

REPUBLICQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP
ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES

DEPARTEMENT DU GENIE ELECTROMECHANIQUE



Gm. 0667

PROJET DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception

TITRE : Influence des dépôts issus de la combustion sur les surchauffeurs et conception d'un surchauffeur pendentif pour les chaudières des tranches 302 et 303 du CAP des Biches.

AUTEUR : Cyrille A.F. MONWANOU
DIRECTEUR INTERNE : Paul DEMBA
DIRECTEUR EXTERNE : Sérigne M. DIOP
DATE : Juillet 1993

REMERCIEMENTS

Ce travail vient de la convergence de multiples efforts développés par des personnes qui, de près ou de loin ont contribué à son aboutissement. Nous voudrions remercier sincèrement :

- Monsieur Paul Demba, directeur interne du projet, ing, M.Sc.A, professeur à l'Ecole Polytechnique de Thiès. La rédaction de ce rapport n'a pu être menée à bien que grâce à vos conseils et à votre encadrement.

- Monsieur Sérigne M. Diop, directeur externe du projet, ing, expert en machine thermique et directeur de la centrale électrique de Bel air. Votre ouverture d'esprit, votre encadrement et votre expérience professionnelle nous ont aidé à cerner les problèmes et le fonctionnement des chaudières.

- Notre gratitude va aussi à Monsieur El Oualith Sow, ing, chef d'entretien à la centrale thermique du Cap des Biches pour sa disponibilité permanente, sa patience et pour l'intérêt qu'il n'a cessé de manifester.

- La contribution de Monsieur Massemba Thioye ,de Monsieur Sana Fati, docteurs en génie chimique, professeurs vacataires à l'EPT ainsi que celle des camarades dont une page ne suffirait à nommer a été salutaire.

- A toutes les personnes qui volontairement ou involontairement nous ont poussé à progresser dans notre voie, notre gratitude.

L'auteur

DEDICACE

A LA PERSONNE

à qui je me doit de penser par dessus toute chose:

Ce rapport est à toi

A mes parents:

Amour pour amour.

Vous m'avez donné la vie

Vous m'avez nourri

Vous m'avez vêtu

Que bonheur et longévité vous soient accordés par Dieu

A Jean et Suzanne Monhouanou:

Après de vous, j'ai trouvé refuge, l'affection et la joie de vivre.

Puisse Dieu nous aidé à donner davantage à vos enfants.

A mes frères, soeurs, cousins, cousines et amis:

Voici le fruit d'une si longue séparation.

Avant - propos

Quelle industrie n'a aujourd'hui au coeur de ses préoccupations le contrôle et l'amélioration de la qualité de ses ressources dans le but d'accroître ou de maintenir à un maximum possible son rendement? Récent pour les petites entreprises, ce souci a toujours été celui des unités industrielles complexes, en particulier, de ces usines à feu continu. Il a fallu surveiller des pressions, des températures parce-que l'on distillait, l'on mélangeait, l'on fabriquait de la vapeur. La production de cette vapeur suivra elle même des étapes:

Partant de la marmite, passant par les pompes à feu, la machine de WATT, elle aboutit à l'utilisation de la chaudière. De nos jours, c'est encore la chaudière qui dans la majorité des cas, produit à pression et à température déterminées, la vapeur qui fait tourner les turbo-alternateurs de nos centrales thermiques. Mais outre la production d'énergie motrice et électrique par détente dans une turbine, elle est aussi employée comme matière première ou comme source de chaleur intermédiaire dans presque toutes les branches de l'industrie chimique, alimentaire, papetière, textile...

Du fait de l'importance qu'elle revêt, l'utilisation de la chaudière nécessite une bonne connaissance de ses composantes, du combustible qu'elle brûle, afin de comprendre, de prévoir, d'exploiter et améliorer les évolutions possibles en son sein. D'autre part, ses composantes doivent être conçues en observant des règles et des méthodes particulières tenant compte des résultats à obtenir, de la sécurité et des aspects économiques.

SOMMAIRE

L'étude de l'influence des dépôts de combustion sur les surchauffeurs horizontaux des chaudières de la centrale thermique du Cap des Biches est née du souci de trouver les causes et conséquences de ces dépôts afin d'envisager des solutions efficaces pour réduire la diminution de rendement qu'ils engendrent. A cette étude, s'ajoute la vérification des données de base des surchauffeurs horizontaux. La recherche d'une solution fiable et d'un coût minimal d'exploitation pour les machines complexes comme la chaudière passe obligatoirement par la conception optimale des différents constituants dont les surchauffeurs.

Le présent rapport qui examine ces différentes facettes comprends cinq parties:

- La première présente la centrale, ses chaudières et surchauffeurs ainsi que les problèmes d'exploitation nés de l'inadéquation entre surchauffeurs et qualité actuelle des fuels.
- La deuxième traite du mécanisme de formation des dépôts et des effets qui en résultent.
- La troisième expose les caractéristiques des surchauffeurs horizontaux propres et vérifient leur tenue.
- La quatrième développe la conception des surchauffeurs pendentifs.
- La cinquième donne des recommandations pour la solution des problèmes rencontrés.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
DEDICACE	ii
Avant - propos	iii
SOMMAIRE	iv
Première partie INTRODUCTION	
I - Description de la situation actuelle de la centrale électrique du Cap des Biches et des surchauffeurs des tranches 302 et 303	2
I-1- La centrale électrique du Cap des Biches	2
I-2- Les chaudières et surchauffeurs des tranches 302 et 303	5
II- Le projet	6
III- Importance	7
IV- Notations et unités utilisées	8
Deuxième partie MECANISME DE FORMATION DES DEPOTS ET EFFETS RESULTANT	
I- MECANISME DE FORMATION DES DEPOTS	12
I-1- Composition des fumées	12
I-1-1- Le combustible	12
I-1-2- Composition du fuel-oil lourd	12
I-1-3- Combustion et composition des fumées	13
I-2- Formation des dépôts dans les chaudières	14
I-2-1- Parties chaudes	14
I-2-2- Parties froides	15
II- EFFET RESULTANT DE LA FORMATION DES DEPOTS	16
II-1- Corrosion	16
II-1-1- Oxydation et corrosion des aciers	17
II-1-2- Action corrosive des dépôts de cendres produits par le combustible sur les aciers	19
II-2- Autres effets	23
II-3- Moyens de lutte contre les problèmes observés sur les tubes des surchauffeurs	23
II-3-1- Réduction de l'excès d'air de combustion	23
II-3-2- Injection des additifs	26

**Troisième partie LES SURCHAUFFEURS HORIZONTAUX
 PROPRES**

I-	Données du design	29
II-	Comportement des surchauffeurs horizontaux propres	30
III-	Etablissement de la cartographie des températures des tubes propres en utilisant les paramètres du design	31
	III-1- surface d'échange et chaleur totale à échangée pour chaque étage de surchauffeur	31
	III-2- Calcul des coefficients de transfert et des températures de métal aux points critiques	31
IV-	Calculs des paramètres mécaniques	32
	IV-1- Calcul de la contrainte de comparaison .	32
	IV-2- Vérification du facteur de sécurité . . .	35
V-	Suggestions	36

**Quatrième partie CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR
 PENDENTIF POUR LES TRANCHES 302 ET
 303**

I-	Généralité : Méthode de dimensionnement	38
	I-1- Coefficient d'échange global	39
	I-2- Différence de température	40
	I-3- Surface totale d'échange	42
II-	Application de la méthode à la conception des surchauffeurs pendentifs	44
	II-1- Paramètres fonctionnels	45
	II-1-1 Données de calcul	45
	II-1-2 Chaleur totale à échanger	45
	II-1-3 Choix de l'acier	46
	II-1-4 Calcul des tubes	47
	II-1-5 Calcul des coefficients partiels et global de transfert	49
	II-1-6 Différence de température moyenne	57
	II-1-7 Calcul de Φ_1 et vérification des valeurs fixées à priori	58
	II-1-8 Débit de gaz nécessaire	59
	II-2- Paramètres constructifs de l'échangeur .	61
	II-3- Matériels accessoires pour protection des surchauffeurs	64
	II-3-1 Maintien en position et supportage des tubes	64
	II-3-2 Régulation de la surchauffe : le désurchauffeur	65
	II-3-3 Nettoyage externe	68

Recommandations et conclusions

Annexe I

Annexe II

Annexe III

Annexe IV

Liste des figures

Figure N°

- 1	Eléments caractéristiques d'une tranche de la CIIII	3
- 2	Effet de V_2O_5 et de Na_2SO_4 sur l'oxydation des aciers	21
- 3	Excès d'air en fonction de la teneur en CO_2 des gaz	25
- 4	Contrainte nominale en fonction de la température des parois	34
- 5	Modes de transfert dans les surchauffeurs	50
- 6	Convection des gaz	53
- 7	Supportage des tubes	64
- 8	Réglage de la température de vapeur par injection d'eau pulvérisée	66
- 9	Ramoneur rétractile	69
- 10	Disposition des tubes du surchauffeur 2	73

Liste des tableaux

Tableau N°

- 1	Caractéristiques des chaudières de la CIIII . .	4
- 2	Rapport de V_2O_5 sur Na_2SO_4 des analyses reçues .	21
- 3	Caractéristique de design des surchauffeurs horizontaux	29
- 4	Cartographie des surchauffeurs horizontaux . .	31
- 5	Paramètres mécaniques des surchauffeurs horizontaux	34
- 6	Paramètres fonctionnels des surchauffeurs pendentifs	46
- 7	Paramètres constructifs des surchauffeurs pendentifs	63
- 8	Débit d'eau de désurchauffe	67

Première partie

INTRODUCTION

I - Description de la situation actuelle de la centrale électrique du Cap des Biches et des surchauffeurs des tranches 302 et 303

I-1- La centrale électrique du Cap des Biches

La plus récente, la plus importante et la troisième unité de production d'énergie électrique au Sénégal, la centrale électrique du Cap des Biches est composée de trois tranches (301,302,303) et de deux turbines à gaz (TAG1, TAG2).

La 301, tranche la plus ancienne, comprend:

- une chaudière à dépression, de surchauffeurs pendentifs qui produit 120 tonnes par heure de vapeur à 505°C et 70 bars.
- un turbo-alternateur d'une puissance nominale de 27.5 MW.

Les tranches 302 et 303 comprennent chacune

- une chaudière pressurisée, à surchauffeurs horizontaux produisant environ 120 tonnes par heure de vapeur à 505°C et 70 bars
- un turbo alternateur d'une puissance nominale de 30 MW.

Les TAG ont respectivement des puissances efficaces de 16.5 MW et 21.5 MW

La figure 1 montre les éléments caractéristiques d'une tranche et le tableau 1, les principaux paramètres des trois tranches.

