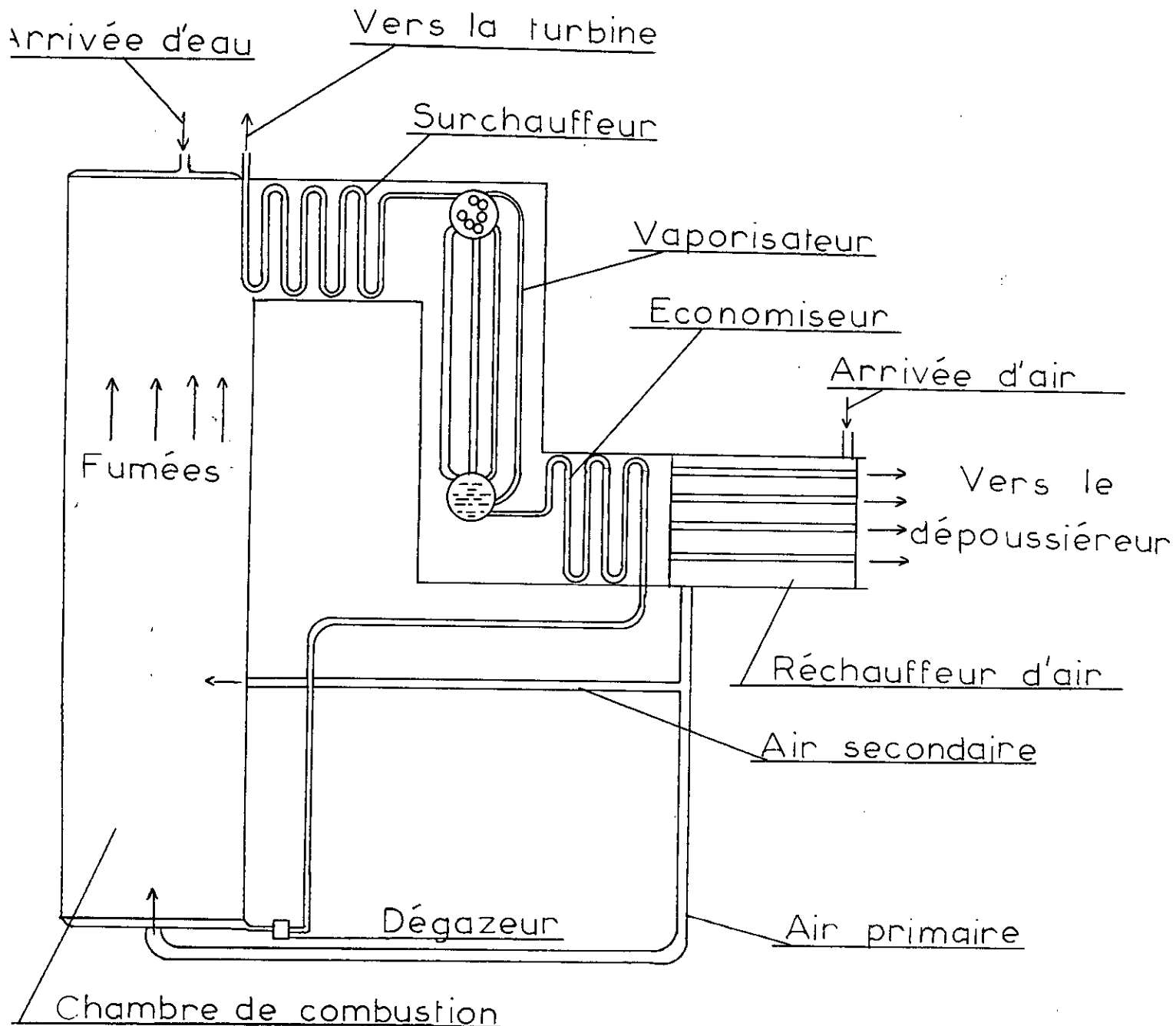


Fig.3.2 - Schéma général de la chaudière.

Il est nécessaire d'indiquer, que tous les composants de la chaudière sont des échangeurs à courants croisés :

- L'eau traverse le composant en passant dans des tubes dont le nombre et la configuration sont bien déterminés.
- Les fumées passent à travers un corps qui englobe les tubes d'eau, réalisant ainsi le transfert de chaleur.

III.4. EVALUATION DES PERTES DE PRESSION

Les pertes de pression étant un phénomène inévitable, il est donc indispensable de déterminer la pression à l'entrée et à la sortie de chaque échangeur. Pour ce faire, on adopte les pourcentages de pertes suivants :

les pertes de pression dans le surchauffeur sont de 9 % ;
 les pertes de pression dans le vaporisateur sont de 8,5 % ;
 les pertes de pression dans l'économiseur sont de 1,2 % ;
 les pertes de pression dans les écrans d'eau sont de 1,2 %.

La pression de la vapeur à fournir par la chaudière doit être égale à 40 bars d'où :

- surchauffeur

$$\frac{P_{s0} - P_{s1}}{P_{s0}} = 0,09 \quad (3.12.a)$$

$$P_{s0} = \frac{P_{s1}}{1 - 0,09} = \frac{40}{1 - 0,09} \approx 44 \text{ bars} \quad (3.12.b)$$

- vaporisateur

$$\frac{P_{v0} - P_{v1}}{P_{v0}} = 0,085 \quad (3.13.a)$$

$$P_{v0} = \frac{P_{v1}}{1 - 0,085} = \frac{44}{1 - 0,085} \approx 48 \text{ bars} \quad (3.13.b)$$

- économiseur

$$\frac{P_{e0} - P_{e1}}{P_{e0}} = 0,012 \quad (3.14.a)$$

$$P_{e0} = \frac{P_{e1}}{1 - 0,012} = \frac{48}{1 - 0,012} \approx 49 \text{ bars} \quad (3.14.b)$$

- écrans d'eau

$$\frac{P_{c0} - P_{c1}}{P_{c0}} = 0,012 \quad (3.15.a)$$

$$P_{c0} = \frac{P_{c1}}{1 - 0,012} = \frac{49}{1 - 0,012} \approx 50 \text{ bars} \quad (3.15.b)$$

On se propose l'évolution thermodynamique suivante :

- 1/ écrans d'eau : (100°C , 50 bars) → (150°C , 49 bars) ;
- 2/ économiseur : (150°C , 49 bars) → (230°C , 48 bars) ;
- 3/ vaporisateur : (230°C , 48 bars) → (255,84°C , 44 bars) à l'état de vapeur saturée ;
- 4/ surchauffeur : (255,84°C , 44 bars) → (400°C , 40 bars).

III.5. TAUX DE PRODUCTION DE VAPEUR

Le rendement thermique d'une installation de production de vapeur est défini par :

$$\eta = \frac{H_{s1} - H_{c0}}{\dot{m}_d \times PCI} = \frac{\phi \times \Delta H_v}{\dot{m}_d \times PCI} \quad (3.16)$$

Dans le cas des usines d'incinération avec récupération de chaleur ce rendement est fixé à 80 % [1], d'où :

$$\phi = \frac{0,8 \times 100 \times 2000}{767,885 - 101,008} = 239,924 \text{ t/h} = 66,646 \text{ kg/s} \quad (3.17)$$

Le taux de production de vapeur aura donc pour valeur :

$$\frac{\phi}{\dot{m}_d} = \frac{239,924}{100} = 2,399 \frac{\text{kg de vapeur}}{\text{kg d'ordures}} \quad (3.18)$$

Etant donné que le système de combustion est constitué de deux fours, ayant une très grande capacité d'incinération, il serait préférable que la génération de vapeur se fasse au moyen de deux systèmes four-chaudière identiques. Le débit de vapeur par chaudière sera donc :

$$\dot{m}_v = 33,323 \text{ kg/s} \quad (3.19)$$

III.6. LES ECRANS D'EAU

Le rôle de ces écrans est de relever la température de l'eau d'alimentation à une certaine valeur afin de se débarrasser des gaz dissous dans cette dernière.

III.6.1. TEMPERATURE DE SORTIE DES FUMÉES

Afin d'estimer l'ordre de grandeur de la température des fumées lorsqu'elles quittent la chambre de combustion, on

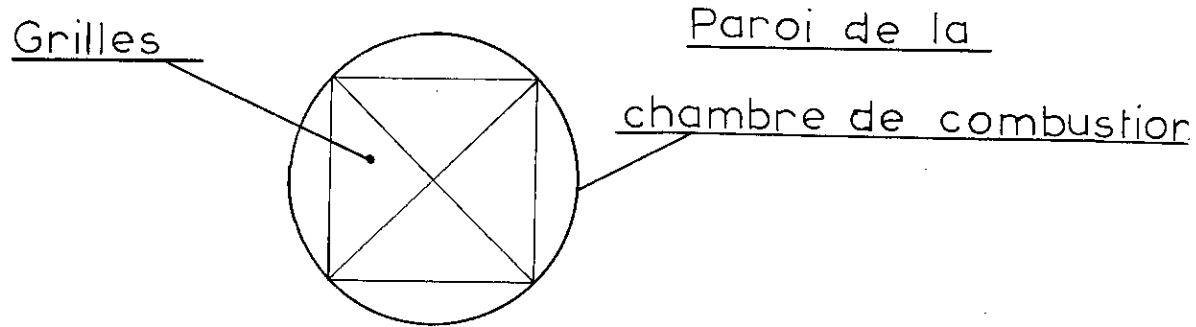


Fig.3.3 - Section transversale de la chambre de combustion.

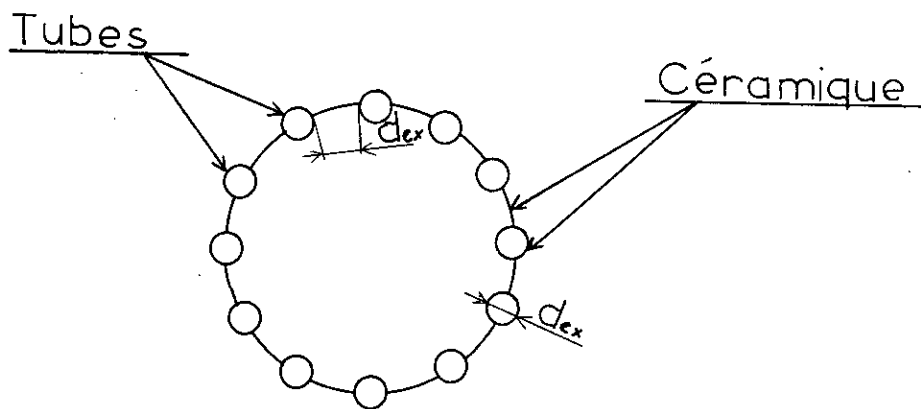


Fig.3.4 - Paroi de la chambre de combustion.

La surface d'échange totale est :

$$S_c = n_c \times \frac{\pi \times d_{ex}}{2} \times l_c = 391 \times \frac{\pi \times 0,06}{2} \times 7,162 \quad (3.27.a)$$

$$S_c = 263,926 \text{ m}^2 \quad (3.27.b)$$

III.6.3. COEFFICIENT DE TRANSMISSION GLOBAL

Les phénomènes de transfert de chaleur sont représentés par la formule suivante :

$$Q_c = k \times S_c \times \Delta t_m \times F \quad (3.28)$$

avec :

- Q_c : chaleur échangée dans les écrans d'eau ;
- k : coefficient de transmission global de chaleur ;
- Δt_m : différence de température moyenne logarithmique pour un échangeur à contre courants ;
- F : facteur de correction qu'on doit introduire chaque fois qu'il s'agit d'un écoulement en courants croisés.

A/ Différence de température moyenne logarithmique

Par définition :

$$\Delta t_m = \frac{(T_{c0} - t_{c1}) - (T_{c1} - t_{c0})}{\ln \frac{T_{c0} - t_{c1}}{T_{c1} - t_{c0}}} \quad (3.29)$$

$$\Delta t_m = \frac{(950 - 150) - (894,860 - 100)}{\ln \frac{950 - 150}{894,860 - 100}} = 797,427 \text{ } ^\circ\text{C}$$

B/ Coefficient de correction

L'abaque de la fig.3.5 donne le coefficient de correction en fonction des températures des deux fluides :

$$P = \frac{150 - 100}{950 - 100} = 0,059 \quad (3.30.a)$$

$$R = \frac{950 - 894,860}{150 - 100} = 1,103 \quad (3.30.b)$$

$$F = 0,99 \quad (3.30.c)$$

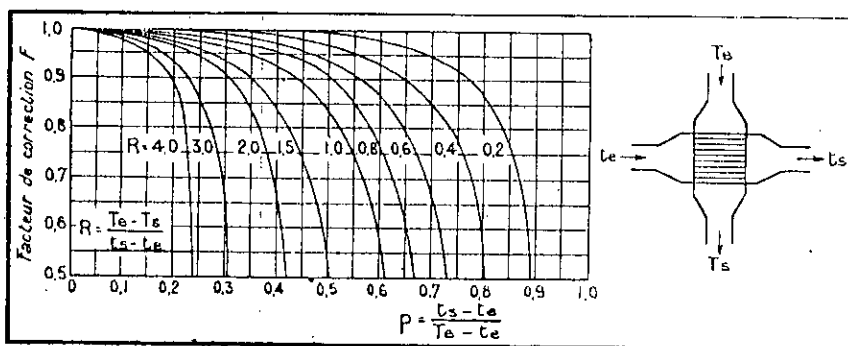


Fig.3.5 - Coefficient de correction pour les échangeurs à courants croisés.

On peut maintenant calculer le coefficient de transmission global :

$$k = \frac{Q_c}{S_c \times \Delta t_m \times F} \quad (3.28)$$

$$k = \frac{33,323 \times (151,063 - 101,008) \times 3600}{263,926 \times 797,427 \times 0,99} = 28,819 \text{ Kcal/hm}^2\text{c}$$

III.7. LE SURCHAUFFEUR

Le passage de la vapeur d'eau à travers le surchauffeur a pour but de porter la température de la vapeur à sa valeur maximale. Il est donc important de faire un choix judicieux du matériau qu'on utilisera pour la construction du surchauffeur.

Généralement, les surchauffeurs sont constitués de tubes, de diamètre extérieur variant entre 25 et 60 mm, dans lesquels la vapeur circule avec une vitesse de 20 à 50 m/s.

D'après la référence [2], l'acier doux convient très bien pour une température de surchauffe ne dépassant pas 450°C ; ceci convient parfaitement à notre cas.

La fig.3.6 représente le schéma général d'un surchauffeur où on remarque l'existence de deux collecteurs qui servent à relier entre eux les tubes du surchauffeur et qui sont à l'extérieur du circuit des fumées.

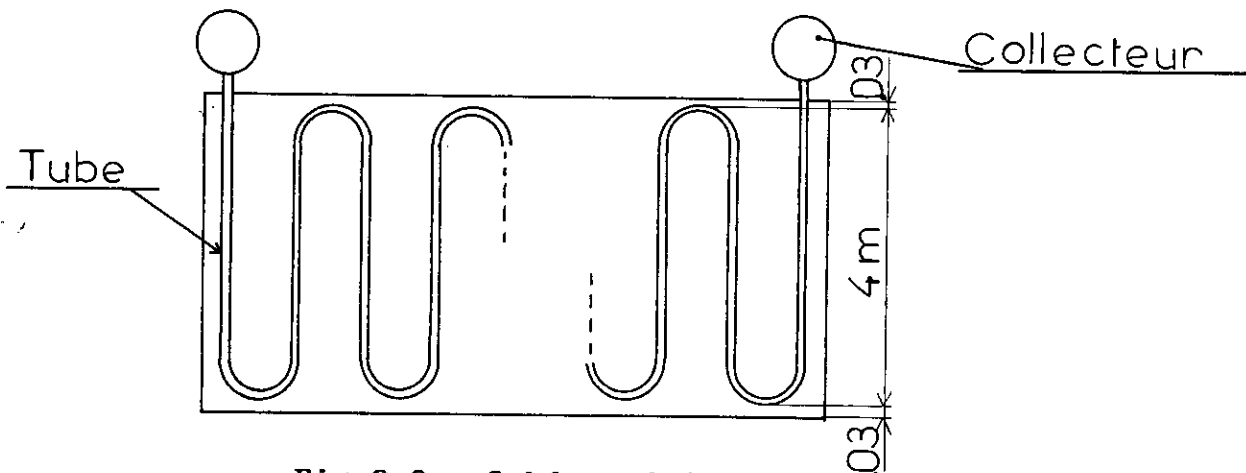


Fig.3.6 - Schéma général du surchauffeur.

III.7.1. TEMPERATURE DE SORTIE DES FUMÉES

$$T_{s1} = T_{s0} - \frac{\dot{m}_v \times \Delta H_v}{C \times V_f \times C_{pf}} \tag{3.31}$$

$$T_{s1} = 894,860 - \frac{33,323 \times (767,885 - 668,712) \times 3600}{6 \times 10^3 \times 50 \times 0,363} = 785,613^\circ\text{C}$$

III.7.2. NOMBRE DE TUBES

Etant donné que le volume spécifique à la sortie est le

plus grand, cette dernière sera le siège du calcul. D'autre part la vitesse de la vapeur dans le surchauffeur est couramment prise égale à 40 m/s. On aura alors :

$$S_p = \frac{\dot{m}_v \times v_s}{U} = \frac{33,323 \times 0,07341}{40} = 0,061 \text{ m}^2 \quad (3.32)$$

et le nombre de tubes :

$$n_s = \frac{S_p}{\frac{\pi \times d_{in}^2}{4}} = \frac{0,061}{\frac{\pi \times (0,05)^2}{4}} = 32 \text{ tubes} \quad (3.33)$$

sachant qu'on a choisi des tubes de 50÷60 mm.

Un calcul de vérification reste nécessaire afin de s'assurer que l'épaisseur des tubes choisis résiste à la pression d'utilisation.

L'épaisseur minimale des tubes est donnée par la formule suivante [2] :

$$e = \frac{1}{2} \frac{d_{in} \times P}{0,8 \times \alpha \times R - 0,6 \times P} + c \quad (3.34)$$

avec :

P : la pression effective en kg/mm² ;

R : contrainte admissible du métal (pour l'acier doux, R = 10,55 kg/mm²) ;

c : surépaisseur tenant compte de la tolérance de fabrication et de la corrosion (c = 2 mm) ;

α : coefficient dépendant des tubes (pour des tubes non soudés α = 1).

$$e = \frac{1}{2} \frac{50 \times 0,44}{0,8 \times 1 \times 10,55 - 0,6 \times 0,44} + 2 = 3,345 \text{ mm} \quad (3.35)$$

On remarque que e est inférieur à (d_{ex} - d_{in})/2 ; ce qui indique la validité de notre choix.

III.7.3. DIAMETRE ET LONGUEUR DES COLLECTEURS (fig.3.7)

Généralement, on adopte 50 m/s comme vitesse dans les collecteurs, d'où une section égale à :

$$S_{cl} = \frac{\dot{m}_v \times v_s}{U} = \frac{33,323 \times 0,07341}{50} = 0,049 \text{ m}^2 \quad (3.36)$$

Le diamètre intérieur du collecteur sera donc :

$$d_{cl} = \sqrt{\frac{4 \times S_{cl}}{\pi}} = 0,250 \text{ m} \quad (3.37)$$

L'épaisseur de la paroi du collecteur est donnée par la formule empirique suivante [2] :

$$e_{cl} = \frac{1}{2} \frac{\frac{d_{cl} \times P}{\alpha \times (b - d_{ex}) \times R} + c}{d_{ex} \times (1 - \frac{\sin^2 \alpha^o}{2})} - 0,6 \times P \quad (3.38)$$

avec :

$$b = 1,7d_{cl} ;$$

$$\alpha^o = 0^o \text{ (tubes en ligne) ;}$$

$$d_{ex} = 60 \text{ mm ;}$$

α prend la valeur 0,9 (cas des tubes soudés).

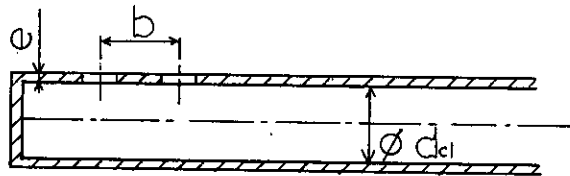


Fig.3.7 - Section longitudinale du collecteur.

$$e = \frac{1}{2} \frac{250 \times 0,44}{0,9 \times (1,7 \times 250 - 60) \times 10,55 - 0,6 \times 0,44} + 2 = 2,86 \text{ mm}$$

Pour faciliter ~~et~~ ^à ~~avantages~~ la soudure des tubes au collecteur et pour plus de sécurité on adopte :

$$e = 5 \text{ mm} \quad (3.39)$$

La longueur du collecteur est égale à :

$$L_{cl} = n_s \times b = 32 \times 1,7 \times 0,250 = 13,577 \text{ m} \quad (3.40)$$

III.7.4. COEFFICIENT DE TRANSMISSION GLOBAL

$$Q_B = k \times S_B \times \Delta t_m \times F \quad (3.41)$$

A/ Différence de température moyenne logarithmique

$$\Delta t_m = \frac{(T_{s0} - t_{s1}) - (T_{s2} - t_{s0})}{\ln \frac{T_{s0} - t_{s1}}{T_{s2} - t_{s0}}} = 512,119^{\circ}C \quad (3.42)$$

B/ Coefficient de correction

$$P = \frac{400 - 255,84}{894,860 - 255,84} = 0,23 \quad (3.43.a)$$

$$R = \frac{894,860 - 785,613}{400 - 255,84} = 0,76 \quad (3.43.b)$$

$$F = 0,99 \quad (3.43.c)$$

C/ Coefficient de transmission global

k est donné par :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{bn} + \alpha_{rn}} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{e}{\lambda}} \quad (3.44.a)$$

avec :

α_{bn} : coefficient de conductibilité des fumées ;

α_{rn} : coefficient de rayonnement des fumées ;

α_1 : coefficient de convection de la vapeur ;

e : épaisseur du tube ;

λ : coefficient de conductibilité de l'acier ($\lambda = 50$ kcal/hm°C).

La conductibilité des fumées est donnée par la formule suivante [2] :

$$\alpha_{bn} = 0,284 \times f_a \times f_n \times \frac{C_{tm}}{d_h} \times R_e^{0,61} \quad (3.45)$$

avec :

f_a : coefficient dépendant de l'arrangement des tubes ($f_a = 1$ dans le cas d'un arrangement en ligne) ;

f_n : coefficient dépendant du nombre de rangées ;

C_{tm} : conductibilité des fumées à la température moyenne de ces dernières ;

d_h : diamètre hydraulique ;

R_e : nombre de Reynolds.

La température moyenne des fumées est :

$$T_{mf} = \frac{T_{s1} + T_{s0}}{2} + 273 = 1113,237^{\circ}C \quad (3.46)$$

A cette température, la viscosité dynamique et la masse volumique des fumées sont respectivement :

$$\mu_f = 4,22 \times 10^{-5} \text{ kg/ms et } \rho_f = 0,35 \text{ kg/m}^3 \quad (3.47)$$

La section de passage des fumées est donnée par :

$$S_p = [(L_{cl} + n_s \times 0,06) \times 4 + 2 \times 0,03 \times L_{cl}] \quad [m^2] \quad (3.48)$$

$$S_p = [(13,577 + 32 \times 0,06) \times 4 + 2 \times 0,03 \times 13,577] = 62,804 \text{ m}$$

Le périmètre mouillé se calcule par :

$$P_m = 2 [(L_{cl} + 4,06) + n_s \times (4 + 0,06)] \quad [m] \quad (3.49.a)$$

$$P_m = 2 [(13,577 + 4,06) + 32 \times (4 + 0,06)] = 295,115 \text{ m} \quad (3.49.b)$$

Le diamètre hydraulique d_h sera donc :

$$d_h = \frac{4 \times S_p}{P_m} = \frac{4 \times 62,804}{295,115} = 0,851 \text{ m} \quad (3.50)$$

La vitesse des fumées dans les usines d'incinération est très faible, elle est de l'ordre de 3 à 4 m/s [1]. On prendra donc U égale à 3,5 m/s. Ce qui donne pour le nombre de Reynolds

$$R_o = \frac{d_h \times U \times \rho_f}{\mu_f} \quad (3.51.a)$$

$$R_o = \frac{0,851 \times 3,5 \times 0,35}{4,22 \times 10^{-5}} = 0,247 \times 10^5 \quad (3.51.b)$$

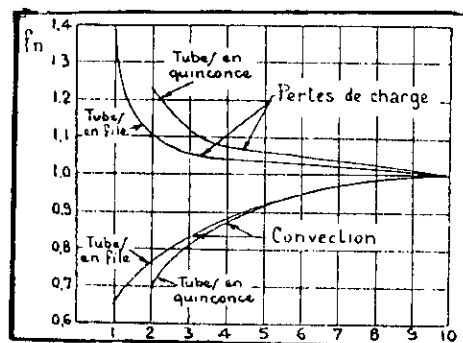


Fig.3.8 - Valeurs du coefficient f_n

L'abaque de la fig.3.8 montre que pour $n = 32$ tubes, f_n est égal à l'unité. Pour une température T_{mf} égale à $1113,237^\circ\text{K}$, la conductibilité des fumées prend la valeur de $0,054 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$.

On peut maintenant déterminer la valeur de α_{bn} :

$$\alpha_{bn} = 0,284 \times 1 \times 1 \times \frac{0,054}{0,851} \times (0,247 \times 10^5)^{0,61} = 8,616 \text{ kcal/hm}^2\text{C}$$

Le rayonnement à travers la paroi des tubes s'exprime par la relation :

$$(T_{mf} - T_{mp}) \times \alpha_{rn} = \sigma_0 \times [e_f \times T_{mf}^4 - e_p \times T_{mp}^4] \quad (3.52.a)$$

$$\text{d'où : } \alpha_{rn} = \frac{\sigma_0 \times (e_f \times T_{mf}^4 - e_p \times T_{mp}^4)}{(T_{mf} - T_{mp})} \quad (3.52.b)$$

avec :

$$\sigma_0 = 4,88 \cdot 10^{-8} \text{ kcal/hm}^2\text{K}^4 ;$$

e_f : facteur d'émission total des fumées à T_{mf} ;

e_p : facteur d'émission total de la paroi à T_{mp} .

La différence de température entre la paroi et la vapeur est de l'ordre de 70°C [3], on aura alors :

$$T_{mp} = \frac{(t_{s0} + 70) + (t_{s1} + 70)}{2} + 273 = 670,92^\circ\text{C} \quad (3.53)$$

Le facteur d'émission total des fumées est égal à :

$$e_f = e_{ef} + e_{cf} - \Delta e_f \quad (3.54.a)$$

avec :

e_{ef} : facteur d'émission de la vapeur d'eau contenue dans les fumées ;

e_{cf} : facteur d'émission de l'oxyde de carbone contenu dans les fumées ;

Δe_f : facteur de correction.

La détermination de e_{ef} , e_{cf} et Δe_f se fait à partir des abaques représentés par les fig.3.9.a, 3.9.b et 3.10 : L prend la valeur de 0,93 pour la vapeur d'eau et la valeur de 0,85 pour l'oxyde de carbone [5].

$$P_{e1} \times L = 0,09 \times 1 \times 0,93 = 0,084 \quad (3.55.a)$$

$$P_{ct} \times L = 0,132 \times 1 \times 0,85 = 0,112 \quad (3.55.b)$$

$$e_{ef} = 0,105 \quad (3.56.a)$$

$$\epsilon_{ct} = 0,12 \quad (3.56.b)$$

$$\Delta\epsilon_r = 0,01 \quad (3.56.c)$$

alors :

$$8\epsilon_r = 0,215 \quad (3.54.b)$$

En ce qui concerne la paroi, la lecture sur les abaques (fig.3.9.a, 3.9.b et 3.10) se fait en remplaçant $(P_{e1}.L)$ par $(P_{e1}.L)'$ et $(P_{ct}.L)$ par $(P_{ct}.L)'$, tels que :

$$(P_{e1} \times L)' = (P_{e1} \times L) \frac{T_{mf}}{T_{mp}} = 0,051 \quad (3.57.a)$$

$$(P_{ct} \times L)' = (P_{ct} \times L) \frac{T_{mf}}{T_{mp}} = 0,067 \quad (3.57.b)$$

D'autre part, la température T_{mf} sera remplacée par T_{mp} , on aura donc :

$$\epsilon'_{ep} = 0,12$$

$$\epsilon'_{cp} = 0,092$$

Les formules empiriques donnant les émissivités de la vapeur d'eau et de l'oxyde de carbone relativement à la paroi sont les suivantes :

$$\epsilon_{ep} = \epsilon'_{ep} \left(\frac{T_{mf}}{T_{mp}} \right)^{0,45} = 0,151 \quad (3.58.a)$$

$$\epsilon_{cp} = \epsilon'_{cp} \left(\frac{T_{mf}}{T_{mp}} \right)^{0,65} = 0,128 \quad (3.58.b)$$

Le facteur de correction $\Delta\epsilon_p$ est dans ce cas fonction de $(P_{ct}.L)' + (P_{e1}.L)'$ au lieu de $(P_{ct}.L) + (P_{e1}.L)$:

$$\Delta\epsilon_p = 0,005$$

Alors :

$$\epsilon_p = 0,151 + 0,128 - 0,005 = 0,274 \quad (3.54.c)$$

Il reste maintenant à déterminer α_{rn} :

$$\alpha_{rn} = \frac{4,88 \times 10^{-8} \times [0,215 \times 1113,237^4 - 0,274 \times 670,92^4]}{1113,237 - 670,92}$$

$$\alpha_{rn} = 30,316 \text{ kcal/hm}^2\text{c}$$

Il existe une formule empirique qui donne la valeur de α_i [2] :

$$\alpha_i = i \frac{q^{0,75}}{d_{in}^{1,75}} \tag{3.59.a}$$

avec :

- i : paramètre spécifique lu sur l'abaque de la fig.3.11 ;
- q : débit massique dans un tube

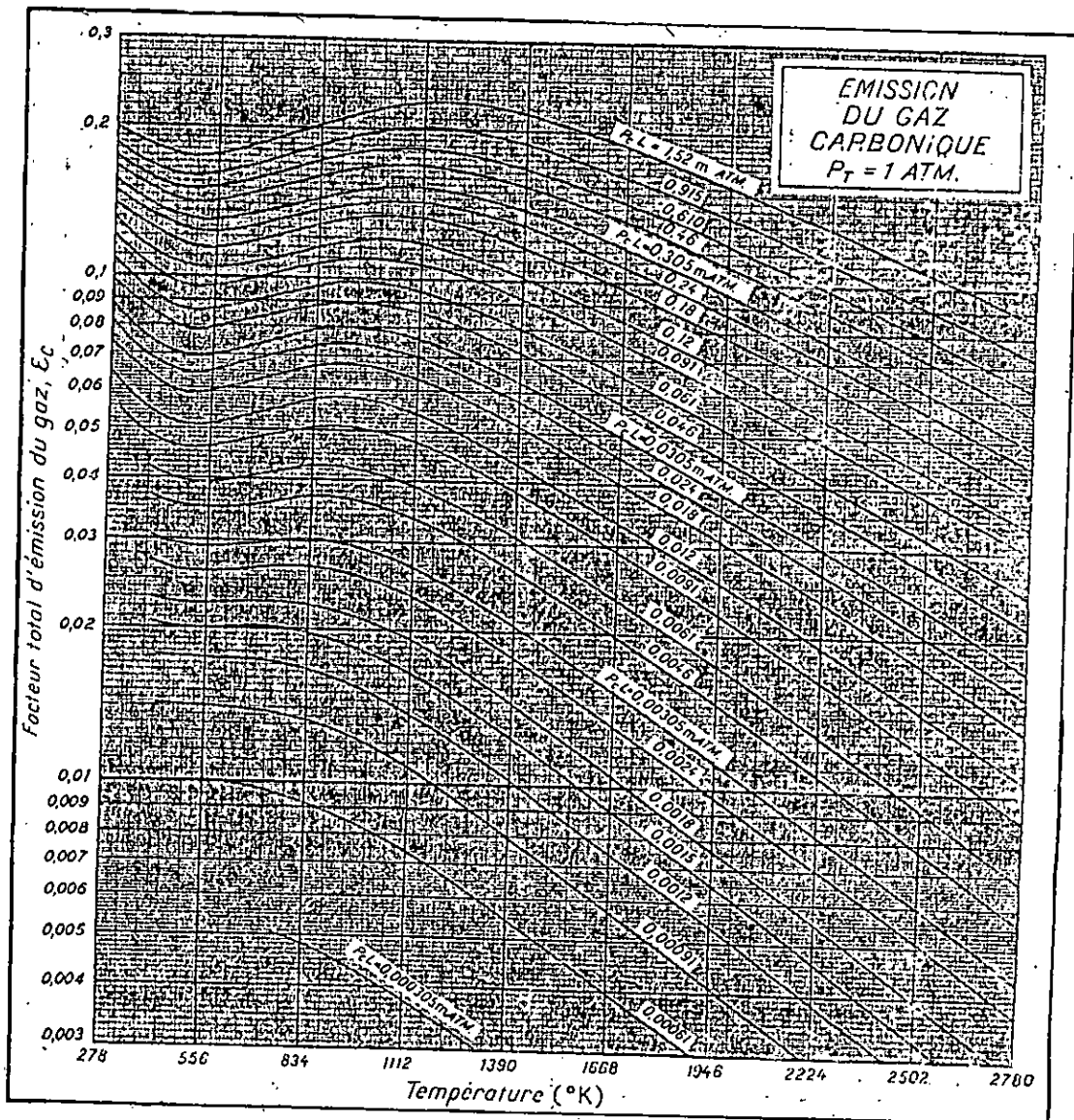


Fig.3.9.a - Emissivité du gaz carbonique.

Dans le cas d'une pression moyenne de 42 bars et une température moyenne de la vapeur de 327,92°C, i prend la valeur de 8.

$$q = \frac{\dot{m}_v}{n_B} = \frac{33,323}{32} = 1,041 \text{ kg/s}$$

$$\alpha_1 = 8 \times \frac{1,041^{0,75}}{0,05^{1,75}} = 1559,862 \text{ kcal/hm}^2\text{c} \quad (3.59.b)$$

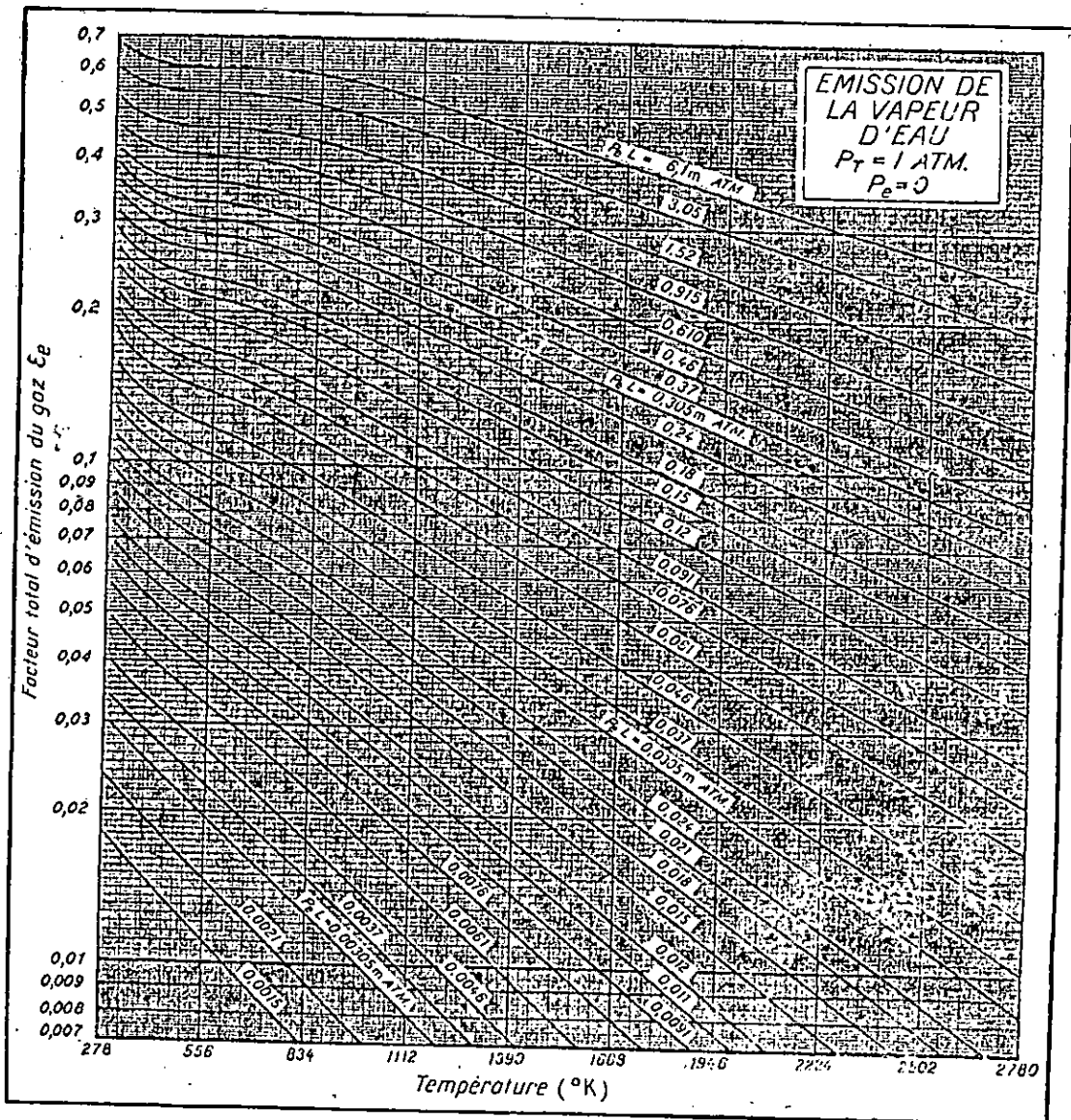


Fig.3.9.b - Emissivité de la vapeur d'eau.