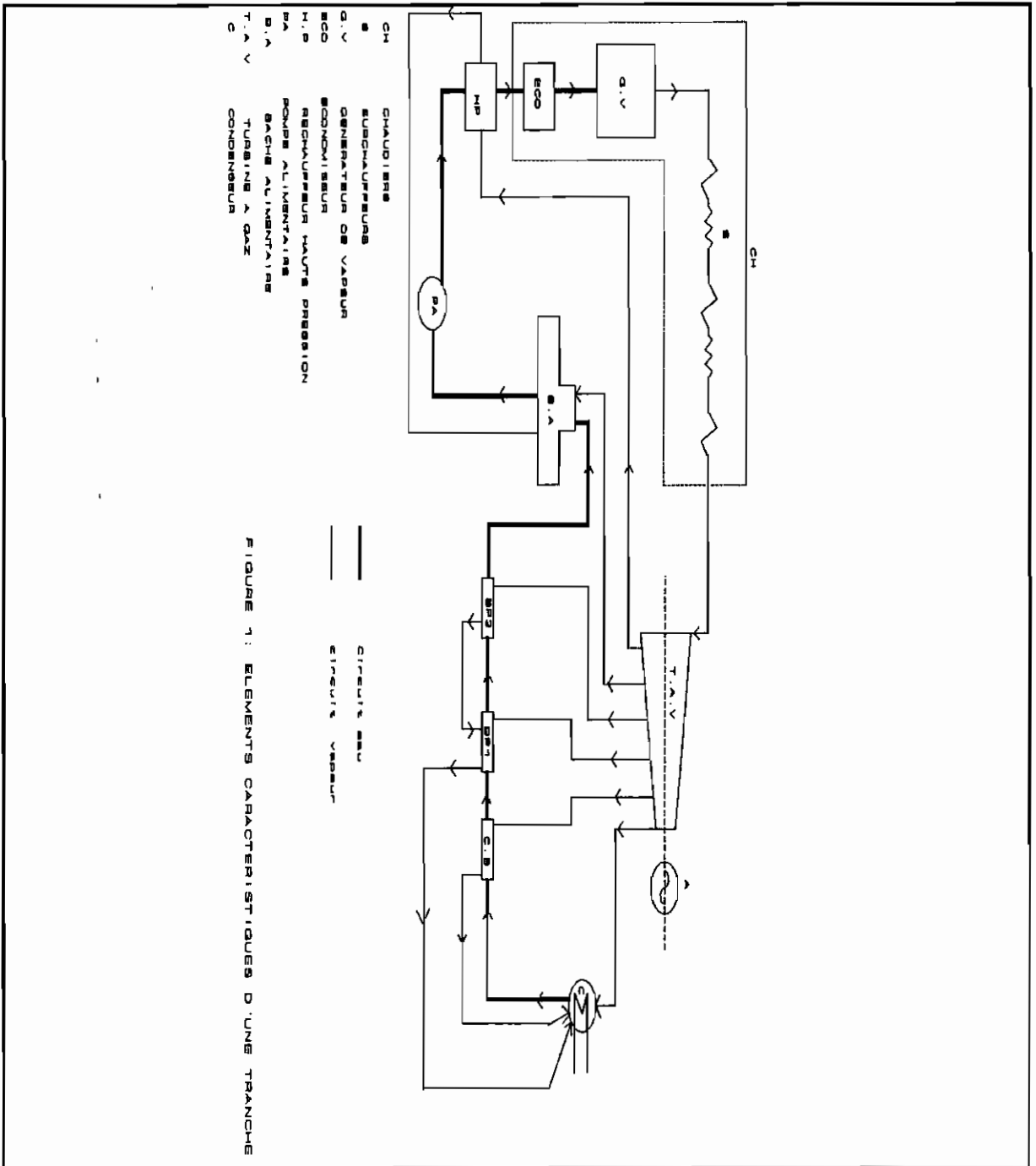


Tableau 1: Caractéristiques principales des chaudières des trois tranches (conditions de conception à charge nominale)

	301	302	303	Unités
Pression ballon	76	70	70	bars
q _v en continue	120	129	129	t/h
T max de surchauffe	510	505	505	°C
SE des écrans	1750	1468	1468	m ²
SE sur-chauffeurs	900	440	440	m ²
SE économiseur	1650	895	895	m ²
TFS chambre	-	1289	1289	°C
TFS sur-chauffeurs	-	715	715	°C
Débit de fumées	158	10292 137	10292 137	Nm ³ /h t/h
Débit de fuel	8250	8688	8688	kg/h
Débit de chaleur	80995000	86445600	86445600	kcal/h
Rendement sur PCI	90	93.5	93.5	%
PCI	9700	9950	9950	kcal/kg
Débit d'air	126	126	126	Nm ³ /kg
excès d'air	15	5	5	%

DV = débit de vapeur

T max = Température maximale

SE = surface d'échange

TFS = température fumées sortie

PCI= Pouvoir calorifique inférieur.

I-2- Les chaudières et surchauffeurs des tranches 302 et 303

Chacune des chaudières des tranches 302 et 303 est constituée essentiellement d'un économiseur, d'un faisceau vaporisateur et de surchauffeurs. Ces trois appareils disposés de façon à minimiser l'encombrement sont composés de faisceaux de tubes permettant d'assurer un échange de chaleur entre deux fluides (H_2O et gaz).

L'économiseur sert à porter l'eau à une température relativement élevée en épuisant au maximum la chaleur des gaz de combustion prêts à sortir; le faisceau vaporisateur permet de vaporiser l'eau jusqu'à saturation. Quant au troisième appareil, il sert à surchauffer la vapeur ainsi formée jusqu'à la température d'utilisation de la turbine.

Dans la chaudière de chaque tranche, afin d'assurer une chute plus favorable de température de sortie des gaz et d'avoir la surface d'échange la plus petite possible, les trois appareils sont réalisés en circulation méthodique (contre-courant). C'est ainsi que les gaz de combustion traversent les surchauffeurs, une partie des surfaces vaporisatrices et enfin l'économiseur. Mais, c'est aussi cette circulation méthodique qui présente le plus de risque d'une élévation de température du métal des tubes, surtout aux points où la vapeur la plus chaude rencontre les fumées à la température la plus élevée. Dans les chaudières des tranches 302 et 303 où les tubes de surchauffeurs sont disposés horizontalement, ces points que constituent les tubes des parties finales des

surchauffeurs sont le siège des dépôts et sont soumis à une corrosion rapide.

De ce fait, ces deux tranches ont souvent connu des successions d'incidents qui provoquent une forte perturbation du fonctionnement de la centrale:

Les défauts observés, pratiquement identiques sur les deux tranches sont:

- des dépôts vitrifiés, très adhérents sur les surchauffeurs réduisant l'espace intertube, favorisant un passage préférentiel des gaz de combustion et une augmentation locale de la température.
- des réductions locales de l'épaisseur et des fissurations dues à une corrosion haute température et au phénomène de fluage.

II- Le projet

La recette de l'énergie électrique produite par une centrale électrique comprend parmi tant d'autres le prix de cette énergie, le coût du combustible brûlé et le coût de l'entretien. Le rendement global de la centrale étant proportionnel à l'énergie produite et inversement proportionnel à celle consommée, il est très important de comprendre et de pouvoir agir sur les effets négatifs qui occasionnent sa diminution. Parmi ceux-ci, ces dépôts engendrés par la combustion du combustible fuel - oil qui sont aussi responsables des effets de corrosion. Mais s'il est vrai qu'une action efficace sur les dépôts réduit la diminution du rendement, il n'en demeure pas moins vrai que l'introduction dans

les chaudières, des surchauffeurs verticaux qui semblent donner de meilleurs résultats que ceux horizontaux est une action rentable à long terme.

III - Importance

Seule une application des connaissances acquises aux cas pratiques permet au scientifique de se rendre compte de son savoir faire. De ce point de vue, la conception d'un surchauffeur (qui est un cas particulier de celle des échangeurs industriels) est bien un exemple pratique d'application de nos connaissances.

IV-Notations et unités utilisées

Les notations utilisées et non définies dans la rédaction sont les suivantes:

-indices g et v se rapportent respectivement aux gaz et à la vapeur.

-indices 1, 2 , 3 se rapportent respectivement aux surchauffeurs primaire, secondaire et tertiaire.

t	température
tge	température des gaz à l'entrée du surchauffeur
tgs	température des gaz à la sortie du surchauffeur
tgm	température moyenne des gaz dans le surchauffeur
tve	température de la vapeur à l'entrée du surchauffeur
tvs	température de la vapeur à la sortie du surchauffeur
tm	température moyenne de la vapeur dans le surchauffeur
tpg	température de la paroi côté gaz
tpv	température de la paroi côté vapeur
tp	température moyenne de la paroi
td	différence de température moyenne logarithmique
qv,mv	débit de vapeur
mg	débit de gaz
he	enthalpie de la vapeur à l'entrée du surchauffeur
hs	enthalpie de la vapeur à la sorite du surchauffeur
r	chaleur latente de vaporisation
Q	quantité de chaleur échangée dans le surchauffeur

ϕ_l	flux par unité de surface.
K_g	coefficient de transmission par rayonnement gazeux
K_{bg}	coefficient de transmission par convection des gaz
K_i	coefficient de transmission par convection de la vapeur
K_e	coefficient de transmission extérieure
K	coefficient de transmission globale.
Λ	conductivité thermique
μ	viscosité dynamique
ρ	masse volumique
c_p	chaleur massique
Nu	nombre de Nusselt
Pr	nombre de Prandtl
v, w	vitesse
D_i	diamètre intérieur
D_e	diamètre extérieur
e	épaisseur
L	longueur d'un tube
ST	pas transversal
SL	pas longitudinal
S	surface d'échange du surchauffeur
S_i	surface intérieure du tubes
S_e	surface extérieure des tubes
S_m	surface moyenne logarithmique
S_U	surface utile des gaz
F_s	facteur de sécurité

SR	valeur moyenne de la contrainte de rupture des tubes par fluage en 10^5 heures
SC	valeur moyenne de la contrainte qui produit un allongement des tubes de 1 % en 10^5 heures
f, σ_a	contrainte admissible du matériaux en fluage
p_i	pression moyenne de la vapeur.

Les unités sont:

t:	$^{\circ}\text{C}$
qv, mv :	t/h ou m^3/s
enthalpie:	kj/kg
Q :	kcal/h
k:	Kcal/ $\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$
surface:	m^2
de, e, di:	m
p_i, SC, SR :	MPa, bars
Pl:	Kcal/h. m^2
μ, C_p, ρ, λ :	SI

Deuxième partie

MECANISME DE FORMATION DES DEPOTS ET EFFETS RESULTANT

I- MECANISME DE FORMATION DES DEPOTS

I-1- Composition des fumées

I-1-1- Le combustible

Les combustibles liquides utilisés dans les centrales sont essentiellement des produits pétroliers appelés fuel-oils (ou encore mazout) obtenus lors du raffinage du pétrole brut.

Les fuel-oils comprennent entre autres le fuel-oil N°2 (ou fuel lourd), le fuel-oil léger, les bunkers, etc...

A la centrale du CAP DES BICHES (CIII), le combustible utilisé pour le fonctionnement normal est le fuel-oil N°2, le fuel-oil léger étant utilisé pour le démarrage. Ce combustible lourd dérivé de produits venant d'autres horizons est chargé toute chose étant égale par ailleurs en eau et en sel au cours du transport.

Afin de connaître la composition des fumées, il importe de connaître celle du fuel-oil lourd.

I-1-2- Composition du fuel-oil lourd

Le fuel-oil lourd est composé essentiellement d'éléments combustibles tels que le carbone, l'hydrogène et le soufre. Leur teneur respective est obtenue par l'analyse élémentaire du combustible. Par ailleurs le carbone et l'hydrogène peuvent se

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

fusionner en partie sous forme de composés complexes (hydrocarbures).

Le fuel contient également d'autres éléments indésirables tels que le vanadium, le potassium, le sodium, l'eau et les sédiments (asphaltènes, paraffines, etc...).