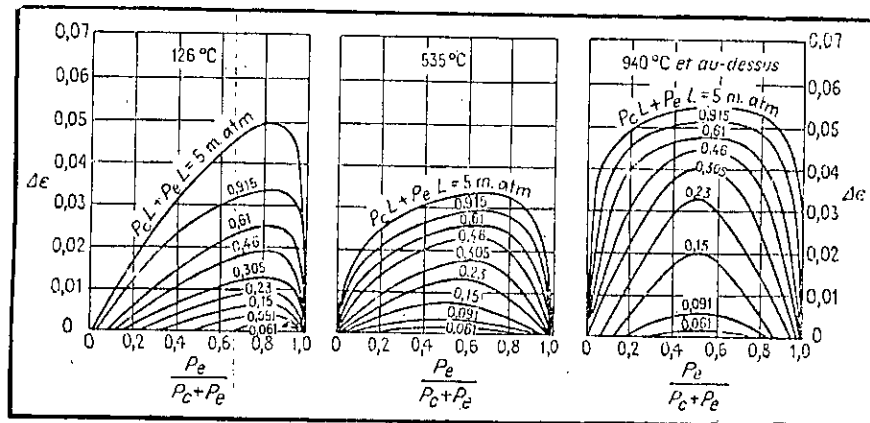


Fig.3.10 - Correction du facteur total d'émission.

Après la détermination de tous ces coefficients, on peut calculer k :

$$k = 37,840 \text{ kcal/hm}^2\text{°C} \tag{3.44.b}$$

III.7.5. SURFACE D'ÉCHANGE DE CHALEUR TOTALE

$$S_s = \frac{Q_s}{k \times \Delta t_m \times F} \tag{3.60}$$

$$S_s = \frac{(767,885 - 668,712) \times 33,323 \times 3600}{37,840 \times 512,119 \times 0,99} = 620,126 \text{ m}^2$$

III.7.6. NOMBRE DE NAPPES ET LONGUEUR DU SURCHAUFFEUR

La surface d'une nappe s est égale à :

$$s = n_s \times s_1 \tag{3.61.a}$$

telle que :

s₁ est la surface d'échange d'un tube appartenant à une nappe.

$$s = n_s \times \pi \times d_{ex} \times 4 \tag{3.61.b}$$

Le nombre de nappes sera donc :

$$N_s = \frac{S_s}{s} = \frac{620,126}{32 \times \pi \times 0,06 \times 4} = 26 \text{ nappes} \tag{3.61.c}$$

La hauteur du surchauffeur ou longueur occupée par les N_s nappes (fig.3.12) est :

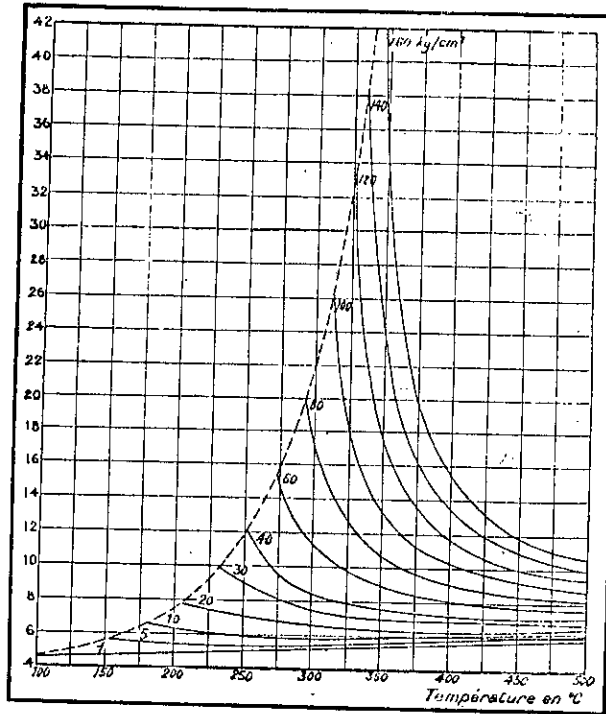


Fig.3.11. - Valeurs du coefficient i.

$$l_s = [N_s + (N_s - 1) \times 1,5] \times 0,06 \tag{3.63.a}$$

$$l_s = [26 + (26 - 1) \times 1,5] \times 0,06 = 3,810 \text{ m} \tag{3.63.b}$$

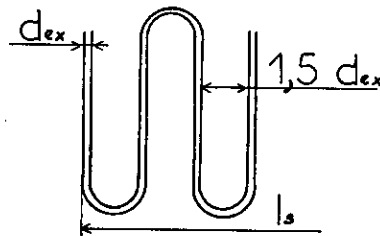


Fig.3.12 - Hauteur du surchauffeur.

III.8. LE FAISCEAU EVAPORATEUR (fig.3.13)

Pour le dimensionnement de cette partie, on suit un procédé semblable à celui utilisé dans le cas du surchauffeur.

III.8.1. TEMPERATURE DES FUMÉES

On détermine la température des fumées à la sortie du vaporisateur à partir de l'équation suivante :

$$C \times V_f \times c_{pf} \times (T_{v0} - T_{v1}) = \dot{m}_v \times \Delta H_v \tag{3.64.a}$$

$$T_{\dot{v}1} = T_{\dot{v}0} - \frac{\dot{m}_v \times \Delta H_v}{C \times V_f \times C_{Df}} \quad (3.64.b)$$

$$T_{\dot{v}1} = 785,613 - \frac{33,323 \times (668,712 - 236,588) \times 3600}{6 \times 50 \times 10^3 \times 0,363} = 309,594^\circ C$$

III.8.2. SURFACE D'ECHANGE TOTALE

$$S_{\dot{v}} = \frac{Q_{\dot{v}}}{k \times \Delta t_m \times F} \quad (3.65.a)$$

A/ Différence de température logarithmique

$$\Delta t_m = \frac{(T_{\dot{v}0} - t_{v1}) - (T_{\dot{v}1} - t_{v0})}{\ln \frac{T_{\dot{v}0} - t_{v1}}{T_{\dot{v}1} - t_{v0}}} \quad (3.66)$$

$$\Delta t_m = \frac{(785,613 - 255,84) - (309,594 - 230)}{\ln \frac{785,613 - 255,84}{309,594 - 230}} = 237,497^\circ C$$

B/ Coefficient de correction

$$P = \frac{255,84 - 230}{785,613 - 230} = 0,047 \quad (3.67.a)$$

$$R = \frac{785,613 - 309,594}{255,84 - 230} = 18,42 \quad (3.67.b)$$

$$F = 1 \quad (3.67.c)$$

C/ Coefficient d'échange de chaleur

La variation d'enthalpie de la vapeur au cours de l'évolution thermodynamique s'effectuant au sein du vaporisateur est importante. Ce qui nécessite le choix d'un matériau permettant d'avoir un coefficient de transfert important. Généralement, on prend la valeur de 120 kcal/hm²°C [6].

On peut à partir de là, déterminer la surface d'échange totale du faisceau vaporisateur :

$$S_v = \frac{Q_v}{k \times \Delta t_m \times F} \quad (3.65.b)$$

$$S_v = \frac{(668,712 - 236,588) \times 33,323 \times 3600}{120 \times 237,497 \times 1} = 1818,916 \text{ m}^2$$

Le nombre de tubes est déduit de l'équation suivante :

$$S_v = n_v \times \pi \times d_{ex} \times l_v \quad (3.68)$$

où :

l_v est la longueur des tubes ; si cette dernière est évaluée à 10 m, on aura :

$$n_v = \frac{S_v}{\pi \times d_{ex} \times l_v} = \frac{1818,916}{\pi \times 0,06 \times 10} = 965 \text{ tubes} \quad (3.69)$$

III.8.3. BALLONS

Les ballons supérieur et inférieur sont des réservoirs cylindriques en tôles d'acier soudées, d'un diamètre de 1450mm et d'une épaisseur de 125 mm [7].

Le ballon supérieur contient de la vapeur saturée à une pression de 44 bars. Le ballon inférieur contient de l'eau liquide à une pression de 48 bars.

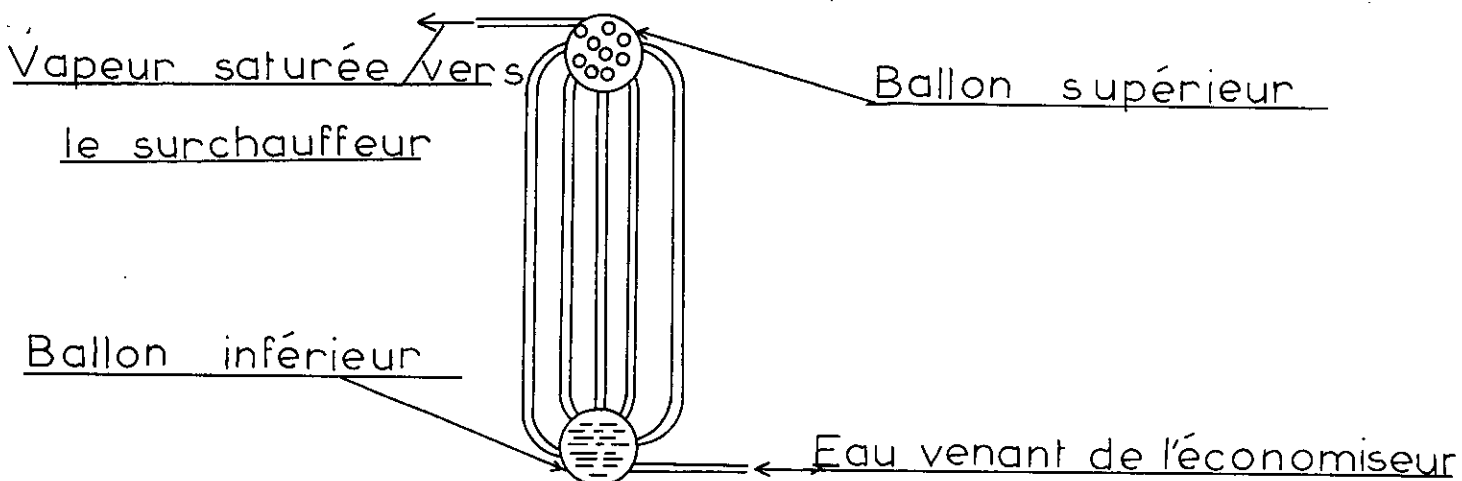


Fig.3.13 - Schéma général du vaporisateur.

III.9. L'ECONOMISEUR (fig.3.14)

A la sortie du vaporisateur, la température des fumées est toujours élevée (309,594°C), ceci favorise l'installation d'un économiseur. Ce dernier est constitué de deux collecteurs et d'un faisceau de tubes avec des ailettes en fonte.

III.9.1. TEMPERATURE DES FUMÉES

$$C \times V_f \times C_{pf} \times (T_{e0} - T_{e1}) = \dot{m}_v \times \Delta H_v \quad (3.70.a)$$

d'où :

$$T_{e1} = T_{e0} - \frac{\dot{m}_v \times \Delta H_v}{C \times V_f \times C_{pf}} \quad (3.70.b)$$

$$T_{e1} = 309,594 - \frac{33,323 \times (236,588 - 151,063) \times 3600}{6 \times 50 \times 10^3 \times 0,363} = 215,381^\circ\text{C}$$

III.9.2. NOMBRE DE TUBES

On adopte des tubes en acier frettés par des pièces en fonte munies d'ailettes rondes (fig.3.15). Ces tubes à ailettes offrent une surface d'échange latérale égale à $0,9 \text{ m}^2/\text{m}$ de longueur et une section de passage des fumées entre deux tubes de 1 m de longueur égale à $0,0615 \text{ m}^2/\text{m}$.

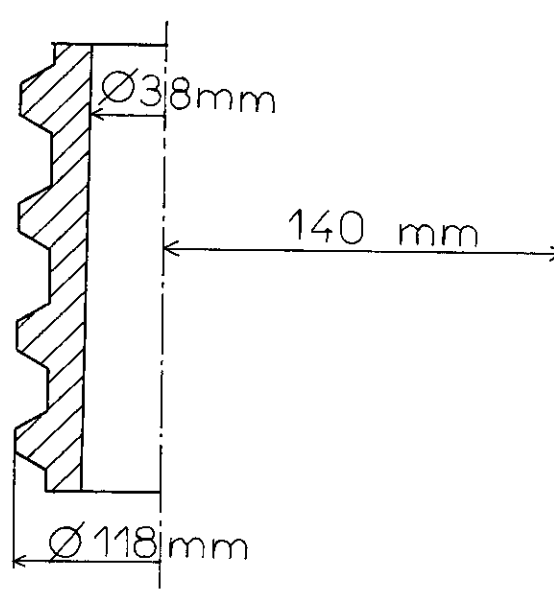


Fig.3.15 - Section longitudinale d'un tube.

Si S_p est la section de passage de l'eau et s la section d'un tube, le nombre de tubes sera :

$$n_e = \frac{S_p}{s} \quad (3.71.a)$$

L'élévation de température à travers l'économiseur provoque une dilatation volumique que l'on estime par un coefficient de 1,02.

$$\dot{D}_v = \frac{1,02 \times \dot{m}_v}{\rho_{e1}} = \frac{1,02 \times 33,323}{1000} = 0.034 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.72)$$

D'autre part, la vitesse de l'eau à travers les tubes de l'économiseur varie entre 0,25 et 0,75 m/s [2] ; on adoptera pour notre cas une vitesse de 0,7 m/s.

$$S_p = \frac{\dot{D}_v}{U} = \frac{0,034}{0,7} = 0.049 \text{ m}^2 \quad (3.73)$$

La section intérieure d'un tube est :

$$s = \frac{\pi \times d_{in}^2}{4} = \frac{\pi \times 0,038^2}{4} = 0.001 \text{ m}^2 \quad (3.74)$$

$$n_e = \frac{0,049}{0,001} = 49 \text{ tubes} \quad (3.71.b)$$

III.9.3. SURFACE D'ÉCHANGE TOTALE

Les matériaux utilisés pour la construction des économiseurs sont caractérisés par des coefficients de transmission de chaleur variant entre 20 et 55 kcal/hm²°c [2].

En se référant à la nature de la matière qu'on a choisie auparavant pour la réalisation de notre économiseur, on peut conclure qu'un coefficient de 50 kcal/hm²°c est amplement raisonnable.

La surface d'échange totale est alors déduite de l'équation suivante :

$$S_e = \frac{Q_e}{F \times k \times \Delta t_m} \quad (3.75)$$

$$S_e = \frac{3600 \times 33,323 \times (236,588 - 151,063)}{0,8 \times 50 \times 72,255} = 3549,866 \text{ m}^2$$

III.9.3. LONGUEUR UNITAIRE ET NOMBRE DE COUCHES

La longueur totale des tubes est :

$$L_e = \frac{S_e}{0,9} = \frac{3549,866}{0,9} = 3944,295 \text{ m} \quad (3.76)$$

L'économiseur étant constitué de 39 tubes, la longueur unitaire sera donc :

$$l_u = \frac{L_e}{n_e} = \frac{3944,295}{39} = 91,728 \text{ m}^2 \quad (3.77)$$

80,496 m²

Le schéma de la fig.3.14 permet de déduire le nombre de couches :

$$N_c = \frac{l_u}{5} = \frac{91,728}{5} = 19 \text{ couches} \quad (3.78)$$

16

La hauteur de l'économiseur est :

$$H_e = n_c \times 0,14 = 19 \times 0,14 = 2,66 \text{ m} \quad (3.79)$$

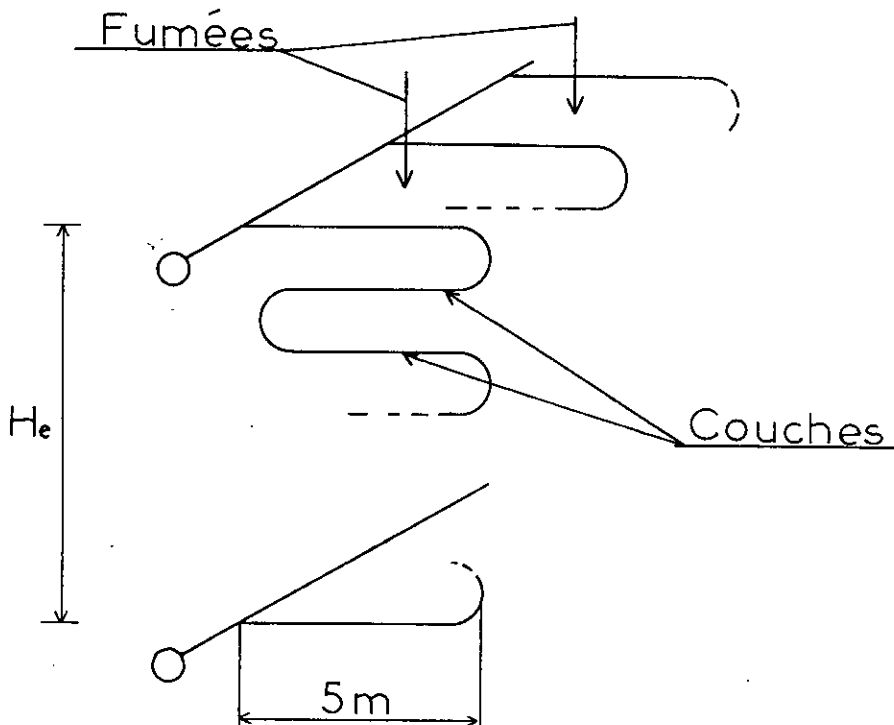


Fig.3.14 - Schéma général de l'économiseur.

III.10. LE RECHAUFFEUR D'AIR (fig.3.16)

Son utilité est de récupérer une certaine quantité de chaleur pour permettre de brûler, sans apport de combustible auxiliaire, les ordures ménagères. Il est généralement constitué de tubes à l'intérieur desquels passent les

fumées ; l'air circule autour de ces tubes et à l'intérieur d'un corps formant ainsi un échangeur de chaleur à courants croisés.

En ce qui concerne les calculs, on adopte les températures suivantes :

- pour l'air : $t_{r0} = 20^{\circ}\text{C}$, $t_{r1} = 100^{\circ}\text{C}$;
- pour les fumées : $T_{r0} = 215,392^{\circ}\text{C}$, $T_{r1} = 120^{\circ}\text{C}$.

III.10.1. QUANTITE DE CHALEUR ECHANGEE

La quantité de chaleur reçue par l'air traversant le réchauffeur est :

$$Q_r = C \times V_{ar} \times c_{pa} \times \Delta t \quad (3.80)$$

$$Q_r = 50 \times 10^3 \times 4,068 \times 0,314 \times (100 - 20) = 51,094 \times 10^5 \text{ kcal/h}$$

III.10.2. SURFACE D'ECHANGE TOTALE

$$Q_r = S_r \times F \times k \times \Delta t_m \quad (3.81)$$

$$\Delta t_m = \frac{(215,381 - 100) - (120 - 20)}{\ln \frac{215,381 - 100}{120 - 20}} = 107,507^{\circ}\text{C} \quad (3.82)$$

$$F = 0,9 \quad (3.83)$$

On remarque que dans le réchauffeur d'air, les fumées circulent à l'intérieur des tubes, ce qui provoque un léger changement dans leur vitesse. Cette dernière prend couramment la valeur de 6 m/s dans les réchauffeurs d'air [4].

Monteil [4] donne la valeur du coefficient de transmission global en fonction de la vitesse. Ce dernier correspond dans notre cas à 14 kcal/hm²°C.

La surface d'échange totale est donc :

$$S_r = \frac{51,094 \times 10^5}{0,9 \times 14 \times 107,507} = 3771,914 \text{ m}^2 \quad (3.84)$$

III.10.3. NOMBRE ET LONGUEUR DES TUBES

La section de passage des fumées à travers le réchauffeur peut être déterminée à partir de la chute de température de ces dernières ; soit pour 95°C on a une section de passage égale à 7,5 m² [4].

En adoptant des tubes normalisés de diamètres 90÷100 mm leur nombre sera :

$$n_r = \frac{S_p}{\frac{\pi \times d_{in}^2}{4}} = \frac{7,5}{\frac{\pi \times 0,09^2}{4}} \approx 1179 \text{ tubes} \quad (3.85)$$

La longueur des tubes est déduite à partir de S_r et n_r :

$$H_r = \frac{S_r}{\pi \times d_{ax} \times n_r} = \frac{3771,914}{\pi \times 0,1 \times 1179} = 10,184 \text{ m} \quad (3.86)$$

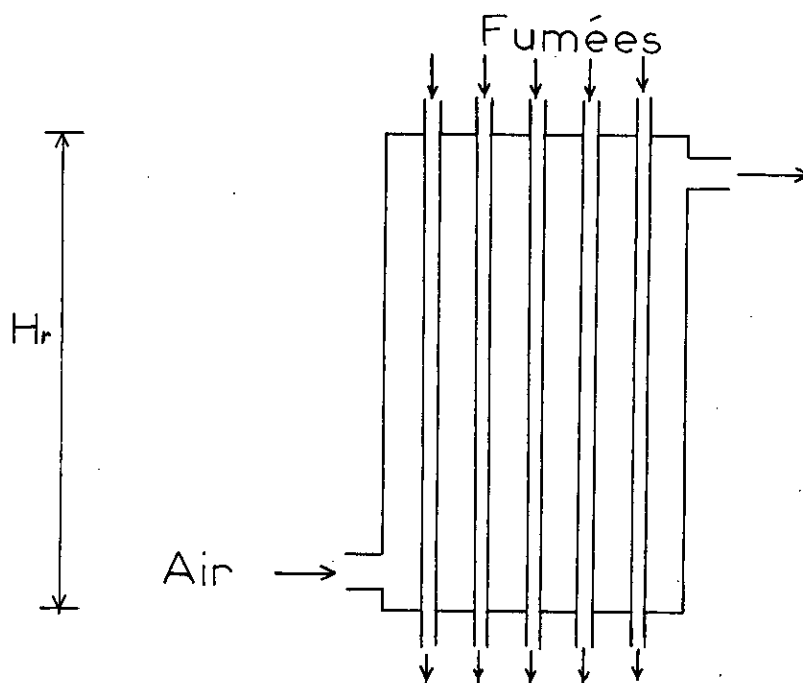


Fig.3.16 - Schéma général du réchauffeur d'air.

CHAPITRE IV

LES DEPOUSSIÉREURS ET LE CIRCUIT DES FUMÉES

IV.1. DEPOUSSIÉREURS

IV.1.1. INTRODUCTION

Le dépolluage industriel constitue une étape importante par laquelle les fumées doivent passer avant d'être véhiculées par les ventilateurs vers les cheminées. Il consiste à capter les poussières pour prévenir les nuisances qu'elles peuvent engendrer.

Le choix du mode de dépolluage est fonction d'un grand nombre de facteurs, notamment :

- Poussières : plage granulométrique, caractère corrosif, propriétés électriques, etc...

On distingue souvent :

- . Les poussières d'origine mécanique (broyage, concassage, etc...), ces poussières ont des dimensions en général supérieures à 5 micromètres.
- . Les poussières d'origine chimique ou thermique, provenant d'une réaction chimique ; ces poussières sont en principe submicroniques, mais elles peuvent s'agglomérer en particules plus grosses.
- Gaz porteur : température, pression, présence de polluants chimiques, de vapeur d'eau, etc...

IV.1.2. TECHNIQUES DE DEPOUSSIÉRAGE

On distingue quatre familles principales de dépollueurs :

- les séparateurs mécaniques ;
- les séparateurs humides ;
- les séparateurs électriques ;
- les séparateurs à couche filtrante.

IV.1.2.1. SEPARATEURS MECANIQUES (fig.4.1 , 4.2)

Dans ces appareils, les gaz poussiéreux sont mis en rotation à une vitesse aussi rapide que possible. Si r est le rayon de giration d'un filet gazeux, la particule transportée par celui-ci est soumise à une accélération centrifuge U^2/r qui peut être comprise entre 10 et 100 fois celle de la pesanteur.

On distingue :

- Les cyclones (fig.4.1) :

- . entrée tangentielle par volute ou hélicoïdale ;
- . sortie de gaz au centre par le dessus ;
- . sortie de poussière au bas par une trémie.

- Les multicyclones (fig.4.2) :

La force de séparation des poussières étant proportionnelle à U^2/r , on a intérêt à ce que le rayon de giration r soit le plus petit possible ; on dispose souvent pour cela plusieurs cyclones en parallèle.

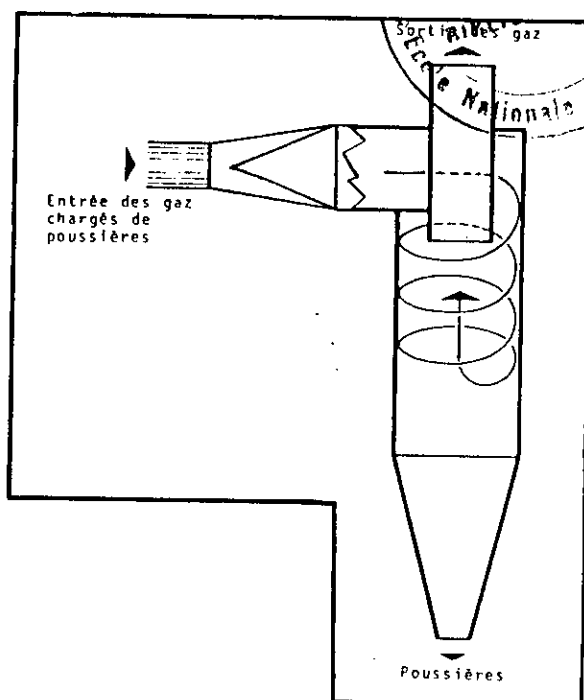


Fig.4.1 - Dépoussiéreur cyclone.

L'efficacité des cyclones, selon leur type, leur dimension et leur conditions de marche est, pour des poussières de masse volumique égale à 2 gr/cm^3 , de l'ordre de :

- 10 à 30 % sur des particules de 1 micromètre ;
- 50 à 90 % sur des particules de 5 micromètres ;
- 90 à 99,5 % sur des particules de 20 micromètres ;
- 99 à 99,95 % sur des particules de 70 micromètres.

Actuellement, il ne sont que très rarement utilisés seuls, car ils sont inopérants sur les poussières submicroniques, et peu efficaces pour les poussières de dimension inférieure à 6 micromètres qui sont les plus dangereuses.

IV.1.2.2. DEPOUSSIÉREURS HUMIDES OU LAVEURS (fig.4.3)

Les dépoussiéreur humides comprennent d'une manière générale :

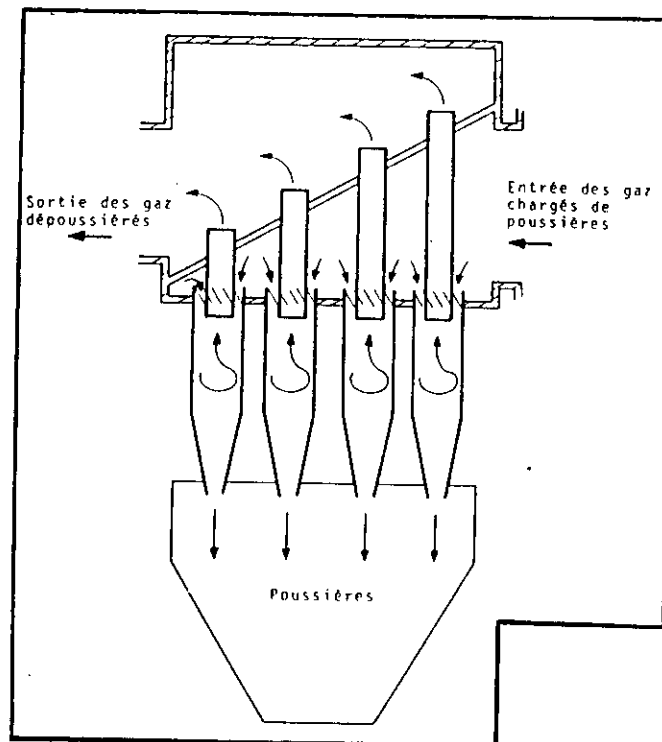


Fig.4.2 - Dépoussiéreur multicyclones.

- une zone d'installation des gaz ;
- une zone de contact dans laquelle la phase liquide est dispersée sous forme de gouttelettes et animée d'une vitesse relative par rapport au gaz qui véhicule les poussières ;
- une zone de séparation des entraînements vésiculaires.

Les laveurs ont l'inconvénient de transférer la pollution gazeuse vers une phase liquide, ce qui est indésirable dans notre cas.

IV.1.2.3. SEPARATEURS A COUCHE FILTRANTE (fig.4.4)

Les séparateurs à couche filtrante (filtre à gravier, à poches, à manches), utilisent des supports d'assez large porosité pour séparer des poussières fines, notamment submicroniques, de dimension beaucoup plus petite que les pores. Les pores vont selon les médiums filtrants, de quelques millimètres à quelques dizaines de micromètres.

Le support n'est qu'un matériau intermédiaire destiné à accrocher les particules, et qui permet ensuite aux gaz poussiéreux d'être filtrés par la poussière captée elle-même. On utilise presque toujours des feutres aiguilletés de textiles (Crylor, Tergal, etc...).

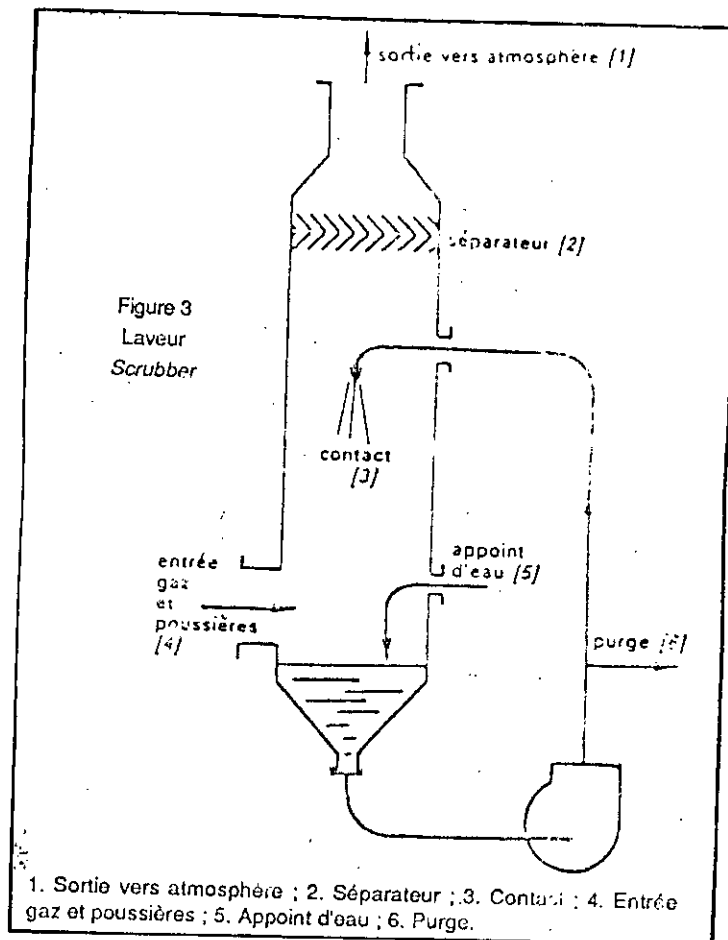


Fig.4.3 - Dépoussiéreur humide.

Les séparateurs à couche filtrante (filtre à gravier, à poches, à manches), utilisant des supports d'assez large porosité pour séparer des poussières fines, notamment submicroniques, de dimension beaucoup plus petite que les pores. Les pores vont selon les médiums filtrants, de quelques millimètres à quelques dizaines de micromètres.

Le support n'est qu'un matériau intermédiaire destiné à accrocher les particules, et qui permet ensuite aux gaz poussiéreux d'être filtrés par la poussière captée elle-même. On utilise presque toujours des feutres aiguilletés de textiles (Crylor, Tergal, etc...).

IV.1.2.4. SEPARATEURS ELECTRIQUES OU ELECTROFILTRÉS (fig.4.5)

Les gaz poussiéreux circulent horizontalement, et à faible vitesse (environ 1 m/s) entre des plaques verticales. Entre ces plaques collectrices, destinées à capter les poussières et à les évacuer vers le fond de l'appareil, sont

disposées des électrodes émissives constituées de fils ou de rubans éventuellement, garnis de pointes et portés à une haute tension négative (40 à 110 kV). Les plaques reliées à la terre sont nettoyées périodiquement par frappe.

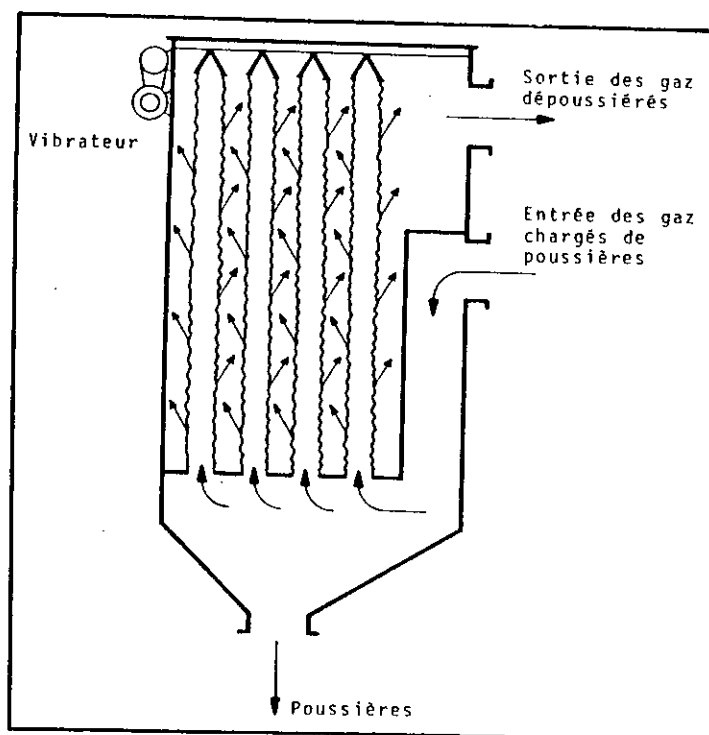


Fig.4.4 - Dépoussiéreur à couche filtrante.

Sous l'effet de la haute tension, les poussières sont chargées négativement et migrent dans le champ électrique créé entre les électrodes émissives et les plaques collectrices. Pour mieux maîtriser le champ électrique tout au long de l'électrofiltre, et au fur et à mesure de l'avancement du dépoussiérage, on divise souvent l'électrofiltre en plusieurs rangées successives d'électrodes, dans le sens de l'écoulement des gaz.

IV.1.3. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT

En se référant au tableau 4.1, on choisira les séparateurs électriques comme dispositif de dépoussiérage.

Un grand nombre d'études a montré que la vitesse de migration est fonction de la distance entre électrodes émissives et collectrices.

D'après toutes les études effectuées, il apparaît que le maximum est obtenu pour une distance entre fils et plaques de l'ordre de 150 mm. Ces dernières sont de hauteur variable entre 15 et 20 m. Les fils constituant les électrodes émissives sont généralement de 2 mm de diamètre.

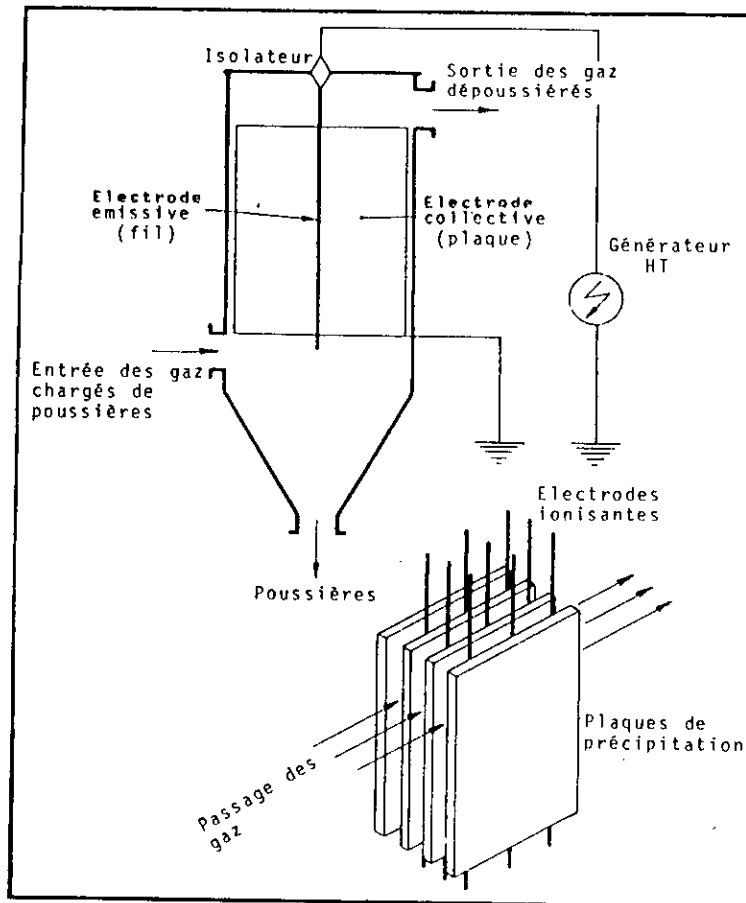


Fig.4.5 - Dépoussiéreur électrostatique.