I-1-3-Combustion et composition des fumées

La combustion est le phénomène qui résulte de la combinaison chimique de certains éléments du combustible avec l'élément comburant (ici l'oxygène contenu dans l'air). Elle est exothermique et donne lieu à la production de résidus gazeux qui sont:

- _ l'azote atmosphérique accompagnant l'oxygène utilisé comme comburant,
- l'air envoyé au foyer mais dont l'oxygène n'a pas été utilisée comme comburant (excès d'air),
- les produits de la réaction complète de combustion du carbone, de l'hydrogène et éventuellement celle du soufre (CO_2 , H_2O , SO_2),
- Eventuellement, les produits de réaction incomplète de combustion,
- ceux des éléments inertes du combustible qui sont à l'état gazeux à la température régnant dans le foyer.

Il peut y avoir également et c'est souvent le cas, des résidus solides dont l'origine est:

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

- d'une part dans les éléments solides pouvant résulter de la combustion elle-même (essentiellement carbone imbrûlé lors d'une combustion avec défaut d'air),

- d'autre part dans les éléments inertes du fuel-oil qui ne sont pas à l'état gazeux à la température régnant dans le foyer (cendre du fuel).

Les premiers résidus étant évacués en partie en même temps que les résidus gazeux, les derniers, recueillis en l'état forment des dépôts dans les parcours divers du générateur de vapeur.

I-2- Formation des dépôts dans les chaudières

I-2-1- Parties chaudes

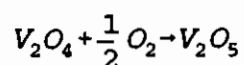
Les dépôts observés au niveau des parties relativement chaudes (surchauffeurs) des chaudières sont essentiellement dus aux composés produits par l'oxydation du vanadium et du sodium. Le vanadium et le sodium constituants principaux des cendres (matières stériles non combustibles) du fuel sont en effet des agents destructeurs à haute température. Sous forme de composés simples (V ou Na), ils ont des points de fusion de 400°C à 1300°C. Ceux qui ont des points de fusion inférieurs à 900°C sont sous forme liquide au niveau de la flamme et se solidifient sur les surfaces relativement froides.

Mais généralement, le vanadium est sous forme de composés complexes après oxydation: les premiers composés formés sont le trioxyde de vanadium (V_2O_3) et le tétraoxyde de vanadium (V_2O_4).

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

Ces composés ont des points de fusion d'environ 1970°C et donc traverseraient les tubes sans se déposer.

Mais malheureusement, un autre composé se forme: le pentoxyde de vanadium (V_2O_5) ayant un point de fusion de 650°C.



Ce composé se combine avec du sodium (Na) ou du sulfate de sodium (Na_2SO_4) pour former des vanadates plus complexes à plus bas point de fusion. Les vanadates ainsi formés créent avec d'autres résidus solides un produit pâteux à température élevée sur les tubes appelé dépôt vanado-sodiques.

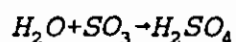
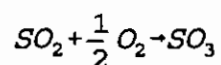
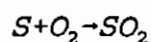
I-2- Parties froides

Les problèmes observés sur les parties relativement froides (écran vaporisateur et économiseur) sont dus au soufre, au vanadium et aux imbrûlés.

La combustion du soufre donne lieu à de l'anhydride sulfureux (SO_2). Aux températures inférieures à 700°C et pour un excès d'air donné, une partie du SO_2 s'oxyde pour former de l'anhydride sulfurique SO_3 dont le pourcentage augmente avec la teneur en O_2 des gaz de combustion. Par réaction avec la vapeur d'eau (H_2O) des gaz de fumée aux températures inférieures à 500°C, le SO_3 se transforme en acide sulfurique (H_2SO_4) qui se condense dès que la température est inférieure à 250°C dans les

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

parties froides.



L'annexe 1 présente quelques analyses de dépôts effectuées dans le courant d'Octobre 1992. Il permet de constater que les teneurs en V_2O_5 , Na_2O et SO_3 sont les plus importantes tandis que les autres éléments sont pratiquement à l'état des traces. Parfois les premières surfaces rencontrées par les gaz sont tellement atteintes par ces composés de dépôts qui occasionnent des pertes de rendement et sont de ce fait soumises à des phénomènes de corrosion.

II- EFFETS RESULTANT DE LA FORMATION DES DEPOTS

II-1- Corrosion

La corrosion observée sur les tubes de chaudières (côté gaz) est un cas particulier de corrosion sèche appelée corrosion catastrophique. Il s'agit d'un cas d'oxydation très rapide qui s'observe sur certains métaux comme les aciers inoxydables travaillant à haute température (500 à 800°C) dans des atmosphères de combustion.

Pour mieux comprendre le mécanisme de cette corrosion une

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

description sommaire de la théorie de l'oxydation à haute température est nécessaire.

II-1-1- Oxydation et corrosion des aciers

La résistance à l'oxydation des métaux réfractaires est due à la formation d'une couche d'oxyde adhérente et peu perméable. La possibilité de formation d'une telle couche est conditionnée par la tension de décomposition de l'oxyde; si elle est supérieure à la pression partielle de l'oxygène dans le milieu actif considéré, l'oxydation n'a pas lieu. Lorsqu'elle est inférieure à cette pression partielle, le métal peut se comporter de deux manières:

- Si l'oxyde est volatil, la surface métallique n'est pas recouverte; son aspect reste métallique et la destruction du métal se produit par la volatilisation de l'oxyde.

- si l'oxyde n'est pas volatil, le métal se recouvre d'une couche d'oxyde.

si le volume d'oxyde est inférieur à celui du métal dont il provient, la couche ne suffit pas à recouvrir le métal; elle est donc poreuse et laisse l'oxygène parvenir au contact du métal et poursuivre sa réaction d'oxydation. Si au contraire le volume de l'oxyde est plus grand que celui du métal attaqué, la couche sera compacte; et l'oxydation ne pourra plus se produire par réaction directe de l'oxygène sur le métal.

Des études effectuées il y a plusieurs années mettent en évidence, par un facteur α , l'influence du pouvoir couvrant de

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

l'oxyde:

$$\alpha = \frac{M \cdot d}{n \cdot m \cdot D}$$

où M = masse moléculaire de l'oxyde

m = poids atomique du métal

D = densité de la pellicule

d = densité du métal

n = nombre d'atomes métalliques engagés dans la formule de la molécule d'oxyde

- si $\alpha > 1$ la pellicule est protectrice
- si $\alpha < 1$ le film perd son caractère protecteur

Pour le fer $\alpha = 2.06$

Pourtant dans le cas du fer (qui fait partie des métaux que l'on rencontre dans les alliages réfractaires) la protection par la couche d'oxygène (oxydes de fer) même compacte, peut ne pas être complète, car par diffusion des ions métalliques ou de l'oxygène à travers l'oxyde la réaction d'oxydation peut encore se produire à un certain niveau de la couche.

La pellicule d'oxyde de fer est souvent constituée par trois couches séparées: la couche extérieure est constituée par Fe_2O_3 , la couche médiane par Fe_3O_4 et la couche adjacente au fer par FeO . Chacune de ces couches montre une variation continue de la teneur en oxygène avec la profondeur. Les couches périphériques sont plus riches en oxygène tandis que les couches plus proches du fer sont plus riches en fer. Ainsi l'oxydation se poursuit grâce à la possibilité de diffusion de l'oxygène et du métal.

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

Dans de tels cas, la vitesse d'oxydation est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{K}{y} \Rightarrow y^2 = Kt + cste$$

Le phénomène suit une loi parabolique dans le cas du fer. Dans le cas des alliages d'aciers, le mécanisme d'oxydation à haute température est plus complexe ainsi que la loi de corrosion. Toutefois des formules empiriques permettent de déterminer l'épaisseur de corrosion.

II-1-2- Action corrosive des dépôts de cendres produits par le combustible sur les aciers

Il vient du paragraphe précédent que dans la plupart des cas de corrosion sèche l'oxygène est le gaz réactif principal. Les produits de la réaction sont des composés souvent oxydés. La corrosion catastrophique est assez particulière en ce sens que les produits d'oxydation sont le plus souvent volumineux et poreux sous l'action de la température. Les oxydes provoquant une telle corrosion sont principalement les mêmes majoritaires: le pentoxyde de vanadium (V_2O_5) accompagné fréquemment des oxydes du sodium (Na_2O). Ces oxydes à bas point de fusion ($650^\circ C$ pour le V_2O_5) forment au contact de l'acier des eutectiques qui fondent eux aux températures plus basses.

Ces solvants et les produits dissous constituent une phase pâteuse qui au début du processus, adhèrent au métal et sèchent

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

très rapidement en développant des fissures et des pores qui sont des voies aux ions métalliques sous jacents. Ce qui engendre la destruction de la couche protectrice de l'oxyde formé à la surface de l'acier. Cette destruction aurait pour effet la mise à nu de la surface métallique et l'accélération du processus de corrosion.

L'action du sulfate de sodium pourrait être schématisée de la façon suivante:

- Si une partie du trioxyde de soufre se combine aux oxydes de sodium (Na_2O) pour former des sulfates de sodium, on aboutit au terme des réactions catalysées par V_2O_5 à une calamine mixte dont le point de fusion est proche de 500°C . L'acuité du phénomène dépend toutefois du rapport de la teneur en pourcentage de Na_2SO_4 ou Na_2O par V_2O_5 .

Selon les résultats expérimentaux et comme le montre la figure suivante, on constate que la corrosion est maximale pour $(1/5 < R < 1/3)$.

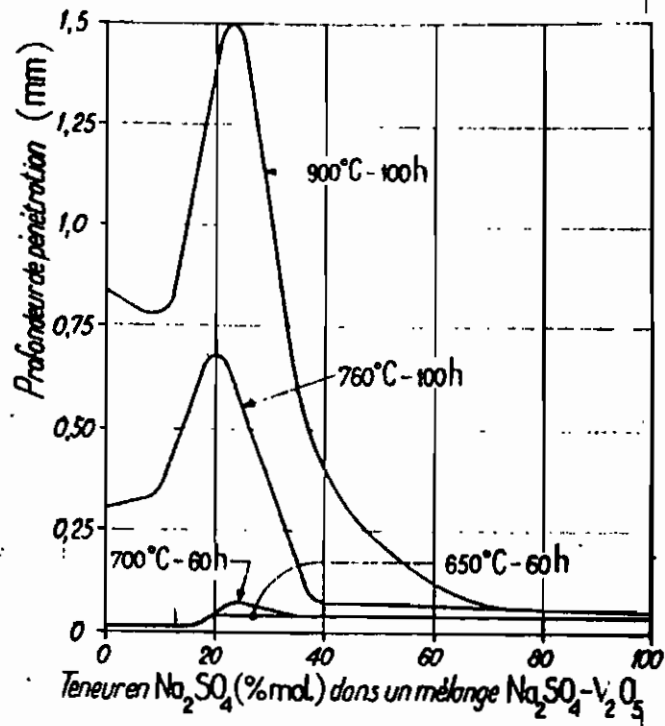


Fig. 2 - Effet des mélanges de pentoxyde de vanadium et de sulfate de sodium sur l'oxydation de l'acier 18-10 à des températures comprises entre 650 et 900 °C, d'après Morris (L. A.).

Pour mieux apprécier l'importance des problèmes de corrosion dans la CIII, nous avons calculé ce rapport pour différentes analyses de dépôts obtenus (Annexe 1).

N° du LAB	11237	11238	11239	11240	11241	11242	11243	11244
R = Na ₂ O/V ₂ O ₅	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.6	0.3

tableau 2: rapports Na₂O/V₂O₅ des analyses reçues

Le tableau 2 ci-dessus montre que dans la majorité des cas de corrosion maximale atteinte.