Le débit volumique des fumées ainsi que leur vitesse sont connus, on peut alors déterminer la section de passage :

$$S_p = \frac{D_f}{U} = \frac{6 \times 50 \times 10^3}{1 \times 3600} \times \frac{120 + 273}{273} = 119,963 \text{ m}^2 \quad (4.1)$$

On choisit des plaques d'une hauteur de 20 m, le nombre de plaques nécessaires sera donc :

$$n_p = \frac{S_p}{2 \times 20 \times 0,15} + 1 = \frac{119,963}{2 \times 20 \times 0,15} + 1 \approx 21 \text{ plaques} \quad (4.2)$$

	Dynamiques	Filtrants	Hydrauliques	Electriques
Efficacité	Faible au-dessous de 15 µm	Excellente pour toute poussière, même très fine	Variable en fonction de la puissance consommée. Faible à très forte (Venturi à haute énergie)	Très forte pour toute poussière
Coût d'investissement Coût d'exploitation	Très faible à faible Faible à moyen	Elevé Moyen	Faible Moyen à très élevé (Venturi à haute énergie)	Elevé Faible
Coût d'entretien	Très réduit à réduit	Important	Faible à moyen	Faible
Avantages	Simplicité - Fiabilité Faible encombrement Possibilité de traiter : - gaz très chauds - gros débits gazeux - fortes charges en poussières	Simplicité Possibilité de traiter : - gaz chauds (< 260-280 °C) - gros débits gazeux - fortes charges en poussières même très fines	Faible encombrement Possibilité de traiter : - gaz très humides - gaz chauds Possibilité d'éliminer gaz polluants et poussières	Faible perte de charge Possibilité de traiter : - gros débits gazeux - gaz humides Tenue moyennes en poussières : quelques dizaines de g/m ³
Inconvénients	Rendement faible au-dessous de 10-15 µm	Encombrants Ne peut traiter des gaz très humides	Transfert de pollution à l'eau Obligation de traiter les boues	Encombrants Onéreux pour des débits < 50 000 m ³ /h Sensible aux variations de débit et à la résistivité des poussières
A étudier de près	Colmatage Abrasion Corrosion	Matériau et tenue des éléments filtrants	Colmatage/Entartrage Abrasion Corrosion	Corrosion Nature des poussières et gaz porteur Variations du débit
Perte de charge	80 à 150 daPa	80 à 150 daPa	20 à 2 000 daPa	10 à 40 daPa
Energie totale consommée	0,35 à 0,65 kWh/1 000 m ³	0,45 à 1 kWh/1 000 m ³	0,20 à 8,50 kWh/1 000 m ³	0,40 à 1 kWh/1 000 m ³
Utilisation	Pré-séparateur Pare-étincelles Agglomérateur de poussières submicroniques Récepteur de transport pneumatique	Utilisé dans toute l'industrie Installations de combustion	Chimie Sidérurgie Métallurgie Industries alimentaires Epuración des gaz Intrassant si l'effluent peut être recyclé	Sidérurgie-Métallurgie Cimenterie Centrales thermiques Installations de combustion
<p>(1) Ce tableau est emprunté à la conférence faite par M. Léon BOUTIER lors d'un stage « Mesure, captage, dépollution et épuration des effluents gazeux émis dans l'atmosphère », organisé par le Centre de Formation et de Documentation sur l'Environnement Industriel (CFDE) avec la collaboration du CETIAT.</p> <p>(2) Les désignations : faible, moyen, élevé, excellent, etc. sont relatives et ne doivent pas être considérées dans l'absolu. daPa = décapascal.</p>				

Tab.4.1 - Caractéristiques générales des dépoussiéreurs.

IV.2. PERTES DE CHARGE DANS LE CIRCUIT DES FUMÉES

On peut distinguer les pertes sensiblement proportionnelles au parcours des gaz, et les pertes locales provenant soit de changement de direction, soit de variations brusques de section des conduits. Dans le but d'une évaluation globale, on procédera dans ce qui suit à une estimation des pertes de charge dans les différents échangeurs constituant la chaudière.

IV.2.1. PERTES DANS LA CHAMBRE DE COMBUSTION

Ces pertes sont dues aux frottements engendrés lors du passage des fumées de bas en haut de la chambre de combustion, Fritzsche [2] évalue ces pertes à l'aide de la formule suivante:

$$\pi_1 = 0,00094 \times \omega^{0,852} \times d_{cc}^{-1,269} \times U^{1,852} \times l_c \quad [\text{mm d'eau}] \quad (4.3.a)$$

avec:

ω : poids spécifique (kg/m^3) ;

d_{cc} : diamètre intérieur de la chambre de combustion (m) ;

U : vitesse des fumées (m/s) ;

l_c : hauteur de la chambre de combustion (longueur des écrans d'eau) (m).

$$\text{Pour } T_{mf} = \frac{950 + 894,860}{2} = 922,430^\circ\text{C} \quad (4.4)$$

$$\text{On a : } \omega = 0,301 \text{ kg/m}^3 \quad (4.5)$$

$$\pi_1 = 0,00094 \times 0,301^{0,852} \times 14,907^{-1,269} \times 3,5^{1,852} \times 7,162$$

$$\pi_1 = 0,0008 \text{ mm d'eau} \quad (4.3.b)$$

IV.2.2. PERTES DANS LE SURCHAUFFEUR

La formule de Grimison [2] est celle qui donne les pertes dans le surchauffeur :

$$\pi_2 = 0,204 \times f_B \times f_n \times n_p \times U^2 \times \omega \quad [\text{mm d'eau}] \quad (4.6)$$

où :

f_B et f_n sont des coefficients qu'on détermine à partir des fig.4.6 et 3.8 respectivement. On prend souvent $l_1 = 2,15 d$ et $l_2 = 2,5 d$.

Notons que tous les calculs, dans ce cas, se font par rapport à la température :

$$t_{df} = t_{mp} + 0,9 \times \Delta t_m \quad (4.7)$$

$$t_{df} = 397,92 + 0,9 \times 512,119 = 858,827^\circ\text{C}$$

On aura donc :

$$\omega = 0,318 \text{ kg/m}^3 \quad \text{et} \quad \mu_r = 4,22 \times 10^{-5} \text{ kg/ms} \quad (4.8)$$

$$R_s = \frac{0,318 \times 3,5 \times 0,06}{4,22 \times 10^{-5}} = 1580,794 \quad (4.9)$$

$$f_n = 1 \quad \text{et} \quad f_B = 0,043. \quad (4.10)$$

Finalemment :

$$\pi_2 = 0,204 \times 0,043 \times 1 \times 32 \times 3,5^2 \times 0,318 = 1,092 \text{ mm d'eau}$$

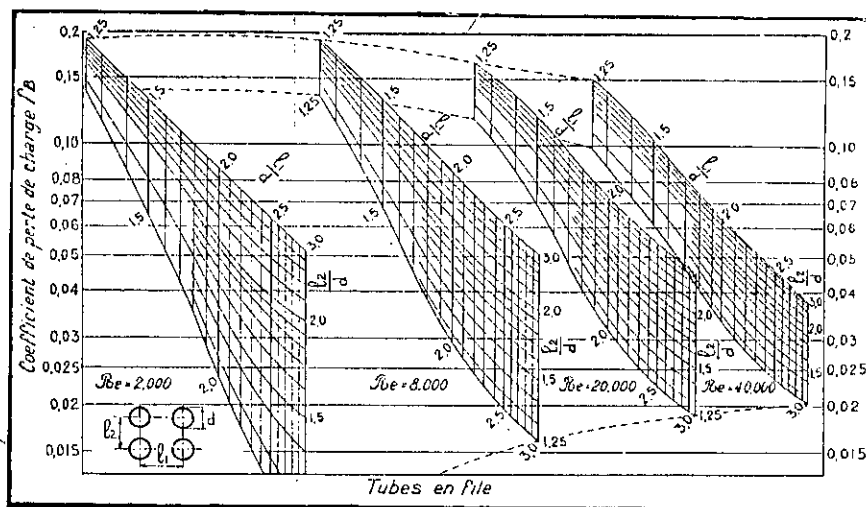


Fig.4.6 - Coefficient de perte de charge f_B .

IV.2.3. PERTES DANS LE FAISCEAU VAPORISATEUR

La formule adoptée pour le calcul dans ce cas, est identique à celle utilisée pour le surchauffeur.

$$\pi_3 = 0,204 \times f_B \times f_n \times n_v \times U^2 \times \omega \quad [\text{mm d'eau}] \quad (4.11)$$

$$t_{df} = t_{mp} + 0,9 \times \Delta t_m = 257,92 + 0,9 \times 237,497 = 471,668^\circ\text{C} \quad (4.12)$$

d'où :

$$\omega = 0,483 \text{ kg/m}^3 \quad \text{et} \quad \mu_r = 4,22 \times 10^{-5} \text{ kg/ms} \quad (4.13)$$

$$R_s = \frac{0,483 \times 3,5 \times 0,06}{4,22 \times 10^{-5}} = 2402,663 \quad (4.14)$$

Alors :

$$f_n = 1 \quad \text{et} \quad f_p = 0,043 \quad (4.15)$$

$$\pi_3 = 0,204 \times 0,043 \times 1 \times 965 \times 3,5^2 \times 0,483 = 50,015 \text{ mm d'eau}$$

IV.2.4. PERTES DANS L'ÉCONOMISEUR

Loschge [2] a établi une formule empirique permettant d'évaluer les pertes de charge dans l'économiseur :

$$\pi_4 = 0,0165 \times \omega \times U^2 \times H_0 \quad [\text{mm d'eau}] \quad (4.16)$$

$$\text{pour } T_{mf} = \frac{309,594 + 215,381}{2} = 262,487^\circ\text{C, on a : } \omega = 0,671 \text{ kg/m}^3$$

Alors :

$$\pi_4 = 0,0165 \times 0,671 \times 3,5^2 \times 2,66 = 0,361 \text{ mm d'eau}$$

IV.2.5. PERTES DANS LE RECHAUFFEUR D'AIR

Étant donné que les fumées vont passer dans ce cas dans des tubes, on utilisera la formule suivante :

$$\pi_5 = 0,00094 \times \omega^{0,852} \times d_{in}^{-1,269} \times U^{1,852} \times H_T \times n_T \quad [\text{mm d'eau}]$$

$$T_{mf} = \frac{215,381 + 120}{2} = 167,691^\circ\text{C} \quad (4.17)$$

$$\omega = 0,816 \text{ kg/m}^3 \quad (4.18)$$

$$\pi_5 = 0,00094 \times 0,816^{0,852} \times 0,09^{-1,269} \times 6^{1,852} \times 10,184 \times 1179$$

$$\pi_5 = 5559,931 \text{ mm d'eau} \quad (4.19)$$

IV.3. CHEMINÉES (fig.4.7)

La cheminée a deux rôles :

- permettre l'évacuation des fumées ;
- permettre la dispersion de ces fumées dans l'atmosphère à une hauteur telle que la retombée de poussières non captées se fasse sur une zone aussi grande que possible et que la teneur des gaz polluants au sol reste dans les limites acceptables.

IV.3.1. CALCUL DE LA HAUTEUR

L'altitude minimale du débouché à l'air libre de la cheminée doit être la plus grande des valeurs h_p et H_0 calculées suivant la méthode exposée ci-après :

A/ Calcul de h_p

L'altitude minimale de la cheminée est donnée par la formule suivante [1] :

$$h_p = \sqrt{\frac{680 \times qm}{C_M}} \times \sqrt[3]{\frac{nh}{R \times \Delta t}} \quad [m] \quad (4.20)$$

avec :

- Δt : différence, exprimée en °C, entre la température des fumées et la température de l'air ;
- R : débit des fumées, exprimé en m^3/h et compté à la température effective d'éjection des gaz ;
- C_M : concentration maximale en poussières fines admissibles au niveau du sol, exprimée en mg/m^3 ; C_M est la différence entre $0,15 mg/m^3$, valeur de référence, et la moyenne de la concentration mesurée au lieu considéré ; cette dernière prend une valeur de :
 - $0,05 mg/m^3$ en zone polluée ;
 - $0,09 mg/m^3$ dans une zone moyennement industrialisée ou à densité d'habitation moyenne ;
 - $0,11 mg/m^3$ dans une zone très urbanisée ou très industrialisée ;
- qm : débit maximal de poussières, exprimé en kg/h ;
- nh : nombre de cheminées.

$$\Delta t = 120 - 20 = 100^\circ C \quad (4.21)$$

$$R = V_f \times \frac{T_{f1} + 273}{273} \times C = 6 \times \frac{120 + 273}{273} \times 50 \times 10^3 = 4,319 \frac{m^3}{h}$$

$$C_M = 0,15 - 0,09 = 0,06 mg/m^3 \quad (4.22)$$

La teneur en poussières varie généralement entre $0,6$ et $1 g/Nm^3$, et sachant qu'on a adopté des dépoussiéreurs très efficaces (électrofiltres), on choisira une teneur de $0,6 gr/Nm^3$.

$$qm = 0,6 \times 6 \times 50 \times 10^3 \times 10^{-3} = 180 kg/h \quad (4.23)$$

Finalement :

$$h_p = \sqrt{\frac{680 \times 180}{0,06}} \times \sqrt[3]{\frac{1}{4,319 \times 10^5 \times 100}} = 76,252 \text{ m}$$

B/ Calcul de H_0

Ce calcul est basé sur la présence d'obstacles naturels ou artificiels susceptibles de perturber la dispersion des fumées. D'après la référence [1], les obstacles à considérer sont ceux situés à une distance horizontale inférieure à $10h_p$ de la cheminée et qui ont une largeur supérieure à 10 m.

Soit h_1 l'altitude d'un point d'un obstacle situé à une distance horizontale d de la cheminée, et soit H_1 défini comme suit :

si d est inférieur ou égal à $2h_p$:

$$H_1 = 1,4 \times h_1 \quad (4.24)$$

si d est compris entre $2h_p$ et $10h_p$:

$$H_1 = \frac{7 \times h_1}{4} \times \left[1 - \frac{d}{10 \times h_p}\right] \quad (4.25)$$

H_0 est la plus grande des valeurs H_1 calculées pour tous les points de tous les obstacles ci-dessus.

Etant donné que nous n'avons aucune information concernant le lieu de l'usine, on ne pourra donc déterminer la valeur de H_0 . La hauteur qu'on prendra en considération dans les calculs qui suivent sera h_p .

IV.3.2. DIAMÈTRE DE LA CHEMINÉE

La référence [1] indique, que pour des valeurs de R supérieures ou égales à $20000 \text{ m}^3/\text{h}$, la vitesse des gaz rejetés à l'atmosphère est de 8 m/s . Connaissant le débit volumique des fumées, on peut déterminer le diamètre de la cheminée.

$$\dot{D}_v = S_p \times U = \pi \times \frac{D_{ch}^2}{4} \times U \quad (4.26.a)$$

$$D_{ch} = \sqrt{\frac{\dot{D}_v \times 4}{\pi \times U}} \quad (4.26.b)$$

D_c étant le diamètre de la cheminée.

$$D_{ch} = \sqrt{\frac{6 \times 50 \times 10^3}{3600} \times \frac{120 + 273}{273} \times \frac{4}{\pi \times 8}} = 4,270 \text{ m}$$

Finalement, on aura pour chaque système four-chaudière-dépoussiéreur-ventilateur, une cheminée de hauteur minimale égale à 76,252 m et diamètre égal à 4,278 m.

IV.3.3. REALISATION

A cause de la faible température des fumées à comparer à celles issues d'installation à combustible, les cheminées sont fréquemment métalliques. Pour éviter les corrosions dues aux condensations acides, la tôle est en général, de l'acier spécial, et le type de construction, à double paroi.

IV.4. VENTILATEURS

IV.4.1. INTRODUCTION

Pour assurer la circulation des gaz dans un générateur de vapeur, il faut disposer d'une certaine pression motrice. Celle-ci peut être obtenue grâce à la différence entre les poids par unité de surface de la colonne des gaz chauds se trouvant dans le générateur lui même ou dans la cheminée, et de la colonne d'air extérieur de même hauteur. C'est ce qu'on appelle le tirage naturel, qui était suffisant dans les anciennes chaudières à faibles pertes de charge. Mais dans les grands générateurs modernes, la perte de charge est souvent plus de 10 fois supérieure au tirage que peut assurer une cheminée de hauteur courante. Il est alors nécessaire d'installer des ventilateurs aspirants à la sortie du générateur. Il faut également des ventilateurs soufflants, qui doivent de plus assurer la circulation dans les réchauffeurs d'air. Ce système de ventilation est réglé afin de maintenir la pression dans la chambre de combustion légèrement au-dessus de la pression atmosphérique (5 mm d'eau environ), ce qui évite d'une part des rentrées d'air excessives, d'autre part, des refoulements de flammes. C'est ce qu'on appelle le tirage équilibré.

IV.4.2. ELEMENTS NECESSAIRES AU CHOIX D'UN VENTILATEUR

Un ventilateur se compose d'un rouet en tôle, dans le cas d'un ventilateur centrifuge, ou d'une hélice, dans le cas d'un ventilateur hélicoïdal, tournant à l'intérieur d'un stator en tôle également.

Le choix du ventilateur convenable nécessite la détermination des caractéristiques suivantes :

- La nature du fluide véhiculé (masse volumique à la température d'utilisation).
- Le débit maximum nécessaire (correspondant à la capacité maximale du four) plus une marge de sécurité de 15 %.
- La hauteur manométrique totale obtenue pour ce débit, cette dernière est la somme des différentes pertes de charge du circuit majorées d'une marge de sécurité de 10 % environ.

A/ VENTILATEURS DE TIRAGE

Notre installation doit disposer de deux ventilateurs de tirage placé chacun entre le dépoussiéreur et la cheminée (fig.4.7).

. Caractéristiques correspondantes

- La masse volumique des fumées à la température de 120°C : $\rho_f = 0,915 \text{ kg/m}^3$.
- Le débit volumique maximum des fumées en tenant compte de la marge de sécurité :

$$\dot{D}_{mf} = V_f \times C \times \frac{T_{r1} + 273}{273} \times (1 + 0,15) \tag{4.27}$$

$$\dot{D}_{mf} = 6 \times 50 \times 10^3 \times \frac{120 + 273}{273} \times (1 + 0,15) = 496,648 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$$

- La hauteur manométrique totale :

$$H_{mf} = \left(\sum \pi_i + \frac{\rho_f h_p}{\rho_{\text{air}}} \right) \times (1 + 0,1) \tag{4.28}$$

où π_s représente les pertes de charge dans le dépoussiéreur ($\pi_s = 5 \text{ mm d'eau}$ [9]).

$$H_{mf} = 90,055 \text{ m } 6,29 \text{ m d'eau}$$

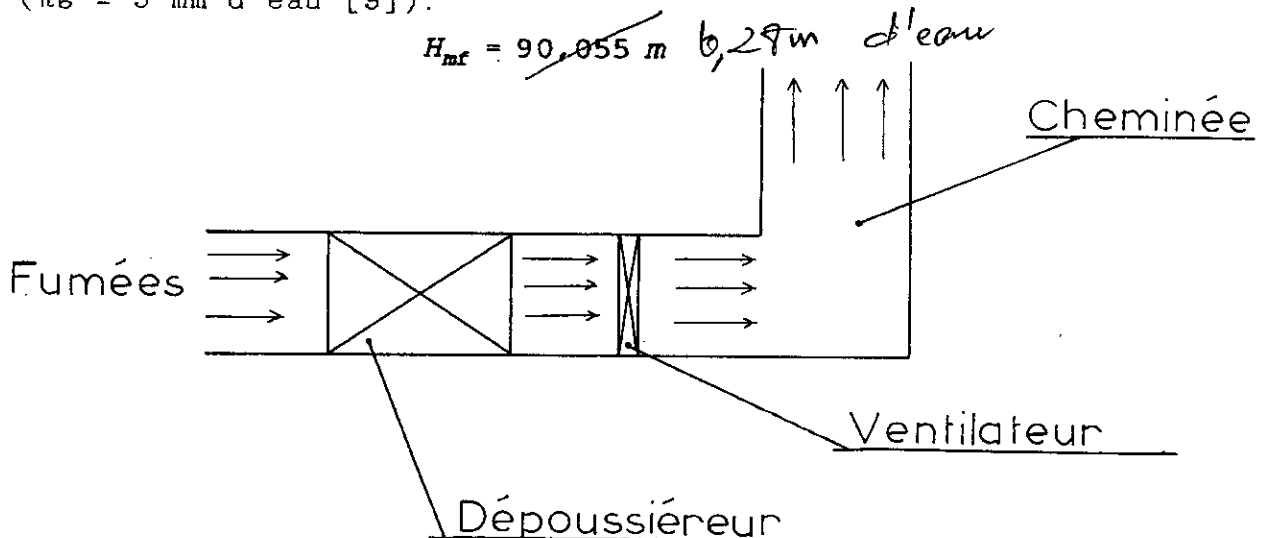


Fig.4.7 - Ensemble dépoussiéreur-ventilateur de tirage-cheminée.