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

Une des formules empiriques représentatives permettant d'apprécier la vitesse C de corrosion est la suivante:

$$C = 4.55 \cdot 10^{-3} \cdot e^{10 \cdot \theta_M} \left[\exp\left(0.1 \frac{V}{N_a} - 1.3\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{V}{40}\right)\right) \cdot \exp\left(2.5 (\theta_g - \theta_g^2)\right) + 0.28 \frac{V \cdot S \cdot O_2^{0.5}}{V + 0.765 N_a} \cdot \exp\left(7 (\theta_g - \theta_g^2)\right) \right]$$

L'épaisseur de corrosion est alors:

$$y = \frac{C \cdot t}{1000}$$

où y = épaisseur de corrosion (en mm)

C = vitesse de corrosion (en mm/1000h)

t = durée de fonctionnement (en h)

$$\theta_M = \frac{T_M - 500}{500} (^\circ C)$$

T_M = température du métal

$$\theta_g = \frac{T_g - 1000}{1000} (^\circ C)$$

T_g = température des gaz (en °C)

V = teneur du fuel-oil en vanadium (ppm)

N_a = teneur du fuel-oil en sodium (ppm)

S = teneur du fuel-oil en soufre (%)

O₂ = teneur en oxygène dans les gaz de combustion (%)

Les tableaux "corrosion hautes températures" de l'annexe 1 illustre la vitesse et l'épaisseur de corrosion (pour 20000 heures de fonctionnement) en fonction de la température des gaz et de la température du métal connaissant les caractéristiques du fuel fournis.

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

II-2- Autres effets

Des dépôts formés, il en résultent d'autres effets tels que les pertes de rendement dues à une diminution de l'échange thermique et une augmentation des frais d'entretien.

II-3- Moyens de lutte contre les problèmes observés sur les tubes des surchauffeurs

II-3-1- Réduction de l'excès d'air de combustion

Des paragraphes précédents, il ressort que la présence de l'oxygène dans les gaz (excès d'air) est indésirable: d'une part parce qu'elle favorise la formation de dépôts et les problèmes de corrosion et d'autre part parce qu'elle diminue la température du foyer. Aussi un défaut d'air est fortement défavorable car il occasionne l'apparition d'imbrûlés gazeux (CO notamment) et solides (particules de carbone) dans les gaz de combustion et par conséquent des pertes de rendement en résultent. Seule une combustion complète est favorable; mais le mélange de l'air avec le combustible ne pouvant pas être réalisé complètement dans la pratique, il est nécessaire de fournir un peu plus d'air qu'il ne le serait théoriquement: c'est l'excès d'air.

Le contrôle de l'excès d'air peut se faire en calculant le facteur u :

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

$$u = \frac{K_t}{K} - 1 = \frac{A - A_1}{A_1}$$

où K = teneur en CO_2 réelle des gaz évacués est obtenue par l'appareil ORSAT

A_1 = quantité d'air théorique

$$A_1 = 8.9 C + 26.6 H + 3.33 S$$

A = quantité d'air réelle

K_t = teneur en CO_2 théorique des gaz secs est :

$$K_t = \frac{1.865C}{G_s}$$

$$G_s = 8.9C + 21.04H + 3.33S + 0.796N \quad (\text{Nm}^3/\text{KG})$$

ou

$$G_s = \frac{1.11PCI}{1000}$$

Avec G_s = quantité des gaz secs théoriques

C = teneur du fuel en carbone

S = teneur du fuel en soufre

N = teneur du fuel en azote

PCI = pouvoir calorifique inférieur (Kcal/KG)

La figure 3 suivante peut être utilisée pour déterminer l'excès d'air (en fonction de K_t), pour un bon fonctionnement de la chaudière.

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

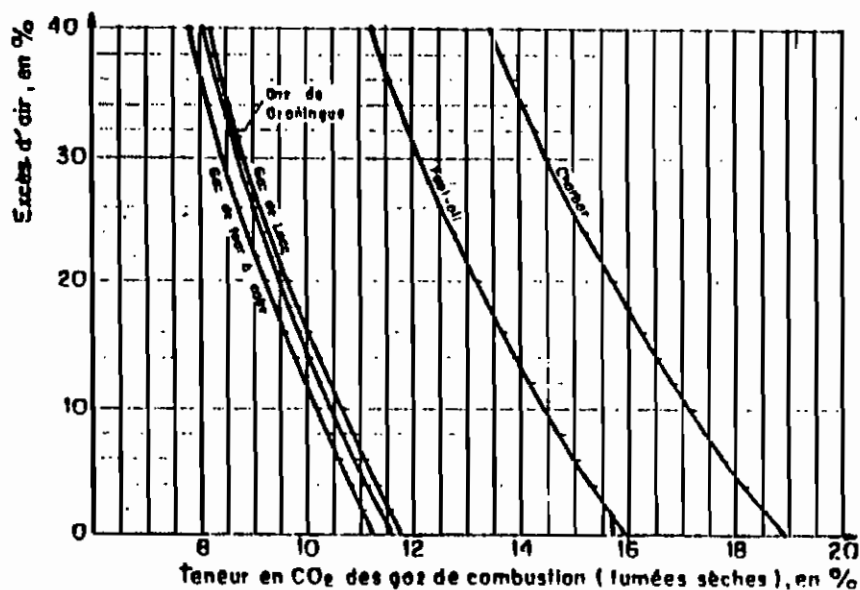


Figure 3

Variation de l'excès d'air avec la teneur en CO₂ des gaz de combustion (fumées sèches) pour quelques combustibles-typic

Dans les cas des caractéristiques suivantes du fuel-oil reçues :

$$C = 84 \%$$

$$H = 10.1 \%$$

$$S = 2.5 \%$$

$$N = 0.5 \%$$

$$PCI = 9513.62 \text{ Kcal/KG}$$

$$Kt = 0.1552$$

$$A_1 = 10.25 \text{ Nm}^3/\text{KG de combustible,}$$

l'excès d'air devrait être $\mu = 1.9 \%$

Le débit total d'air à utiliser serait alors

$$Qa = A_1 \cdot (1 + \mu) = 10.45 \text{ Nm}^3/\text{KG}$$

L'excès d'air utilisé actuellement est de 2.5 à 5 % .

Notons que ce calcul ne tient pas compte de l'adaptation des brûleurs de la chambre de combustion et il serait judicieux d'avoir des brûleurs convenables à μ .

II-3-2- Injection des additifs

Lorsque la marche à faible excès d'air n'est pas possible, le mode d'action à envisager consiste à injecter certains produits dans la chambre de combustion afin de changer la structure et la composition des composés de dépôts en élevant leur point de fusion et par conséquent d'éviter leur collage sur les tubes de surchauffeur. Ces produits sont principalement :

l'hydroxyde de magnésium $Mg(OH)_2$

la dolomie $(CO_3)_2CaMg$

l'oxyde de magnésium ou magnésie (MgO)

les oxydes de calcium, de céramique ou de nickel.

D'autres produits injectés directement dans le fuel peuvent être utilisés. Il s'agit des composés organométalliques ou d'oxydes métalliques.

Ces organométalliques agissent de deux façons et leurs actions sont catalysées afin qu'elles soient plus rapides et plus complètes.

Au niveau de la flamme où se déroule pratiquement les oxydations du soufre et du vanadium et où les conditions élevées (hautes pressions, hautes températures, milieu de hautes concentrations en éléments chimiques et en oxygène) existent, ils interfèrent avec l'oxydation complète du vanadium et du soufre et déplacent les équilibres limitant ainsi la quantité de SO_3 et de V_2O_5 composés largement responsables des problèmes.

Mécanisme de formation des dépôts et effets résultant

Hors flamme, une partie de ces organométalliques est oxydée. Les oxydes métalliques formés réagissent avec les petites quantités de SO_3 ou de V_2O_5 qui auraient pu se former dans la flamme ou en dehors de celle-ci. Il réagissent alors en modifiant la nature des dépôts, augmentant leur point de fusion et en neutralisant l'acidité.

Troisième partie

LES SURCHAUFFEURS HORIZONTALS PROPRES

Les surchauffeurs horizontaux propres

I-Données du design

Les matériaux des surchauffeurs sont des tubes d'acier inoxydable, faiblement allié dont les nuances et caractéristiques de dimensionnement sont indiquées dans le tableau suivant. Les autres valeurs garanties de ces aciers et dépendant de la température sont données à l'annexe 2.

	S1	S2	S3
Nuance des aciers (NF)	Tu 15 CD 2-05	Tu 10 CD 9-10	Tu 10 CD 9-10
de (mm)	51		
e (mm)	3.6	3.6	4.5
Nombre de nappes (n)	17	17	13
Nombre de rangées (r)	3		
T limite (°C)	550	600	600
T max recommandée (°C)	525	543	555
L (mm)	23.23		
ST (mm)	117		
SL (mm)	117		
Caractéristiques fonctionnelles			
mg (t/h)	137		
mv (t/h)	130		
Tge (°C)	1340		
Tve (°C)	283.8	300	380
Tvs (°C)	354	424	505
Pv (bars)	70		
SU (m ²)	6.12		

Tableau 3: Caractéristiques de design des surchauffeurs horizontaux

II- Comportement des surchauffeurs horizontaux propres

Les surchauffeurs horizontaux de chacune des tranches 302 et 303 comportent trois étages : SI, SII, SIII. Contrairement aux surchauffeurs verticaux, ils présentent l'avantage d'être constitués de boucles vidangeables; mais l'inconvénient d'une absence de dilatation libre. En effet, ils sont portés par des aciers verticaux auxquels ils sont liés par des pièces d'attache. Dans les zones à haute température, les surfaces de ces attaches et aciers non refroidies peuvent en certains points atteindre des températures favorables aux dépôts et corrosion. Les dépôts formés, friables dès l'apparition, sont par suite retenus dans leur chute gravitationnelle par les tubes horizontaux.

Cependant, les problèmes de suspension et de dilatation différentielle de ces surchauffeurs horizontaux seraient à la base des fissurations localisées observées. Ces fissurations apparaissent en régime permanent suite à une déformation plastique des tubes (fluage). Le passage du domaine élastique à celui du fluage se fait dans une zone de température qui dépend de la nature de l'acier et qui se situe entre 450°C et 550°C pour les aciers faiblement alliés. Il sera alors vérifié dans cette partie les températures des métaux aux points critiques et les caractéristiques mécaniques des surchauffeurs selon les paramètres du design.

Les surchauffeurs horizontaux propres

III- Etablissement de la cartographie des températures des tubes propres en utilisant les paramètres du design

III-1- surface d'échange et chaleur totale à échanger pour chaque étage de surchauffeur (tableau 4a)

$$s = (\pi * d_e * L) * (n * r)$$

$$Q = m_v * (h_{vs} - h_{ve})$$

$$\phi_1 = \frac{Q}{s}$$

Surchauffeur	S1	S2	S3
S (m ²)	189.8	189.8	146
hve (kj/kg)	2796.43	2838.4	3102.2
hvs (kj/kg)	3028.62	3220.38	3421.81
Q*10 ³ (kcal/h)	7212.6	11865.57	9928.15
φ ₁ (kcal/h.m ²)	4.22*10 ⁴	6.26*10 ⁴	6.85*10 ⁴

Tableau 4a

III-2- Calcul des coefficients de transfert et des températures des tubes aux points critiques

Les calculs finaux de ces paramètres sont donnés en annexe 4. Ils suivent pratiquement les mêmes procédures que le dimensionnement d'un surchauffeur.

Les résultats pour chaque surchauffeur sont résumés dans le

Les surchauffeurs horizontaux propres

tableau 4b suivant.

Surchauffeur	S1	S2	S3
Kg	15.199	15.298	17.217
Kbg	51.46	82.745	84.477
Ke	66.659	98.042	101.694
Kc	8385	7092	5568
Ki	3537	3529	4834
K	64.685	93.619	97.255
td	653.804	669.014	704.296
$\phi l * 10^{-4}$	4.22	6.26	6.85
tp	536.741	572	594.328

Tableau 4b

IV- Calculs des paramètres mécaniques

IV-1- Calcul de la contrainte de comparaison

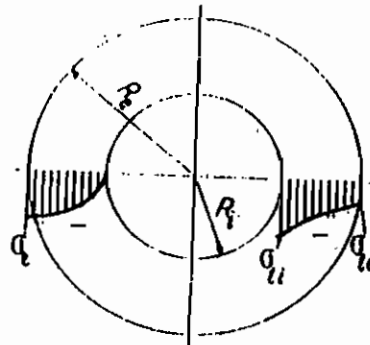
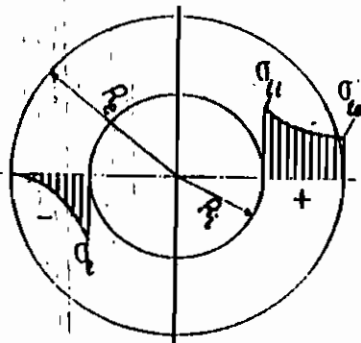
La pression appliquée à l'intérieur d'un tube a tendance à provoquer un accroissement du volume de l'enceinte qui contient le fluide. Le tube, de ce fait, est sollicité en traction par:

- une contrainte circonférentielle ou transversale de la membrane σ_t
- une contrainte radiale σ_r
- une contrainte longitudinale de membrane σ_l qui existe lorsque le tube est fermé aux deux extrémités et nulle lorsque le tube est ouvert.

Pour les tubes minces, c'est à dire les tubes dont le rapport e/R_m ne dépasse pas 0.1,

$$\sigma_t = \frac{p_i * R_m}{e}$$

$$\sigma_r = \frac{-P_i}{2}$$



Répartition des contraintes dans un tube sous la pression intérieure. — Répartition des contraintes dans un tube sous la pression extérieure.

Les sollicitations de pression extérieure sont régies par les mêmes formules que la pression intérieure (changée de signe pour la transversale); la pression extérieure au tubes étant de loin inférieure à la pression intérieure, elles deviennent négligeables.

En régime normal de fonctionnement, nous obtenons les résultats suivants.

Les surchauffeurs horizontaux propres

p_i (bars)	70	
e (mm)	3.6	4.5
R_m (mm)	47.4	46.5
σ_t (MPa)	92.17	88.67
σ_r (MPa)	-3.5	-3.5
$\sigma = \sigma_t + \sigma_r$ (MPa)	88.67	68.83

Tableau 5a

La torsion étant pratiquement inexistante, la théorie de l'énergie de distorsion (Von Mises) nous donne la contrainte équivalente de comparaison:

$$\sigma_c = \sigma$$

La figure suivante nous montre pour divers aciers, les courbes des contraintes admissibles σ_a en fonction de la température.

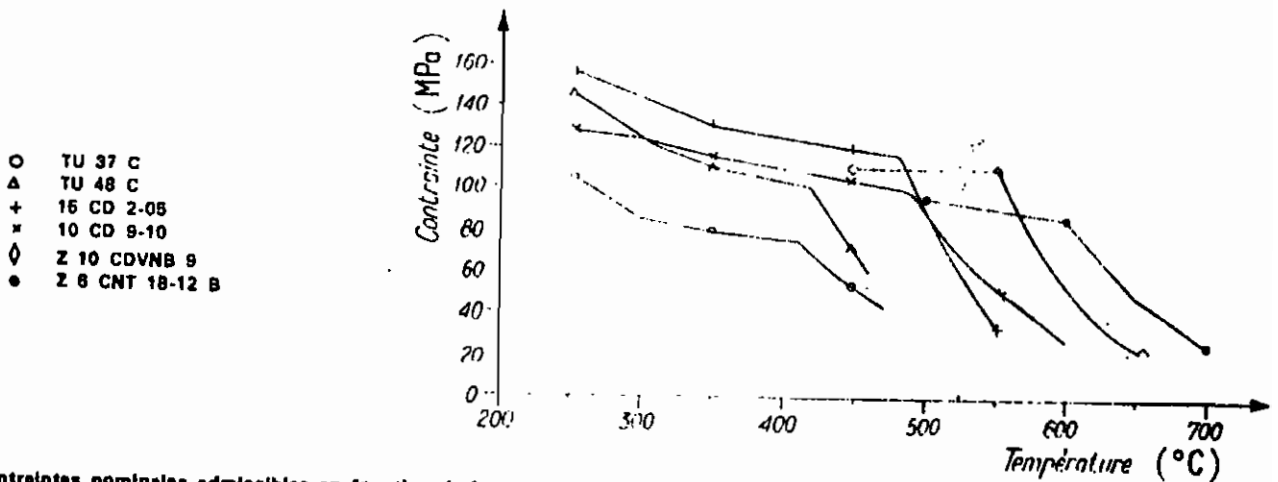


Fig. 4 — Contraintes nominales admissibles en fonction de la température pour divers aciers de construction des chaudières (code français).

Les surchauffeurs horizontaux propres

Pour les nuances utilisées, les valeurs correspondantes aux températures recommandées sont les suivantes:

Nuances	température (°C)	σ_a (MPa)
15 CD 2-05	525	62
10 CD 9-10	555	50
10 CD 9-10	543	60

Tableau 5b

Visiblement, ces valeurs sont inférieures aux contraintes de comparaison. Elles pourraient en être supérieures si l'épaisseur était convenable. En effet, la contrainte la plus importante (la contrainte transversale) est inversement proportionnelle à la l'épaisseur des tubes.

Toutefois, ces courbes ont été tracées avec un facteur de sécurité = 1.5 appliqué sur SR. Examinons sous quel facteur de sécurité l'égalité $\sigma = \sigma_a$ pourrait être obtenu.

IV-2- Vérification du facteur de sécurité

$$\sigma = \sigma_a = \frac{SR}{FS} \rightarrow FS = \frac{\sigma}{SR}$$

e (mm)	σ (MPa)	T (°C)	SR (MPa)	FS
3.6	88.67	525	103	0.9
4.5	68.83	555	76.6	0.9

Tableau 5c

V- Suggestions

Des calculs précédents, nous observons que les surchauffeurs fonctionnent en dessous de leur température maximale de tenue à l'état propre ; mais, la température-métal du surchauffeur trois est sensiblement égale à sa température maximale de tenue. Quant aux contraintes admissibles, elles sont dépassées. une sécurité n'étant pratiquement pas appliquée. A ce problème pourrait s'ajouter l'état d'encrassement des surchauffeurs occasionnant une augmentation des températures de tubes trouvées et des pertes de rendement.

Ces résultats nous amènent à suggérer le remplacement du surchauffeur dans sa globalité:

a) - par d'autres surchauffeurs horizontaux en aciers plus résistants:

* Surchauffeur 1 en acier Tu 10 CD 9-10

* Surchauffeur 2 et 3 en acier Z 10 CD VNB 9-2 dont la température maximale de tenue est d'environ 680°C.

Dans le cas où cette solution serait couteuse, il y a lieu de remplacer intégralement les tubes du surchauffeur 3 en acier Z 10 CD VNB 9-2 .

Mettre en place des ramoneurs de nettoyage et augmenter l'espace inter-tubes afin de faciliter et tenter également de limiter le nombre des opérations de nettoyage manuel.

b) Concevoir un surchauffeur vertical à un seul désurchauffeur pour remplacer le surchauffeur horizontal actuel de chaque tranche.

Quatrieme partie

**CONCEPTION D'UN
SURCHAUFFEUR PENDENTIF
POUR LES TRANCHES 302 ET 303
DE LA CIII**

I- Généralité : Méthode de dimensionnement utilisée

Un surchauffeur est avant tout un échangeur de chaleur dont la raison d'être dans une installation thermique à vapeur est de transférer le maximum de chaleur d'une source chaude que constituent les gaz issus de la combustion vers une source froide qu'est la vapeur.

Cette chaleur transmise peut s'exprimer de trois façons :

$$Q = m_f * C_{pf} * (t_{sf} - t_{ef}) \quad (1)$$

$$Q = m_c * C_{pc} * (t_{ec} - t_{sc}) \quad (2)$$

$$Q = K * S * \Delta t_m \quad (3)$$

où :

- les indices f et c se rapportent respectivement aux fluides froid et chaud ;
- les indices e et s indiquent respectivement les variables d'entrées et de sorties
- m est le débit massique
- cp est la chaleur spécifique
- k est le coefficient global de transmission de chaleur
- S et Δt_m sont respectivement la surface totale d'échange et l'écart moyen logarithmique de température.

En général, dans les centrales thermiques génératrices d'énergie électrique, certaines caractéristiques des fluides utilisés ainsi que les variables permettant le calcul de Q sont connues. Ainsi,

le dimensionnement d'un échangeur de chaleur exige l'évaluation du coefficient global K , de la différence de température Δt_m et de la surface totale d'échange S .

I-1- Coefficient d'échange global

Pour un type d'échangeur de chaleur donné, ce coefficient dépend des modes de transfert de chaleur et par conséquent du:

- coefficient de conduction K_c du mur séparant les deux fluides
- coefficient de transmission K_i entre le fluide froid et le mur de séparation

Ces coefficients quant à eux dépendent des paramètres caractéristiques du fluide considéré et du mur. Le coefficient de convection est souvent obtenu à partir des corrélations données par plusieurs auteurs. On désigne par résistance thermique le rapport $\frac{1}{KS}$. Le coefficient global s'obtient en écrivant que la résistance thermique globale est égale à la somme des résistances thermiques de chaque transfert.

$$\frac{1}{KS_e} = \frac{1}{K_e S_e} + \frac{1}{K_i S_i} + \frac{1}{K_c S_m} \quad (4)$$

où

S_e est la surface extérieure projetée

S_i est la surface intérieure projetée et

S_m la surface moyenne du mur.

Le calcul du coefficient K à partir de ces trois coefficients

supposent que les parois du mur séparant les deux fluides sont maintenues propres. Malheureusement dans la pratique et c'est souvent le cas, elles sont le siège de dépôts et d'incrustations dus aux impuretés des fluides et à des réactions chimiques. Ces dépôts et incrustations influencent le coefficient de transfert de chaleur en occasionnant une résistance additionnelle R_0 à la transmission de chaleur appelée "facteur d'encrassement".

I-2- Différence de température

Le type d'échangeur de chaleur est caractérisé par l'expression de l'écart moyen de température. L'expression de cet écart dépend de l'orientation relative des fluides dans l'échangeur.