B/ VENTILATEURS DE SOUFFLAGE

Le fonctionnement de chaque four est conditionné par l'installation d'un ventilateur véhiculant l'air à partir de la fosse de réception (fig.4.8). On doit noter que dans ce cas, on préfère fournir au constructeur la vitesse d'entrée d'air dans la chambre de combustion au lieu de la hauteur manométrique.

. Caractéristiques correspondantes

- La masse volumique de l'air à 20°C : 1,210 kg/m³.
- Le débit volumique maximum d'air en tenant compte de la marge de sécurité :

$$\dot{D}_{ma} = V_{ar} \times C \times \frac{20 + 273}{273} \times (1 + 0,15) \quad (4.29)$$

$$\dot{D}_{ma} = 4,068 \times 50 \times 10^3 \times \frac{20 + 273}{273} \times (1 + 0,15) = 251,046 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$$

- La vitesse d'entrée d'air dans la chambre de combustion : 1 à 2 m/s.

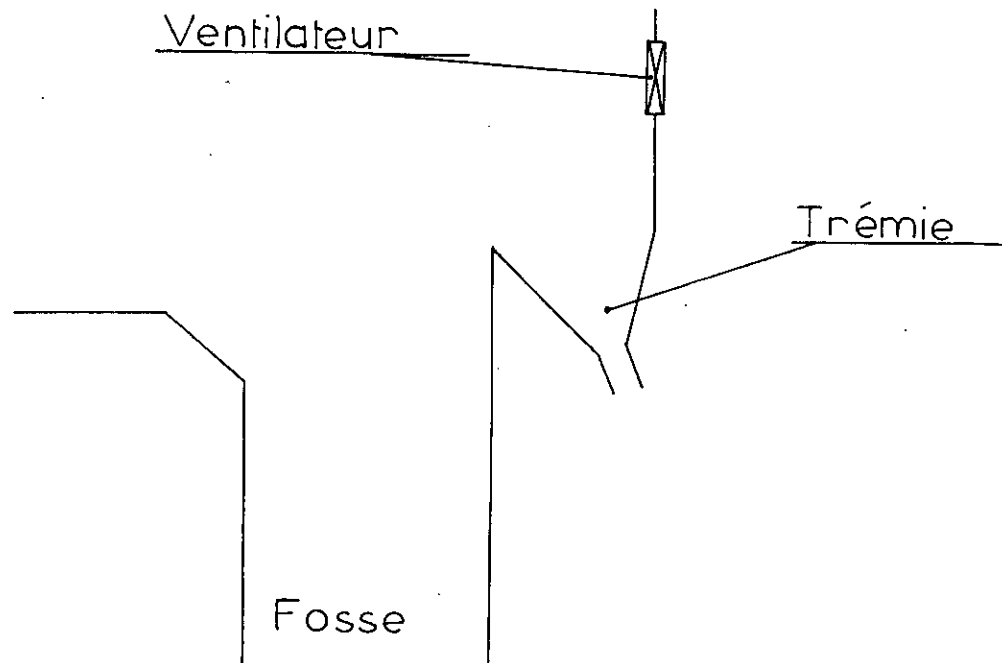


Fig.4.8 - Position du ventilateur de soufflage.

CHAPITRE V

LA TURBINE A VAPEUR

V.1. INTRODUCTION

L'usine d'incinération sera conçue pour produire de la vapeur d'eau avec les caractéristiques suivantes :

- 35 t/h à 14 bars et 320°C ;
- 60 t/h à 6 bars et 220°C ;
pour alimenter une usine de production de papier ;
- 113t/h à 1 bar ;
pour alimenter un réseau de chauffage.

Le reste de la chaleur récupérée doit être transformée en énergie électrique.

Notre étude du cycle thermodynamique (fig.5.1 , 5.2) se limitera essentiellement à la détermination de l'énergie électrique nette fournie par le groupe turbo-alternateur.

L'électricité produite doit assurer, en premier lieu, les besoins de l'usine, le reste de la production sera cédé au concessionnaire de la distribution d'énergie électrique (SONELGAZ).

Notons que les calculs se feront en supposant que les pertes de charge dans les conduits sont égales à 5 % [10].

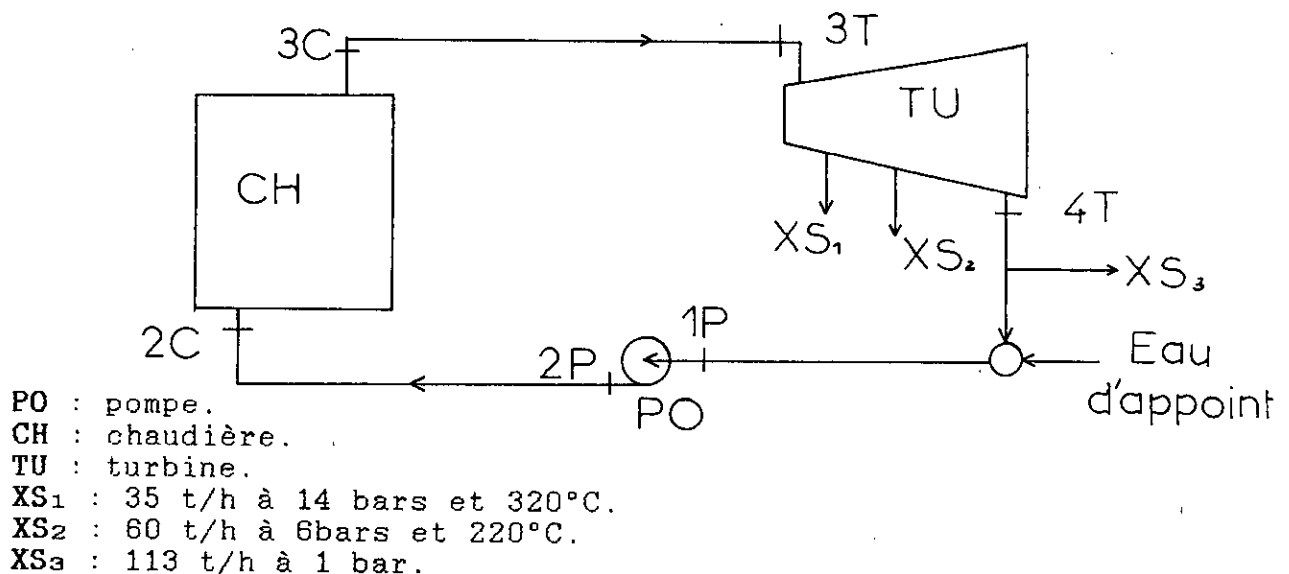


Fig.5.1 - Cycle à vapeur de l'usine d'incinération.

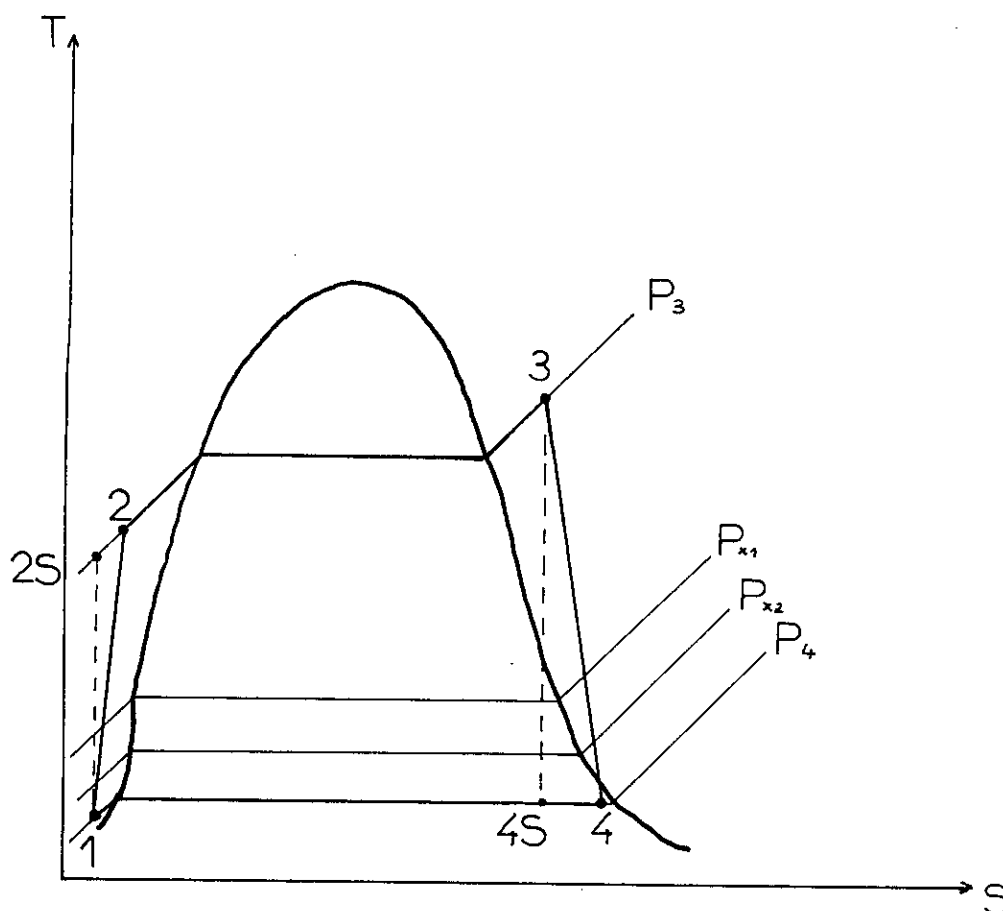


Fig.5.2 - Cycle thermodynamique de la turbine à vapeur.

V.2. LA TURBINE

Afin d'éviter toutes les dépenses liées à l'utilisation d'un condenseur, on procède à la détente dans une turbine à contre-pression.

On détermine la pression à l'entrée de la turbine.

$$\frac{P_{3c} - P_{3t}}{P_{3c}} = 0,05 \rightarrow P_{3t} = P_{3c} \times (1 - 0,05) \quad (5.1.a)$$

$$P_{3t} = 40 \times (1 - 0,05) = 38 \text{ bars} \quad (5.1.b)$$

Les caractéristiques de la vapeur à l'entrée et à la sortie de la turbine sont les suivantes :

- entrée de la turbine : $t_3 = 400^\circ\text{C}$, $P_{3t} = 38 \text{ bars}$;
- sortie de la turbine : $P_{4t} = 1 \text{ bar}$.

A 400°C et 38 bars on a :

$$h_{3t} = 768,717 \text{ kcal/kg} \quad ; \quad SS_3 = SS_{4t} = 1,6243 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

$$SS_{4s} = SS_{411} + x_{4s} \times SS_{411g} = \frac{1,3026}{4,185} + x_{4s} \times \frac{6,0568}{4,185} = 0,907 \quad (5.3)$$

$$h_{4s} = h_{411} + x_{4s} \times h_{411g} = \frac{(417,46 + 0,907 \times 2258,0)}{4,185}$$

$$h_{4s} = 589,120 \text{ kcal/kg} \quad (5.4)$$

Sachant que le rendement de détente isentropique dans la turbine est de l'ordre de 90% [10], on aura :

$$\eta_t = \frac{h_{3t} - h_{4t}}{h_{3t} - h_{4s}} \rightarrow h_{4t} = h_{3t} - \eta_t \times (h_{3t} - h_{4s}) \quad (5.6)$$

$$h_{4t} = 768,717 - 0,9 \times (768,717 - 589,12) = 607,080 \text{ kcal/kg} \quad (5.7)$$

La puissance fournie par la turbine est :

$$\begin{aligned} P_t = \phi \times (h_{3t} - h_{x1}) + (\phi - \dot{m}_{x1}) \times (h_{x1} - h_{x2}) \\ + (\phi - \dot{m}_{x1} - \dot{m}_{x2}) \times (h_{x2} - h_{4t}) \end{aligned} \quad (5.8.a)$$

$$\begin{aligned} P_t = [239,924 \times (768,717 - 736,927) \\ + (239,924 - 35) \times (736,927 - 691,264) \\ + (239,924 - 35 - 60) \times (691,264 - 607,080)] \\ \times \frac{4,185 \times 10^3}{3600} = 33,927 \text{ MW} \end{aligned} \quad (5.8.b)$$

V.3. LA POMPE D'ALIMENTATION

Le débit d'eau d'appoint est :

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{x1} + \dot{m}_{x2} + \dot{m}_{x3} = 35 + 60 + 113 = 208 \text{ t/h} \quad (5.9)$$

L'eau d'appoint étant fournie à une température de 20°C, on détermine l'enthalpie de l'eau à l'entrée de la pompe.

$$h_{4t} \times (\phi - \dot{m}_a) + \dot{m}_a \times h_a = \phi \times h_{1p} \quad (5.10)$$

$$h_{1p} = \frac{607,080 \times (239,924 - 208) + 208 \times 20,062}{239,924} = 98,170 \text{ kcal/kg}$$

Ce résultat indique que l'eau à l'entrée de la pompe est

à l'état de liquide saturé à la pression de 1 bar.

On détermine la pression à la sortie de la pompe en prenant en considération les pertes dans les conduits.

$$\frac{P_{2p} - P_{2c}}{P_{2p}} = 0,05 \rightarrow P_{2p} = \frac{P_{2c}}{1 - 0,05} \quad (5.11.a)$$

$$P_{2p} = \frac{50}{1 - 0,05} = 52,632 \text{ bars} \quad (5.11.b)$$

La puissance consommée par la pompe est donc :

$$P_p = \phi \times \frac{P_{2p} - P_{1p}}{\rho_e} \quad (5.12.a)$$

$$P_p = \frac{239,924 \times 10^3}{3600} \times \frac{52,632 - 1}{10^3} \times 10^5 = 0,344 \text{ MW} \quad (5.12.b)$$

L'enthalpie à la sortie de la pompe est :

$$h_{2p} = \frac{P_p}{\phi} + h_{1p} \quad (5.13.a)$$

$$h_{2p} = \frac{0,344 \times 10^6 \times 10^{-3}}{4,185 \times \frac{239,924 \times 10^3}{3600}} + 98,17 = 99,403 \text{ kcal/kg} \quad (5.13.b)$$

Pour une pression de 52,632 bars, h_{2p} correspond à une température de 100°C. On prendra donc la température à l'entrée de la chaudière égale à 100°C.

La puissance nette produite par le cycle à vapeur est :

$$P_n = P_t - P_p \quad (5.14.a)$$

$$P_n = 33,927 - 0,344 = 33,583 \text{ MW} \quad (5.14.b)$$

CONCLUSION GENERALE

Notre travail constitue une première tentative de dimensionnement d'une usine d'incinération avec récupération d'énergie. Pour ce faire, nous avons été obligés d'avoir recours à l'utilisation de relations empiriques basées sur des données expérimentales ou statistiques. Ce genre d'installations n'existant pas dans notre pays et ne disposant pas de données sur les installations déjà existantes, notamment dans les pays industrialisés, nous ne pouvons malheureusement pas dire si les dimensions de notre installation sont conformes à ce qui se fait dans ce domaine à travers le monde.

Nous estimons cependant que notre travail a eu le mérite d'explorer un domaine complètement négligé dans notre pays, en dépit du fait que toutes nos grandes villes en souffrent énormément.

Nous émettons le souhait que d'autres spécialités telles que, le génie de l'environnement et le génie industriel se penchent sur la question afin de compléter et éventuellement de viabiliser le projet par une étude économique qui stimulerait l'intérêt des pouvoirs publics sur le problème de la nécessité du traitement des ordures ménagères.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **A.G.H.T.M.** Les résidus urbains. Deuxième édition. Paris :
Technique et documentation - Lavoisier, 1985.
Vol.1 : Collecte des résidus urbains
Nettoisement des voies publiques. 357 p.
Vol.2 : Traitement et valorisation. 437 p.
- [2] **RICARD, J.** Equipement thermique des usines génératrices
d'énergie électrique. Troisième édition. Paris : DUNOD,
1962. 1056 p.
- [3] **NUBER, K.** Calcul thermique des chaudières. Paris : DUNOD,
1972. 384 p.
- [4] **NAUD, H.P.** Appareils de levage motorisés légers et moyens.
Techniques de l'Ingénieur, 1982, Vol.A5I, A939.
DOREMANN, R. Résidus urbains. Techniques de l'Ingénieur,
1975, Vol.C4, C772.
PHILIPPE, M. Chaudières de récupération. Techniques de
l'Ingénieur, 1980, Vol.B1, B126.
- [5] **McADAMS, W.H.** Transmission de la chaleur. Deuxième
édition. Paris : DUNOD, 1964. 584 p.
- [6] **LEMASSON, G.** Elément de construction à l'usage de
l'ingénieur. Tome IX : Production et utilisation de la
vapeur. Troisième édition. Paris : DUNOD, 1962. 224 p.
- [7] **SOLTANI, K.** Générateur de vapeur. Projet de fin d'études :
Ecole Nationale Polytechnique, 1981.
- [8] **KHERRAT, A.** Etude et calcul d'une chaudière à vapeur
10t/h. Projet de fin d'études : Ecole Nationale
Polytechnique, 1990.

- [9] **REMIL, J.** Procédés de dépoussiérage des gaz dans l'industrie. Pollution Atmosphérique, Janvier-Mars 1990, N°125, P 53 - 60.
- [10] **ALLICHE, M.** Analyse exérgétique d'un cycle à vapeur. Projet de fin d'études : Ecole Nationale Polytechnique, 1990.
- [11] **MENNEESSIER, M.** Comment s'en débarrasser ? Science et vie, Mai 1990, N°872, P 104 - 115.

ANNEXE A

DETERMINATION DU POUVOIR CALORIFIQUE

Les méthodes de détermination du pouvoir calorifique des ordures ménagères peuvent être classées en deux groupes :

A.1. LES METHODES DIRECTES

A.1.1. RECONSTITUTION DU POUVOIR CALORIFIQUE PAR ECHANTILLONNAGE

Une fois le prélèvement est fait, on procède à un triage des produits contenus dans l'échantillon puis on détermine le pourcentage massique de chaque catégorie (a, b, ..., n). En désignant par P_a , P_b , ..., P_n les pouvoirs calorifiques différentes catégories, le PCI de l'ensemble s'exprime ainsi : *des*

$$PCI = (a \times P_a + b \times P_b + \dots + n \times P_n) - e \times 600 \quad [kcal/kg] \quad (A.1)$$

où e est le pourcentage d'humidité contenue dans l'échantillon.

A.1.2. MESURE A LA BOMBE CALORIMETRIQUE

On effectue au départ un prélèvement d'environ 150 kg d'ordures ménagères avec toutes les précautions nécessaires pour obtenir un échantillon représentatif.

Ce dernier est ensuite transporté dans un laboratoire où il sera traité comme suit :

- On procède au séchage de l'échantillon dans une étuve à 105°C, ce qui permettra de déterminer l'humidité de l'échantillon.
- On sépare ensuite tous les stériles qui n'apportent pas de calories.
- On procède à un broyage afin de rendre l'échantillon plus homogène puis on prélève une partie de 10 kg, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on obtienne un échantillon final de 1 kg.
- On brûle ce dernier dans une bombe calorimétrique afin de déterminer le PCS d'où on déduit le PCI connaissant la teneur en eau.

A.2. LES METHODES INDIRECTES

Les méthodes indirectes permettant de déterminer le pouvoir calorifique des ordures ménagères nécessitent la réalisation d'un essai sur une installation industrielle.