Dans l'équation (3) $Q = K S \Delta t_m$, Δt_m est défini comme suit :

$$\Delta t_m = \frac{1}{S} \int_0^S \Delta t ds$$

Ainsi, pour déterminer Δt_m , il nous faut connaître la variation de température sur toute la surface d'échange. Ce qui dépend de la configuration de l'échangeur. on démontre que pour un échangeur à courants parallèles ou à contre-courants, l'écart moyen de température est donné par :

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

Soit pour un échangeur à contre-courant,

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: généralité

$$\Delta t_m = \frac{(t_{ec} - t_{sf}) - (t_{sc} - t_{ef})}{\ln \frac{t_{ec} - t_{sf}}{t_{sc} - t_{ef}}}$$

Dans le cas des échangeurs à courants croisés, une partie fonctionne en courants parallèles et une autre partie fonctionne en contre-courants. De ce fait, la vraie valeur Δt_m se situe entre les deux valeurs de moyennes logarithmiques calculées avec les mêmes températures d'entrée et de sortie des deux fluides l'un en courants parallèles, l'autre en contre-courants.

Dans la pratique, on utilise un facteur correctif sans dimensions $F(R,P)$ pour obtenir Δt_m à partir de la moyenne de température calculée suivant la formule ci-dessus dans l'hypothèse d'un échangeur à contre-courant.

On obtient graphiquement $F(R,P)$ en posant:

$$R = \frac{m_f C_{pf}}{m_c C_{pc}} = \frac{t_{ec} - t_{sc}}{t_{sf} - t_{ef}}$$
$$P = \frac{t_{sf} - t_{ef}}{t_{ec} - t_{sf}}$$

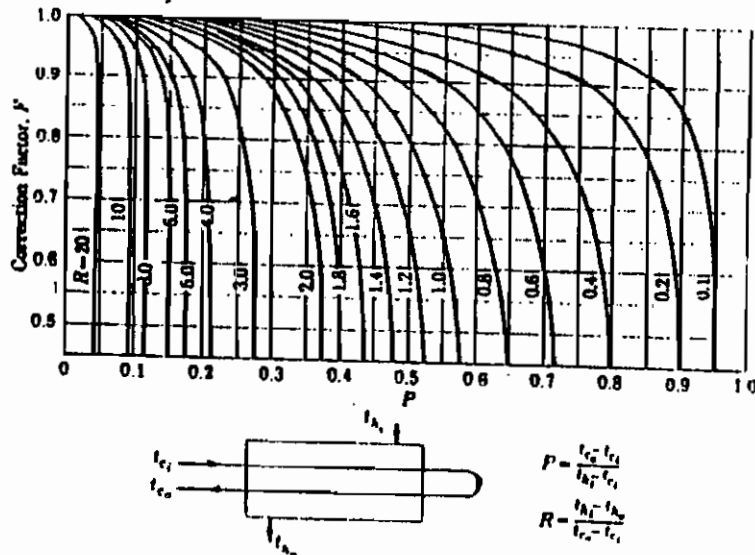
$$\text{et } \Delta t_m = F(R,P) \cdot \Delta t_{mc}$$

On désigne généralement ces échangeurs par m et n : m étant le nombre de passage côté chambre et n le nombre de passage côté tubes.

On démontre que pour les échangeurs m, n avec $n > 2m$, l'utilisation du facteur $F(R,P)$ pour l'échangeur $m, 2m$ n'introduit pas d'erreur notable. En pratique, on évite d'avoir

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: généralité

des échangeurs pour lesquels $F(R,P) < 0,8$.



I-3-Surface totale d'échange

Elle est obtenue à partir de la formule

$$S = \frac{Q}{K \Delta t_m}$$

I - 4 - Perte de charge

La perte de charge totale se calcule d'après la configuration de l'échangeur. Elle devra toutefois restée inférieure au timbre (7 % de la pression totale)

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: généralité

Une fois les caractéristiques fonctionnelles connues, la détermination des caractéristiques constructives permet la réalisation complète de l'échangeur.

Nous allons faire la conception suivant cette procédure. Les tubes étant considérés propres tout au long de la conception, nous allons faire le dimensionnement de façon à prévoir un désurchauffeur d'environ 30 °C et réserver une bonne marge de sécurité des températures de parois en prévision des dépôts.

II- Application de la méthode à la conception des surchauffeurs pendentifs

La conception des surchauffeurs pendentifs (ou verticaux) trouve sa justification dans le but d'un éventuel changement des surchauffeurs horizontaux actuels des tranches 302 et 303 de la centrale du cap des Biches. En effet, l'expérience montre que, sur les surchauffeurs verticaux, les dépôts formés sont moindres comparativement aux surchauffeurs horizontaux.

Les chaudières des tranches 302 et 303 de la centrale ayant été conçues pour fonctionner sous des caractéristiques données, la conception des surchauffeurs verticaux devra s'appuyer sur ces caractéristiques. Aussi pour tenir compte d'une éventuelle surchauffe excessive de la vapeur, un désurchauffeur sera prévu. D'où la division de l'ensemble-surchauffeur en deux parties :

- le primaire placé en amont relativement à la vapeur et en aval relativement aux gaz, débouche sur le désurchauffeur.
 - le secondaire recevant de la vapeur venant du désurchauffeur est placé en amont des gaz. A sa sortie la vapeur devra avoir les caractéristiques nécessaires pour faire fonctionner la turbine.
- Cette dernière partie des surchauffeurs est la plus soumise aux contraintes thermiques. ce qui explique la rigueur selon laquelle doivent être calculées et choisies les surfaces d'échange et les températures du métal.

La méthode utilisée étant celle du coefficient global d'échange,

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

les calculs sont itératifs. Nous présentons ici les démarches de la conception et les résultats finaux obtenus. Quant aux tableaux et calculs (dernière itération) effectués avec le logiciel mathcad, ils se réfèrent à l'annexe 3.

II-1- Paramètres fonctionnels

II-1-1 Données de calcul

Débit de vapeur	120 t/h
Pression moyenne de vapeur	70 bars
Température de vapeur entrée S1	285,8°C
Température de vapeur sortie S1	450°C
Température de vapeur entrée S2	420°C
Température de vapeur sortie S2	505°C
Température de gaz sortie S1	715°C

II-1-2- Chaleur totale à échanger

Suite à une entrée d'eau dans la vapeur à la sortie du ballon, la vapeur n'est pas parfaitement saturée. Ce phénomène de primage est néfaste. Pour ce faire, des dispositifs sont souvent pris pour la réduire. Ainsi, on estime généralement la teneur en eau de la vapeur à 1-3% rapporté au débit de vapeur.

Mais à la sortie du surchauffeur 1, la vapeur est surchauffée

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

et son enthalpie à chaque étage est connu par sa température et la pression de vapeur.

$$hve1 = 0.98r + hle1$$

$$Qv = mv(hvs - hve)$$

Surchauffeur	I	II
hve (kj/kg)	2740.914	3210.12
hvs (kj/kg)	3287.1	3421.85
$Q \cdot 10^{-3}$ (kcal/kg)	15661.25	6069.96

Tableau 6a

II-1-3 Choix de l'acier

Dans le choix d'un matériau, le principal critère est son degré de satisfaction des conditions d'utilisation auxquelles on le destine. Le matériau devra en outre satisfaire à ces conditions d'utilisation pendant une durée donnée et avec des risques de défaillance aussi limités que possible. Quand ce matériau est accepté, le prix de revient joue alors le rôle de facteur déterminant.

Ainsi compte tenu des contraintes thermiques, mécaniques et des attaques chimiques qui régissent au niveau des surchauffeurs, l'acier à choisir doit avoir :

- des caractéristiques mécaniques à chaud (résistance au fluage) élevées
- une grande résistance à la corrosion

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

- une température-métal correspondant à sa place dans l'échangeur.

Dans les surchauffeurs, on admet fréquemment que le métal peut être porté à une température supérieure de 40 à 50°C à celle de la vapeur intérieure des tubes mais, dans certaines zones, sous divers influences, l'écart peut être très important. La température maximale de la vapeur surchauffée étant 505°C, celle de la paroi pourrait avoisinée 560°C. Par suite des avantages offerts par les surchauffeurs verticaux vis à vis des dépôts et corrosion, des tubes d'aciers alliés, inoxydables sont acceptables.

Nous choisirons les aciers suivants:

TU 15 CD 4-05 pour le primaire de température maximale 575°C

TU 15 CD 9-10 pour le secondaire de température maximale 600°C

Leurs caractéristiques sont indiquées à l'annexe 2.

II-1-4- Calcul des tubes

II-1-4-1- Diamètre intérieur

Il dépend de la vitesse v et du débit de la vapeur q_1 dans un tube. On s'impose généralement une vitesse de calcul. Il est recommandé de ne pas dépasser certaines vitesses même lorsque des pertes de charge importantes sont acceptées. En effet, des vitesses trop importantes provoquent:

- des risques de "coup de bélier" dans les tubes.

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

- des sifflements gênants. Dans le cas de la vapeur d'eau, les vitesses usuelles sont telles que $20 \leq v \leq 60$ m/s pour des pressions de vapeur p_v supérieures ou égales à 3 bars effective.

$$d_i = \sqrt{\frac{4q_1}{\pi v}}$$

Pour les deux parties du surchauffeur, $d_i = 50$ mm

II-1-4-2- Epaisseur et diamètre extérieur

Comme précédemment, elle dépend de la contrainte la plus importante existant à l'intérieur des tubes. Plusieurs formules permettent le calcul des épaisseurs des tubes excluant la notion de tube mince ou épais. Parmi celles-ci, celle utilisant le diamètre intérieur:

$$e = \frac{p_i d_i}{2(f + p_i y - p_i)}$$

où f est généralement pris comme

$$f = \min\left(\frac{SR}{FS}, \frac{SC}{1}\right)$$

FS dépend de la durée de vie et y est donné par le tableau suivant. Nous appliquons sur SR un facteur de sécurité de 2.5

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

t (°C)	480	510	540	566	593	621 et plus
aciers ferri-ques	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
acier austé-niti-ques	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7

$$de = Di + 2.e$$

surchauffeur	S1	S2
épaisseur (mm)	5	5
de (mm)	60	60

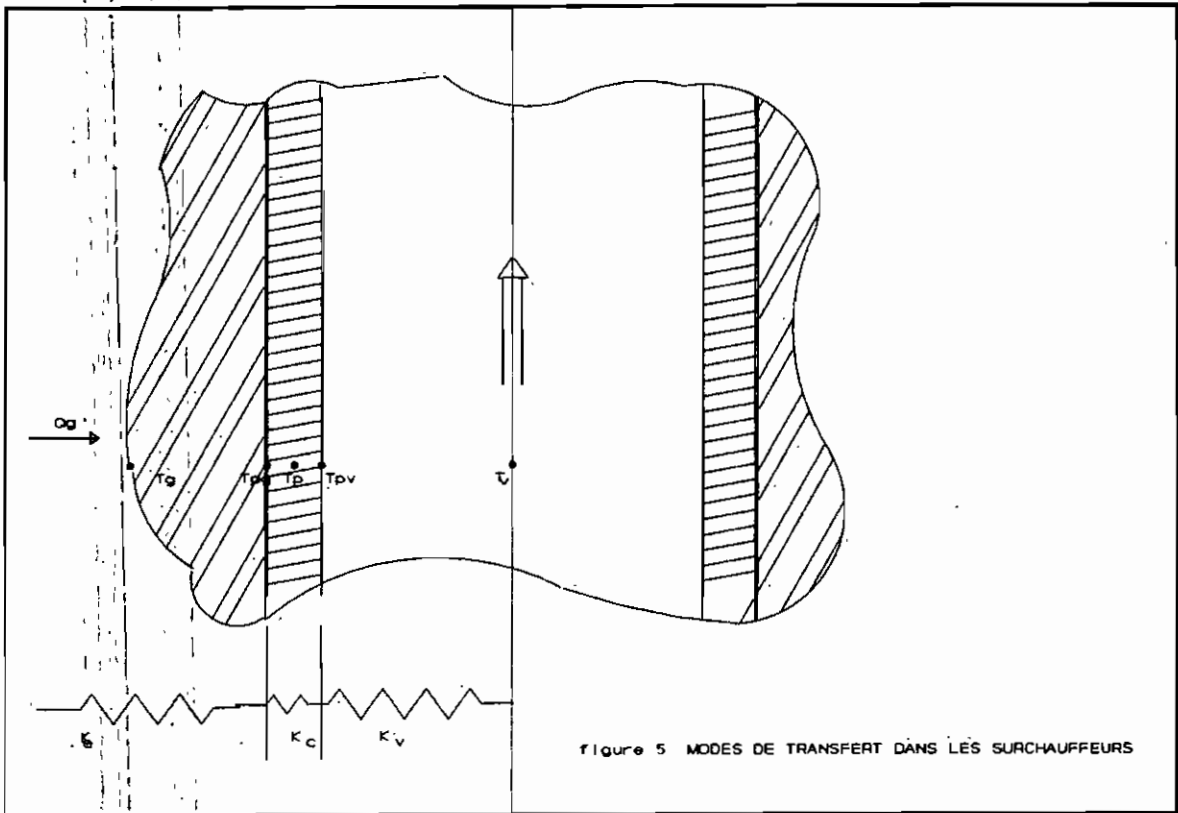
Tableau 6b

II-1-5- Calcul des coefficients partiels et global de transfert

Dans le cas de la transmission de la chaleur par les gaz de fumée aux surfaces des surchauffeurs protégées de la flamme par une partie des écrans vaporisateurs, les modes de transfert de chaleur qui interviennent sont:

- le transfert par rayonnement gazeux
- le transfert par convection gazeuse
- le transfert par conduction des tubes
- le transfert par convection côté vapeur.

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels



II-1-5-1- La transmission par rayonnement gazeuse

Une partie de la chaleur transmise aux surfaces est fournie par le rayonnement des gaz de fumée qui baignent les surfaces de chauffe. Cette transmission est principalement due aux rayonnements non négligeables du CO₂ et de la vapeur d'eau (H₂O). Elle dépend de l'épaisseur (a) de la couche gazeuse ainsi que de la pression partielle (p) de ces gaz.

En appelant ϵ l'émissivité de la paroi ($\epsilon = 0.8$ pour les aciers), la chaleur transmise par le gaz est :

pour le CO₂ :

$$\phi_c = \epsilon \left[(\phi_c)_{T_{gm}} - \left(\frac{T_{gm}}{T_{pg}} \right)^{0.65} (\phi_c)_{T_{pg}} \right]$$

pour l' H₂O :

$$\phi_v = \epsilon \left[(\phi_v)_{T_{gm}} - (\phi_v)_{T_{pg}} \right]$$

où

ϕ_c et ϕ_v sont respectivement le flux émis par le CO₂ et la vapeur d'eau; ϵ_c et ϵ_v leur émissivité. ϵ_c et ϵ_v sont des valeurs tabulés dépendant respectivement de la température des gaz et du produit de la pression partielle du gaz radiant par l'épaisseur de la couche gazeuse ($p_c \cdot a$ ou $p_v \cdot a$).

Pour une conduite cylindrique dont la longueur est grande par rapport au diamètre, $a = 0.9 \cdot d_e$

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

Pour un faisceau de tubes, $a = 3.2 \cdot d_e$

Le pourcentage du CO_2 ou de la vapeur d'eau est connu expérimentalement en fonction du pouvoir calorifique inférieur du fuel utilisé. Pour un pouvoir calorifique de 9700 kcal/kg, la fumée contient environ 14.5% de CO_2 et 11 % de vapeur d'eau.

Le coefficient de transmission par rayonnement gazeux est alors:

$$K_g = \frac{\phi}{T_{gm} - T_{pg}} \quad \text{ou}$$

$$\phi = \phi_c + \phi_v$$

Nous obtenons les résultats suivants :

Surchauffeur	primaire	secondaire
kg (kcal/hm ² °C)	11.012	15.128

Tableau 6c

II-1-5-2 Transmission par convection gazeuse

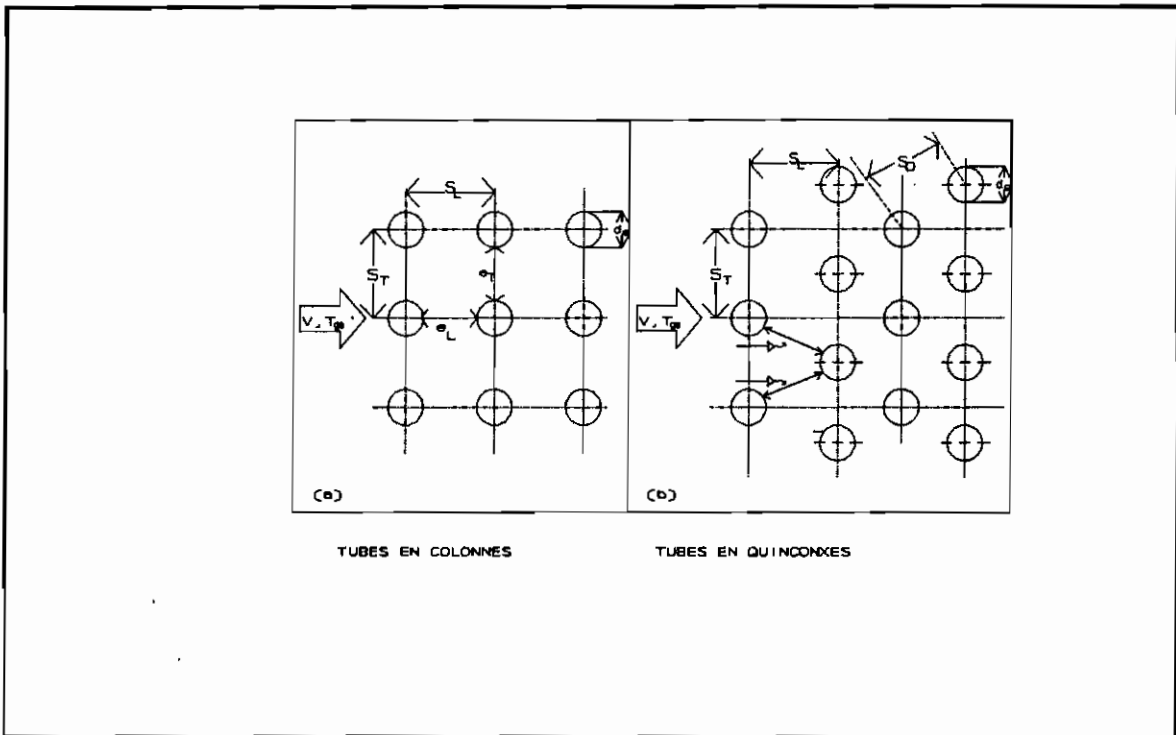
La valeur du coefficient d'écoulement de la chaleur dépend non seulement des paramètres relatifs à chaque tube, mais aussi de la disposition des tubes les uns par rapport aux autres. Cette disposition est caractérisée par le pas transversal (S_T), le pas longitudinal (S_L) et par l'arrangement en colonne ou en quinconce des tubes.

Pour des tubes tels que le nombre de rangées est supérieur ou égal à 10, et pour des gaz tels que $2000 < Re_{gmax} \leq 40000$ et $Pr > 0.7$ ce coefficient est donné par:

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

$$k_{bg} = 1.13 \cdot \frac{\lambda_g}{d_e} \cdot c_1 \cdot Re_{gmax}^m \cdot Pr_g^{0.33}$$

c_1 et m étant des valeurs tabulés, fonction de ST/de , SL/de et de l'arrangement (quinconce ou colonne). Re_{gmax} , le nombre de Reynold évalué à la vitesse maximale des gaz.



CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

Dans le cas où on ne connaît pas au préalable la disposition des tubes, on évalue k_{bg} pour un faisceau de tubes avec un nombre de rangées supérieur ou égal à 10 et tel que $Re_{gmax} > 6000$, par la formule suivante:

$$k_{bg} = 0.33 \cdot \frac{\lambda_g}{d_e} \cdot Re_{gmax}^m \cdot Pr_g^{0.33}$$

Les paramètres de ces équations sont évalués à la température

$$t = \frac{t_{gm} + t_p}{2}$$

Chacun de ces paramètres est calculé comme étant la somme des mêmes paramètres des constituants principaux des fumées (CO_2 , vapeur d'eau, azote) affectés de leur pourcentage respectif.

Pour la réalisation, les tubes de surchauffeurs devront être disposés en colonnes au sommet des carrés de sorte que la largeur libre minimale entre deux tubes voisins soit $e_t = e_L$.

Le coefficient de transfert extérieur est la somme de celui du rayonnement et de convection extérieur.

Les résultats pour chaque surchauffeur est donné dans le tableau suivant:

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

Surchauffeur	primaire	secondaire
k_{bg} (Kcal/hm ² °C)	60.767	63.543
k_e (kcal/hm ² °C)	71.779	78.671

Tableau 6d

II-1-5-3 Transmission par conduction des tubes

L'expression de la chaleur totale transférée dans un tube cylindrique de diamètre intérieur d_i , de diamètre extérieur d_e , de longueur L et d'épaisseur e est

$$Q = \frac{\lambda_c \cdot \pi L (d_e - d_i)}{e \ln \frac{d_e}{d_i}} \cdot (t_{pg} - t_{pv})$$

Ou

$$Q = S_m \cdot \frac{\lambda}{e} \cdot (t_{pg} - t_{pv})$$

avec

$$S_m = \frac{\pi L (d_e - d_i)}{\ln \frac{d_e}{d_i}}$$

soit

$$\frac{Q}{S_m (t_{pg} - t_{pv})} = \frac{\lambda_c}{e} = k_c$$

Le paramètre lambda est pris à la température

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

$$t_p = \frac{t_{pg} + t_{pv}}{2}$$

le résultat pour chaque surchauffeur est donné dans le tableau suivant

Surchauffeur	primaire	secondaire
k_c (kcal/hm ² °C)	6256.6	5278.25

Tableau 6e

II-1-5-4- Transmission par convection côté vapeur

Dans le cas d'un écoulement turbulent dans des faisceaux de tubes, le coefficient de transmission interne est donné par:

$$k_i = 0.023 \cdot \frac{\lambda_v}{d_i} \cdot \left(\rho_v v \frac{d_i}{\mu_v} \right)^{0.8} \cdot \left(C_{p_v} \frac{\mu}{\lambda_v} \right)^{0.4}$$

Les propriétés de la vapeur étant évaluées à la température du film :

$$t_f = \frac{t_p + t_p}{2}$$

surchauffeur	primaire	secondaire
k_i (kcal/hm ² °C)	1633	1853

Tableau 6f

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

II-1-5-5- Calcul du coefficient global K

Rapporté à la surface extérieure, il est tel que:

$$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{k_{es_e}} + \frac{1}{k_{is_i}} + \frac{e}{\lambda sm}$$

ce qui donne:

$$k = d_e^{-1} \cdot [(k_e d_e)^{-1} + (k_i d_i)^{-1} + \frac{e}{\lambda} \cdot \frac{\ln \frac{d_e}{d_i}}{d_e - d_i}]^{-1}$$

Surchauffeur	primaire	secondaire
k (kcal/hm ² °C)	67.769	73.759

Tableau 6a

II-1-6 Différence de température moyenne

Pour chaque surchauffeur,

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

$$t_d = \frac{(t_{ge} - t_{vs}) - (t_{gs} - t_{ve})}{\ln \frac{t_{ge} - t_{ve}}{t_{gs} - t_{vs}}}$$

Surchauffeur	primaire	secondaire
t_d (°C)	454.127	517.464

tableau 6h

II-1-7 Calcul de Φ_1 et vérification des valeurs fixées à priori

Dans les calculs des paramètres fonctionnels, plusieurs inconnues dépendent des températures inconnues (par exemple: la conductivité thermique de la vapeur, des tubes et C_{p_v}). Nous appelons valeurs à priori, les paramètres supposés au départ et recalculés à chaque stade en exprimant la conservation du flux.