Le PCI s'exprime par la relation ci-après :

$$PCI = \frac{\text{Quantité de chaleur récupérée + pertes dans la chaudière}}{\text{Quantité d'ordures incinérées}}$$

Les pertes à mesurer sont les suivantes :

- chaleur emportée par les fumées : 15 à 20 % ;
- chaleur emportée par les mâchefers : 1,5 à 2,5 % ;
- pertes par imbrûlés : 4 à 8 % ;
- chaleur dissipée par le rayonnement des parois : 1 à 5 % ;

Pour plus de détails sur les méthodes de détermination des pouvoirs calorifiques des ordures ménagères, le lecteur intéressé pourrait consulter, avantageusement l'ouvrage cité en référence [1].

ANNEXE B

Fig.B.1 - Vue en coupe transversale de l'usine d'incinération.

Fig.B.2 - Vue de dessus de l'usine d'incinération.

NOMENCLATURE

- 1 : Cabine.
- 2 : Pont roulant.
- 3 : Hall.
- 4 : Camion de collecte.
- 5 : Quai de déchargement.
- 6 : Benne de reprise.
- 7 : Fosse de réception.
- 8 : Déchets ménagers.
- 9 : Niveau zéro.
- 10 : Trémie.
- 11 : Goulotte.
- 12 : Air primaire.
- 13 : Grilles.
- 14 : Surchauffeur.
- 15 : Grille de dégagement des mâchefers.
- 16 : Vaporisateur.
- 17 : Economiseur.
- 18 : Air secondaire.
- 19 : Camion de transport des mâchefers.
- 20 : Canalisation d'air de soufflage en provenance de la fosse.
- 21 : Dépoussiéreur.
- 22 : Réchauffeur d'air.
- 23 : Benne de collecte des poussières.
- 24 : Ventilateur de tirage des fumées.
- 25 : Cheminée.
- 26 : Ventilateur de soufflage d'air.
- 27 : Turbine à vapeur.
- 28 : Pompe d'alimentation.
- 29 : Canalisation de vapeur surchauffée.
- a : Eau d'appoint.
- X : Soutirage de 35 t/h à 14 bars et 320°C.

ANNEXE B

- Y : Soutirage de 60 t/h à 6 bars et 220°C.
- Z : Soutirage de 113 t/h à 1 bar.
- A : Vapeur surchauffée.
- B : Eau en provenance de la pompe.

Fig. B.1
 VUE EN COUPE TRANSVERSALE DE
 L'USINE D'INCINERATION

Echelle: 1cm → 3m.

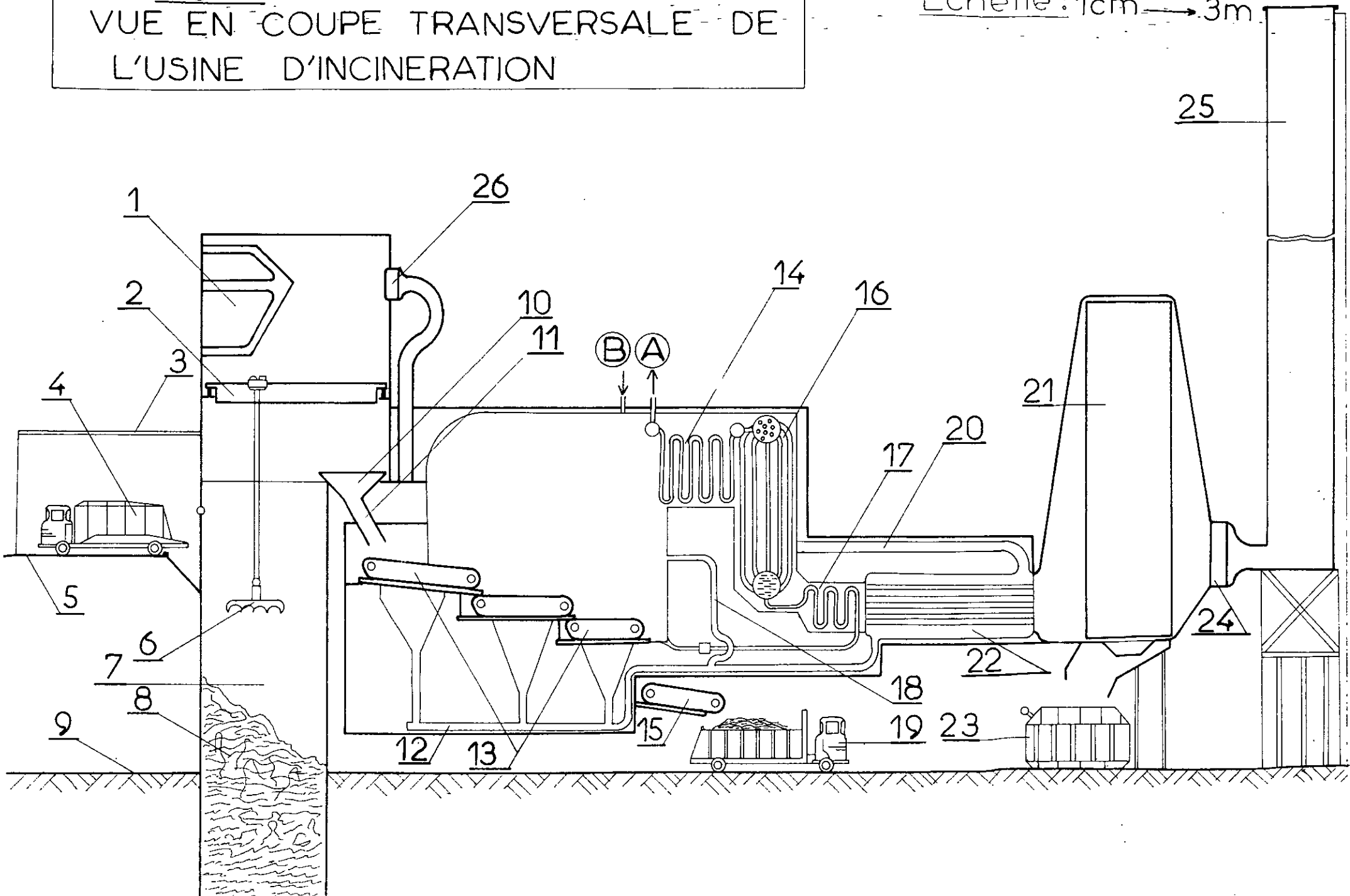
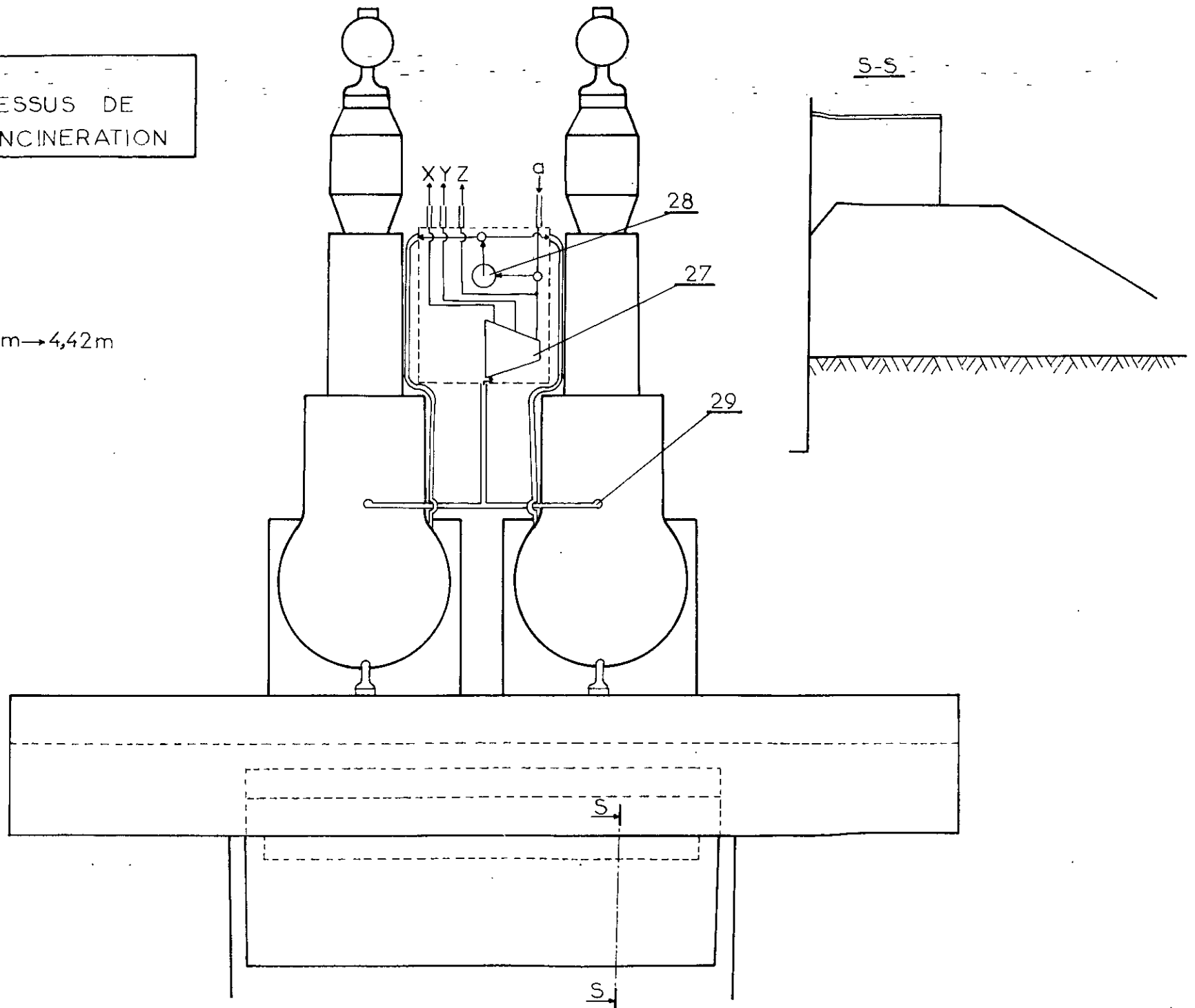


Fig.B.2
VUE DE DESSUS DE
L'USINE D'INCINERATION

Echelle : 1cm → 4,42m



ANNEXE C

AUTOMATISATION DES CALCULS

PROGRAMME DE CALCUL : - DIMENSIONNEMENT DE TOUS LES COMPOSANTS
DE L'USINE D'INCINERATION.
- CALCUL THERMODYNAMIQUE DE CYCLE A
VAPEUR.

FICHER DE DONNEES.

FICHER DE RESULTATS.

```

*****
*****
****          PROJET DE FIN D'ETUDES          ****
**
**
**          DIMENSIONNEMENT D'UNE USINE          **
**          D'INCINERATION DE DECHETS MENAGERS AVEC          **
**          RECUPERATION D'ENERGIE          ****
*****
*****
real mv,lc,kc,ks,lcc,ls,le,lu,lafo,xhp,hmf
data pi/3.1415927/
open( 1,file='don.dat',status='unknown')
open( 2,file='res.dat',status='unknown')
open( 3,file='don1.dat',status='unknown')
read(1,*)
read(1,*)
read(1,*)
c   write(*,*) 'Introduire la consommation horaire de dechets (t/h)'
read(1,*) C

write(2,*) '*****'
write(2,*) '****'
write(2,*) '**          FICHER DES RESULTATS          **'
write(2,*) '****'
write(2,*) '*****'

write(2,*) '*****'
write(2,*) '*****          LES PONTS ROULANTS          *****'
write(2,*) '*****'

write(2,*) '*****          Mouvement de levage          *****'
write(2,*) 'A/ Groupe de mecanismes'
c   write(*,*) 'Introduire le temps moyen de fonctionnement (h)'
read(1,*) tmfon
c   write(*,*) 'Introduire l etat de sollicitation'
read(1,*) etsol
write(2,*) 'groupe des mecanismes correspondant est 5m'

write(2,*) 'B/ Capacite de charge (kg)'
c   write(*,*) 'Introduire le volume utile de la benne (m^3)'
read(1,*) vu
cp=vu*0.5*1000
write(2,*) cp,'+M0'

write(2,*) 'C/ Vitesse de levage (m/mn)'
read(1,*) Vile
write(2,*) vile
write(2,*) 'D/ Facteur de marche'
read(1,*) facm
write(2,*) facm

write(2,*) '*****          Mouvement de direction          *****'
write(2,*) 'A/ Vitesse de direction (m/mn)'
read(1,*) vidi
write(2,*) vidi
write(2,*) '*****          Mouvement de translation          *****'
write(2,*) 'A/ Nombre de chargements par heure (char/h)'
NOch=((c/2)/(0.5*vu))
write(2,*) noch
write(2,*) 'B/ Cycle de chargement (mn)'

```



```

cych=(60./noch)
write(2,*) cych
write(2,*) 'C/ Vitesse de translation (m/mn)'
read(1,*) vitr
write(2,*) vitr

```

```

write(2,*) '*****'
write(2,*) '*****          LA FOSSE DE RECEPTION          *****'
write(2,*) '*****'

```

```

vg=(24*c*2)/0.3
write(2,*) 'Le volume geometrique de la fosse (m^3)'
write(2,*) vg
Vlmo=(vitr+vidi)/2

```

```

c   write(*,*) 'Introduire la longueur de la travee'

```

```

read(1,*) lotr
write(2,*) 'La longueur de la fosse (m)'
lofo=4*lotr
write(2,*) lofo

```

```

c   write(*,*) 'Introduire la position de la tremie'

```

```

read(1,*) potr
lafo=sqrt(((vimo*(cyh-1)/2)**2)-(potr**2))
write(2,*) 'La largeur de la fosse (m)'
write(2,*) lafo
hafo=vg/(lofo*lafo)

```

```

write(2,*) 'La hauteur de la fosse (m)'
write(2,*) hafo

```

```

write(2,*) '*****'
write(2,*) '*****          LES FOURS          *****'
write(2,*) '*****'

```

```

sugr=((1000*C/2)*2000)/900000
voch=((1000*c/2)*2000)/80000
write(2,*) 'Surface des grilles (m^2)'
write(2,*) sugr
write(2,*) 'Volume de la chambre de combustion (m^3)'
write(2,*) voch

```

```

write(2,*) '*****'
write(2,*) '*****          LES CHAUDIERES          *****'
write(2,*) '*****'

```

```

c   write(*,*) 'Introduire le pouvoir calorifique'

```

```

read(1,*) pci
vao=((1.01*(pci/1000)+0.5)+(pci/1000))/2
write(2,*) 'Le volume d air theorique (Nm^3/kg)'
write(2,*) vao
var=vao+0.8*vao

```

```

write(2,*) 'Le volume d air reel (Nm^3/kg)'
write(2,*) var

```

```

vofu=(3*pci)/1000
write(2,*) 'Le volume des fumees (Nm^3/kg)'
write(2,*) vofu

```

```

c   write(*,*) 'donner la valeur de B1'

```

```

read(1,*) B1

```

```

c   write(*,*) 'donner la valeur de A2'

```

```

read(1,*) A2

```

```

varphi=(0.8*100*2000)/(B1-A2)

```

```

write(2,*) 'varphi=',varphi

```

```

varphis=varphi*1000/3600

```

```

write(2,*) 'varphis=',varphis
T=varphi/100
write(2,*) 'T=',T
mv=varphis/2
write(2,*) 'mv=',mv
c ***** les ecrans d'eau *****
write(2,*) '***** Calcul des ecrans d eau *****'
c write(*,*) 'donner la valeur tvc0,tvc1'
read(1,*) tvc0,tvc1
c write(*,*) 'donner la valeur de hvc0'
read(1,*) hvc0
c write(*,*) 'donner la valeur de hvc1'
read(1,*) hvc1
c write(*,*) 'donner la valeur de Tc0'
read(1,*) Tc0
Tc1=Tc0-(mv*(hvc1-hvc0)*3600)/(6*1000*50*0.363)
write(2,*) 'Tc1=',Tc1
dcc=sqrt(2*sugr)
write(2,*) 'dcc=',dcc
lc=(1250*4)/(pi*(dcc**2))
write(2,*) 'lc=',lc
c write(*,*) 'donner la valeur de di'
read(1,*) di
c write(*,*) 'donner la valeur de de'
read(1,*) de
nc=(pi*dcc)/(2*de)+1
write(2,*) 'nc=',nc
write(2,*) '# Un calcul de verification reste indispensable #'
Scc=nc*pi*de*lc/2
write(2,*) 'Scc=',Scc
delc=((Tc0-tvc1)-(Tc1-tvc0))/(log((Tc0-tvc1)/(Tc1-tvc0)))
write(2,*) 'delc=',delc
pc=(tvc1-tvc0)/(Tc0-tvc0)
rc=(Tc0-Tc1)/(tvc1-tvc0)
c write(*,*) 'pc=',pc
c write(*,*) 'Rc=',Rc
c write(*,*) 'donner la valeur de Fc'
read(3,*) Fc
kc=(mv*(hvc1-hvc0)*3600)/(Scc*delc*Fc)
write(2,*) 'kc=',kc
c ***** Calcul du surchauffeur *****
write(2,*) '***** Le surchauffeur *****'
Ts0=Tc1
c write(*,*) 'donner la valeur de tvs0,tvs1'
read(1,*) tvs0,tvs1
c write(*,*) 'donner la valeur de hvs0'
read(1,*) hvs0
c write(*,*) 'donner la valeur de hvs1'
read(1,*) hvs1
Ts1=Ts0-(mv*(hvs1-hvs0)*3600)/(6*50*1000*0.363)
write(2,*) 'Ts1=',Ts1
c write(*,*) 'donner la valeur de vs'
read(1,*) vs
Sps=(mv*vs)/40
write(2,*) 'Sps=',Sps
nsl=(4*Sps)/(pi*(di**2))
ns=nsl+1
write(2,*) 'ns=',ns
write(2,*) '# Un calcul de verification reste indispensable #'
es=0.5*((di*1000*0.44)/(0.8*1*10.55-0.6*0.44))+2

```

```

write(2,*) 'Epaisseur minimale des tubes (mm)'
write(2,*) 'es=',es
Sc=(mv*vs)/50
write(2,*) 'Sc=',Sc
dc=sqrt((4*Sc)/pi)
write(2,*) 'dc=',dc
es1=0.5*(1000*dc*0.44)/((((0.9*(1.7*dc-de)*10550)/(de*1000))-
$0.6*0.44))+2
write(2,*) 'Epaisseur minimale du collecteur (mm)'
write(2,*) 'es1=',es1
Lcc=ns*1.7*dc
write(2,*) 'Lcc=',lcc
dels=((Ts0-tvs1)-(Ts1-tvs0))/log((Ts0-tvs1)/(Ts1-tvs0))
write(2,*) 'dels=',dels
ps=(tvs1-tvs0)/(Ts0-tvs0)
rs=(Ts0-Ts1)/(tvs1-tvs0)
c   write(*,*) 'ps=',ps
c   write(*,*) 'Rs=',rs
c   write(*,*) 'donner la valeur de Fs'
read(3,*) Fs
Tmfs=(Ts1+Ts0)/2+273
write(2,*) 'Tmfs=',tmfs
Spf=((Lcc+ns*de)*4+2*0.03*Lcc)
write(2,*) 'Spf=',Spf
Pm=2*((Lcc+4.06)+ns*(4+0.06))
write(2,*) 'Pm=',pm
dh=(4*Spf)/pm
write(2,*) 'dh=',dh
Re=(dh*3.5*35000)/(4.22)
c   write(*,*) 'Re=',re
c   write(*,*) 'lire fn pour ns'
c   write(*,*) 'ns=',ns
read(3,*) fn
alhab=0.284*1*fn*(0.054/dh)*(re)**(0.61)
write(2,*) 'alhab=',alhab
Tmps=((Tvs0+70)+(tvs1+70))/2+273
write(2,*) 'tmps=',tmps
c   write(*,*) 'pour Tmfs'
c   write(*,*) 'Tmfs=',tmfs
c   write(*,*) 'lire sur les abaques epef, epcf, depf'
read(3,*) epef, epcf, depf
eef=epef+epcf-depf
write(2,*) 'emissivite des fumees'
write(2,*) 'eef=',eef
PeL1=0.084*(Tmps/Tmfs)
PcL1=0.112*(Tmps/Tmfs)
c   write(*,*) 'PeL1=',PeL1
c   write(*,*) 'PcL1=',PcL1
c   write(*,*) 'on remplace la temp par Tmps'
c   write(*,*) 'Tmps=',tmps
c   write(*,*) 'donner la valeur de eep1, ecpl'
read(3,*) eep1, ecpl
eep=eep1*(Tmfs/tmps)**0.45
ecp=ecpl*(tmps/tmps)**0.65
c   write(*,*) 'eep=',eep
c   write(*,*) 'ecp=',ecp
c   write(*,*) 'la correction se fait en ft de PeL1+PcL1'
pl2=pell+pcll
c   write(*,*) 'PcL1+PeL1=',pl2
c   write(*,*) 'Tmps=',tmps

```

```

c   write(*,*) 'lire depp'
    read(3,*) depp
    eep=eep+ecp-depp
    write(2,*) 'emissivite de la paroi'
    write(2,*) 'eep=',eep
    alphas1=(4.88)*(eef*(tmfs**4)-eep*(tmfs**4))/(tmfs-tmps)
    alphas=alphas1/(10000000)
    write(2,*) 'alphas=',alphas
    q=mv/ns
    write(2,*) 'q=',q
    alphas1=8*(q**(0.75))/(di**(1.75))
    write(2,*) 'alphas1=',alphas1
    ks=1/((1/(alphab+alphas))+(1/alphas1)+(0.005/50))
    write(2,*) 'ks=',ks
    Ss=((hvs1-hvs0)*mv*3600)/(ks*dels*Fs)
    write(2,*) 'Ss=',ss
    Nns=Ss/(ns*pi*0.06*4)
    nn=nns+1
    write(2,*) 'Nn=',nn
    write(2,*) '# Un calcul de verification reste indispensable #'
    ls=(nn+(nn-1)*1.5)*0.06
    write(2,*) 'ls=',ls
c   ***** Calcul de l'evaporateur *****
    write(2,*) '***** Le faisceau evaporateur *****'
    Tv0=Ts1
c   write(*,*) 'donner tvv0,tvv1'
    read(1,*) tvv0,tvv1
c   write(*,*) 'donner hvv0'
    read(1,*) hvv0
c   write(*,*) 'donner hvv1'
    read(1,*) hvv1
    Tv1=tv0-(mv*(hvv1-hvv0)*3600)/(6*50*1000*0.363)
    write(2,*) 'Tv1=',tv1
    delv=((tv0-tvv1)-(tv1-tvv0))/log((tv0-tvv1)/(tv1-tvv0))
    write(2,*) 'delv=',delv
    Pv=(tvv1-tvv0)/(tv0-tvv0)
c   write(*,*) 'Pv=',pv
    Rv=(tv0-tv1)/(tvv1-tvv0)
c   write(*,*) 'Rv=',rv
c   write(*,*) 'lire Fv'
    read(3,*) Fv
    Sv=((hvv1-hvv0)*mv*3600)/(120*delv*fv)
    write(2,*) 'Sv=',sv
    nv=(sv/(pi*de*10))+1
    write(2,*) 'nv=',nv
    write(2,*) '# Un calcul de verification reste indispensable #'
c   ***** Calcul de l'economiseur *****
    write(2,*) '***** L economiseur *****'
    te0=tv1
c   write(*,*) 'donner tve0,tve1'
    read(1,*) tve0,tve1
c   write(*,*) 'donner hve0'
    read(1,*) hve0
c   write(*,*) 'donner hve1'
    read(1,*) hve1
    tel=te0-(mv*(hve1-hve0)*3600)/(6*50*1000*0.363)
    write(2,*) 'Tel=',tel

```

```

pe=(tve1-tve0)/(te0-tve0)
c   write(*,*) 'pe=',pe
re=(te0-tel)/(tve1-tve0)
c   write(*,*) 'Re=',re
c   write(*,*) 'lire Fe'
read(3,*) Fe
dele=((te0-tve1)-(tel-tve0))/log((te0-tve1)/(tel-tve0))
write(2,*) 'dele=',dele
Dv=(1.02*mv)/1000
write(2,*) 'Dv=',dv
Spe=dv/0.7
write(2,*) 'Spe=',spe
c   write(*,*) 'donner die'
read(1,*) die
sse=(pi*(die**2))/4
write(2,*) 'sse=',sse
ne=spe/sse
write(2,*) 'ne=',(ne+1)
write(2,*) '# Un calcul de verification reste indispensable #'
Se=(3600*mv*(hve1-hve0))/(fe*50*dele)
write(2,*) 'Se=',se
le=se/0.9
write(2,*) 'Le=',le
lu=le/(ne+1)
write(2,*) 'lu=',lu
nnc=(lu/5)+1
write(2,*) 'NNc=',nnc
write(2,*) '# Un calcul de verification reste indispensable #'
he=nnc*0.14
write(2,*) 'He=',he
c   ***** Calcul du rechauffeur d'air *****
write(2,*) '***** Le rechauffeur d air *****'
phi=51.094*(10**5)
c   write(*,*) 'donner tvr0 , tvr1'
read(1,*) tvr0, tvr1
tr0=tel
tr1=120
delr=((tr0-tvr1)-(tr1-tvr0))/log((tr0-tvr1)/(tr1-tvr0))
write(2,*) 'delr=',delr
pr=(tvr1-tvr0)/(tr0-tvr0)
c   write(*,*) 'Pr=',pr
rr=(tr0-tr1)/(tvr1-tvr0)
c   write(*,*) 'Rr=',rr
c   write(*,*) 'donner Fr'
read(3,*) Fr
sr=(phi)/(fr*14*delr)
write(2,*) 'Sr=',sr
write(2,*) 'on prend sp=7.5'
nr=((4*7.5)/(pi*(0.09**2)))+1
write(2,*) 'nr=',nr
write(2,*) '# Un calcul de verification reste indispensable #'
hr=sr/(pi*0.1*nr)
write(2,*) 'Hr=',hr
c   ***** Calcul dec pertes de charge *****
write(2,*) '***** Les pertes de charge *****'
c   write(*,*) '***** Les pertes de charge *****'
write(2,*) '***** Dans la chambre de combustion *****'
Tmfc=(tc0+tc1)/2
write(2,*) 'Tmfc=',tmfc
omegac=1.317*(273/(273+tmfc))

```

```

write(2,*) 'omegac=',omegac
pic=0.00094*(omegac**(0.852))*(dcc**(-1.269))*(3.5**(1.852))*lc
write(2,*) 'Pic=',pic
write(2,*) 'Le resultat est en mm d eau'
write(2,*) '***** Dans le surchauffeur *****'
tds=(tvs0+tvs1)/2+70+0.9*dels
write(2,*) 'tds=',tds
omegas=1.317*(273/(273+tds))
write(2,*) 'omegas=',omegas
res=(omegas*3.5*6000)/(4.22)
c write(*,*) 'Res=',res
c write(*,*) 'lire fns ,fbs'
read(3,*) fns, fbs
pis=0.204*fbs*fns*ns*(3.5**2)*omegas
write(2,*) 'PIs=',pis
write(2,*) '***** Dans le vaporisateur *****'
tdv=(tvv0+tvv1)/2+15+0.9*delv
write(2,*) 'tdv=',tdv
omegav=1.317*(273/(273+tdv))
write(2,*) 'omegav=',omegav
rev=(omegav*3.5*6000)/(4.22)
c write(*,*) 'Rev=',rev
c write(*,*) 'lire fnv, fbv'
read(3,*) fnv, fbv
piv=0.204*fbv*fnv*nv*(3.5**2)*omegav
write(2,*) 'PIv=',piv
write(2,*) '***** Dans l economiseur *****'
tmfe=(te0+te1)/2
write(2,*) 'tmfe=',tmfe
omegae=1.317*(273/(273+tmfe))
write(2,*) 'omegae=',omegae
pie=0.0165*omegae*(3.5**2)*He
write(2,*) 'Pie=',pie
write(2,*) '***** Dans le rechauffeur d air *****'
tmfr=(tr0+tr1)/2
write(2,*) 'tmfr=',tmfr
omegar=1.317*(273/(273+tmfr))
write(2,*) 'omegar=',omegar
pir=0.00094*(omegar**(0.852))*(0.09**(-1.269))*(6**(1.852))*hr*nr
write(2,*) 'PIr=',pir
write(2,*) '*****
write(2,*) '***** LES DEPOUSSIERS *****
write(2,*) '*****
c write(*,*) 'Introduire la vitesse des fumees'
read(1,*) vd
sdp=(vofu*(c/2)*(1000/(3600*vd)))*((tr1+273)/(273))
write(2,*) 'La section de passage des fumees (m^2)'
write(2,*) sdp
c write(*,*) 'Introduire la hauteur des plaques'
read(1,*) hapl
c write(*,*) 'Introduire la distance entre fil et plaque'
read(1,*) difp
nopl=(sdp/(hapl*difp*2))+1
write(2,*) 'Le nombre de plaques'
write(2,*) nopl+1
write(2,*) '*****
write(2,*) '***** LES CHEMINEES *****
write(2,*) '*****

```

```

r=vofu*((tr1+273)/273)*(c/2)*1000

```

```

write(2,*) 'debit des fumees (m^3/h)'
write(2,*) 'r=',r
c   write(*,*) 'Introduire la concentration maximale en poussières'
read(1,*) cm
c   write(*,*) 'Introduire la teneur en poussières'
read(1,*) tepo
qt=tepo*vofu*(c/2)
write(2,*) 'qt=',qt
xhp=((680*qt/cm)*(1/r/(tr1-20))**(1/3.))**(1/2.)
write(2,*) 'La hauteur de la cheminee (m)'
write(2,*) xhp
c   write(*,*) 'introduire la vitesse des fumees dans la cheminee'
read(1,*) vifu
dich=sqrt((r/3600)*(4/(pi*vifu)))
write(2,*) 'Le diametre de la cheminee (m)'
write(2,*) dich

write(2,*) '*****'
write(2,*) '***** LES VENTILATEURS *****'
write(2,*) '*****'
write(2,*) 'A/ Ventilateur de tirage'
devof=r*(1+0.15)
write(2,*) 'Debit volumique maximum des fumees (m^3/h)'
write(2,*) devof
c   write(*,*) 'Introduire les pertes de charge dans les depoussiereurs'
read(1,*) pid
Hmf=((pic+pis+piv+pie+pir+pid)/1000)+xhp)*(1+0.1)
write(2,*) ' La hauteur manometrique totale (m)'
write(2,*) hmf
write(2,*) 'B/ Ventilateur de soufflage'
devoa=var*(c/2)*1000*((tvr0+273)/273)*(1+0.15)
write(2,*) 'Debit volumique maximum d air (m^3/h)'
write(2,*) devoa

write(2,*) '*****'
write(2,*) '***** TURBINE A VAPEUR *****'
write(2,*) '*****'
c   write(*,*) 'debit du premier soutirage'
read(1,*) dpso
c   write(*,*) 'enthalpie premier soutirage'
read(1,*) epso
c   write(*,*) 'debit du second soutirage'
read(1,*) dsso
c   write(*,*) 'enthalpie second soutirage'
read(1,*) esso
c   write(*,*) 'debit du troisieme soutirage'
read(1,*) dtso
c   write(*,*) 'enthalpie a l entree de la turbine'
read(1,*) eetu
c   write(*,*) 'enthalpie a la sortie isentropique de la turbine'
read(1,*) eistu
c   write(*,*) 'introduire le rendement de la turbine'
read(1,*) ret
estu=eetu-ret*(eetu-eistu)
puit=(varphi*(eetu-epso)+(varphi-dpso)*(epso-esso)+
$(varphi-dpso-dsso)*(esso-estu))*(4.185/3600)
write(2,*) 'puissance produite par la turbine (MW)'
write(2,*) puit
dea=dpso+dsso+dtso
write(2,*) 'debit d eau d appoint (t/h)'
write(2,*) dea
c   write(*,*) 'enthalpie de l eau d appoint (kcal/kg)'
read(1,*) eeap
eepeo=(estu*(varphi-dea)+dea*eeap)/varphi

```

```
write(2,*) 'enthalpie a l entree de la pompe (kcal/kg)'  
write(2,*) eepo  
c write(*,*) 'introduire la pression a l entree de la pompe'  
read(1,*) pepo  
c write(*,*) 'introduire la pression a la sortie de la pompe'  
read(1,*) pspo  
puiip=varphi*(pspo-pepo)*(0.100/3600)  
write(2,*) 'puissance consommee par la pompe (MW)'  
write(2,*) puiip  
espo=(puiip*3600/(varphi*4.185))+eepo  
write(2,*) 'enthalpie a la sortie de la pompe (kcal/kg)'  
write(2,*) espo  
puiin=puit-puiip  
write(2,*) 'puissance nette produite (MW)'  
write(2,*) puiin  
stop  
end
```


FICHER-DE-DONNEES

100
24
3
4
30
1
30
60
20
30
2000
767.885
101.008
100 150
101.008
151.063
950
0.05
0.06
255.84 400
668.712
767.885
0.07341
230 255.84
236.588
668.712
150 230
151.063
236.588
0.038
20 100
1
20
0.15
0.06
0.6
8
5
35
736.927
60
691.264
113
768.717
589.120
0.9
20.062
1
52.632

0.99
0.99
1
0.105
0.12
0.01
0.12
0.092
0.005
1
0.8
0.9
1
0.043
1
0.043

```

*****
***.                                     ****
**                                     ****
**          FICHER DES RESULTATS          **
***                                     ****
*****

*****
*****          LES PONTS ROULANTS          *****
*****          Mouvement de levage          *****
A/ Groupe de mecanismes
groupe des mecanismes correspondant est 5m
B/ Capacite de charge (kg)
  2000.000000+M0
C/ Vitesse de levage (m/mn)
  30.000000
D/ Facteur de marche
  1.000000
*****          Mouvement de direction          *****
A/ Vitesse de direction (m/mn)
  30.000000
*****          Mouvement de translation          *****
A/ Nombre de chargements par heure (char/h)
  25
B/ Cycle de chargement (mn)
  2.400000
C/ Vitesse de translation (m/mn)
  60.000000
*****
*****          LA FOSSE DE RECEPTION          *****
*****
Le volume geometrique de la fosse (m^3)
  16000.000000
La longueur de la fosse (m)
  80
La largeur de la fosse (m)
  9.604693
La hauteur de la fosse (m)
  20.823150
*****
*****          LES FOURS          *****
*****
Surface des grilles (m^2)
  111.111100
Volume de la chambre de combustion (m^3)
  1250.000000
*****
*****          LES CHAUDIERES          *****
*****
Le volume d air theorique (Nm^3/kg)
  2.260000
Le volume d air reel (Nm^3/kg)
  4.068000
Le volume des fumees (Nm^3/kg)
  6.000000
varphi=      239.924300
varphis=     66.645640
T=          2.399243
mv=         33.322820
***** Calcul des ecrans d eau *****

```

```

Tc1=      894.860400
dcc=      14.907120
lc=       7.161973
nc=       391
# Un calcul de verification reste indispensable #
Scc=      263.925000
delc=     797.427400
kc=       28.819390
***** Le surchauffeur *****
Tsi=     785.613200
Sps=     6.115570E-02
ns=       32
# Un calcul de verification reste indispensable #
Epaisseur minimale des tubes (mm)
es=       3.345401
Sc=      4.892456E-02
dc=      2.495850E-01
Epaisseur minimale du collecteur (mm)
es1=      2.956837
Lcc=     13.577430
dels=    512.118500
Tmfs=   1113.237000
Spf=     62.804350
Pm=     295.114800
dh=     8.512530E-01
alphan=   8.616120
tmps=    670.920000
emissivite des fumees
eef=     2.150000E-01
emissivite de la paroi
eep=     2.735703E-01
alphan=  30.315740
q=       1.041338
alphan=  1559.862000
ks=      37.840110
Ss=     620.125800
Nn=      26
# Un calcul de verification reste indispensable #
ls=      3.810000
***** Le faisceau evapourateur *****
Tvi=     309.593800
delv=    237.497400
Sv=     1818.916000
nv=      965
# Un calcul de verification reste indispensable #
***** L economiseur *****
Tel=     215.381100
dele=    72.254580
Dv=     3.398927E-02
Spe=    4.855610E-02
sse=    1.134115E-03
ne=      43
# Un calcul de verification reste indispensable #
Se=     3549.866000
Le=     3944.295000
lu=     91.727800
NNc=    19
# Un calcul de verification reste indispensable #
He=     2.660000
***** Le rechauffeur d air *****

```

```

delr=      107.507200
Sr=       3771.914000
on prend sp=7.5
nr=       1179
# Un calcul de verification reste indispensable #
Hr=       10.183520
***** Les pertes de charge *****
***** Dans la chambre de combustion *****
Tmfc=     922.430200
omegac=   3.007629E-01
PIc=     7.983344E-04
Le resultat est en mm d eau
***** Dans le surchauffeur *****
tds=      858.826600
omegas=   3.176644E-01
PIs=     1.092328
***** Dans le vaporisateur *****
tdv=     471.667600
omegav=   4.828208E-01
PIv=     50.066590
***** Dans l economiseur *****
tmfe=     262.487400
omegae=   6.714276E-01
PIe=     3.609947E-01
***** Dans le rechauffeur d air *****
tmfr=     167.690500
omegar=   8.158583E-01
PIr=     5564.651000
*****
***** LES DEPOUSSIERS *****
*****
La section de passage des fumees (m^2)
119.963400
Le nombre de plaques
21
*****
***** LES CHEMINEES *****
*****
debit des fumees (m^3/h)
r= 431868.100000
qt= 180.000000
La hauteur de la cheminee (m)
76.252930
Le diametre de la cheminee (m)
4.369526
*****
***** LES VENTILATEURS *****
*****
A/ Ventilateur de tirage
Debit volumique maximum des fumees (m^3/h)
496648.300000
La hauteur manometrique totale (m)
90.061520
B/ Ventilateur de soufflage
Debit volumique maximum d air (m^3/h)
251046.300000
*****
***** TURBINE A VAPEUR *****
*****
puissance produite par la turbine (MW)

```

33.927560
debit d eau d appoint (t/h)
208.000000
enthalpie a l'entree de la pompe (kcal/kg)
98.170510
puissance consommee par la pompe (MW)
3.441048E-01
enthalpie a la sortie de la pompe (kcal/kg)
99.404250
puissance nette produite (MW)
33.583450