L'objectif principal visé étant de faire passer le maximum de flux tout en restant si possible largement inférieur à la température de tenue du métal, la température d'entrée des gaz devrait être recherchée à cette fin.

Rapporté à l'unité de surface extérieure, le flux ϕ_1 est:

$$\phi_1 = k \cdot t_d$$

En exprimant que ce flux est le même pour chaque transfert, on

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

obtient:

$$t_{pv} = t_{vs} + \frac{\phi_1 \cdot d_e}{k_i \cdot d_i}$$

$$t_{pg} = t_{gs} - \frac{\phi_1}{k_e}$$

$$t_p = \frac{t_{pv} + t_{pg}}{2}$$

Les résultats de ces différentes températures et de la température d'entrée des gaz obtenus sont indiqués dans le tableau suivant:

Surchauffeur	primaire	secondaire
ϕ_1 (kcal/h m ² °C)	30780	38160
t_{pv} (°C)	472	529
t_{pg} (°C)	501	544
t_p (°C)	487	537
t_{ge} (°C)	930	1030

Tableau 6i

II-1-8 Débit de gaz nécessaire

Avec un rendement de 87 % , le bilan énergétique donne:

$$m_g = \frac{m_v \cdot \Sigma (h_{vs} - h_{ve})}{0.87 C_{p_g} (t_{ge} - t_{gs})}$$

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: Paramètres fonctionnels

C_{p_g} étant évalué à la température moyenne des gaz t_{gm} (872.5°C) en considérant que ceux-ci sont composés essentiellement des constituants principaux que sont le CO_2 , la vapeur d'eau et l'azote.

Ensemble - surchauffeur	
C_{p_g} (kcal/kg°C)	0.280
Rh δ (kg/m ³)	1.306
m_g (t/h - kg/s)	283.2 - 78.67

Tableau 6j

II-2- Paramètres constructifs de l'échangeur

- Surface d'échange:

$$S = \frac{Q}{\phi_1}$$

- Nombre total de passages:

$$N_p = n \cdot r = \frac{S}{\pi d_e L}$$

La hauteur de la chambre des surchauffeurs ne pouvant pas être modifiée, elle est fixée à sa valeur : $L = 5 \text{ m}$.

- section totale de passage dans les tubes:

$$S_p = \frac{q_v}{\rho_v} v = n \cdot \frac{\pi d_i^2}{4}$$

- nombre de nappes:

$$n = \frac{4 S_p}{\pi d_i^2}$$

-débit par tube:

CONCEPTION DES SURCHAUFFEURS PENDENTIFS: Paramètres constructifs

$$q_1 = \frac{Q_v}{n}$$

_ nombre de files par nappe:

$$r = \frac{N_p}{n}$$

- Section de passage totale autour des tubes de chaque étage

$$S_g = \frac{m_g}{\rho_g V_g}$$

Espacement minimale inter-tube

$$e_t = \frac{S_g}{L \cdot n}$$

- Longueur totale de l'ensemble surchauffeur

$$L_T = (d_{e1} + e_{T1}) \cdot n_1$$

$$L_T = (d_{e2} + e_{T2}) \cdot n_2$$

$$L_T = 4.871 \text{ m}$$

-Largeur totale de l'ensemble surchauffeur

Elle est donnée par la largeur du surchauffeur le plus grand

CONCEPTION DES SURCHAUFFEURS PENDENTIFS: Paramètres constructifs

$$l_T = (d_{e1} + e_{T1}) \cdot r = 2.823m$$

Les résultats de ces différents paramètres sont indiqués dans le tableau suivant:

Surchauffeur	primaire	secondaire
S (m ²)	509	160
L (m)	5	5
N _p	540	170
S _p (m ²)	0.060	0.053
n	31	27
q ₁ (t/h)	3.87	4.44
r	18	7
S _g (m ²)	15.06	15.06
e _T = e _L (mm)	97.15	111.54
Dimension (m * m)	(L _T *l _T) = 4.87 * 2.82	

Tableau 7

II-3- Matériels accessoires pour protection des surchauffeurs

II-3-1-Maintien en position et supportage des tubes

Du fait de l'amplitude des dilatations relatives à absorber, amplitude résultant du niveau élevé et variable des températures, les surchauffeurs pendentifs exigent un soin particulier. Ils est alors possible de constituer des supports ou d'entretoiser les rangées de tubes du surchauffeur afin de réduire les jeux nécessaires à la dilatation (figure 7)

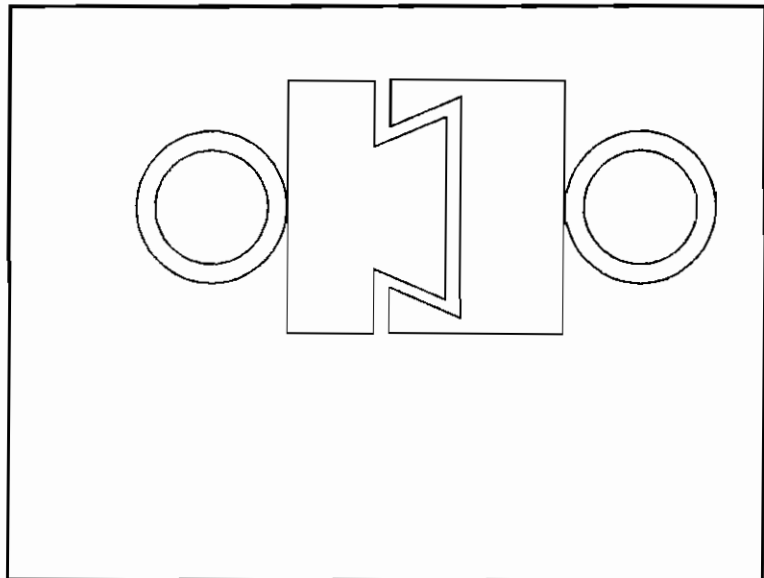


Figure 7: supportage des tubes

Ces pièces d'accrochage ou entretoises non refroidies doivent avoir des caractéristiques leur permettant de résister à la haute température imposée par les gaz. Etant donné que la

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: accessoires

température maximale d'entrée des gaz est de 1030°C au secondaire et 930°C au primaire, nous choisirons des pièces en acier allié (25 - 20) .

Soit le X 15 Cr Ni 25 - 20 ayant une température maximale de tenue de 1100 °C.

Ces pièces devront avoir une surface de contact suffisante avec les tubes sur lesquels elles sont soudées pour éviter que leur extrémité soit trop rapidement brûlée, ce qui rendrait le support inopérant.

II-3-2- Régulation de la surchauffe : le désurchauffeur

La surchauffe de la vapeur est dite stable, lorsque sans utiliser de moyen de réglage, la température de la vapeur délivrée par la chaudière varie peu en fonction de l'allure de marche. Cependant, dans la majorité des cas, la surchauffe est instable. En effet, lorsque l'allure (charge) de la chaudière augmente, l'échange par rayonnement des gaz varie peu, tandis que l'échange par convection qui augmente du fait de l'effet combiné de l'écart de température et du coefficient d'échange tend à augmenter la surchauffe.

On ne peut maintenir constante cette température de la surchauffe sur toute l'étendue de la vaporisation, lorsque la surchauffe est importante sans faire appel à des dispositifs de réglage de la température. C'est dans cette optique, qu'un dispositif de désurchauffe (désurchauffeur) est prévu.

Il est intercalé entre les deux parties de l'ensemble

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: accessoires

surchauffeur, dans le but de protéger les tubes du secondaire contre un échauffement exagéré. Son influence maximale, sera d'abaisser la température de la vapeur surchauffée de 30 °C environ (450°C - 420°C). Etant donné que la pression de la vapeur est supérieure à 40 bars, le refroidissement se fera par injection d'eau pulvérisée. Ce procédé rapide, permet d'agir sur la totalité de la vapeur et se prête au réglage automatique de la température de surchauffe par la commande de l'injection d'eau.

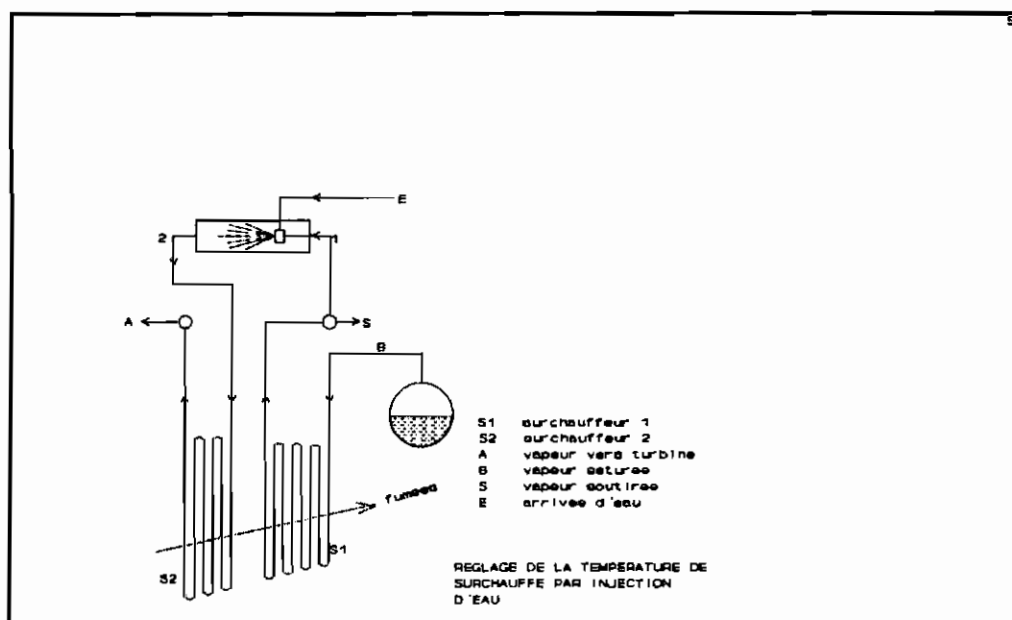


Figure 8

Il vient que par suite de l'injection, la masse totale de la vapeur en aval du désurchauffeur augmente par rapport à celle en amont. Etant donné qu'une quantité de vapeur sera soutirée à la

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: accessoires

sortie du surchauffeur 1 dans le but d'un nettoyage externe des surchauffeurs après détente, et que l'eau de désurchauffe arrive à une température de 140°C sous une pression de 100 bars environ de la bache alimentaire, nous obtenons par un bilan énergétique et massique le débit d'eau à injecter ou le débit de vapeur à soutirer.

$$m_e = m_s = \frac{m_2 (h_2 - h_1)}{Cp_E T_E - h_1}$$

m_2 (t/h)	CpE	T_E	h_1	h_2	mE (t/h)
130	4.2323	140	3287.1	3210.12	3.714

Tableau 8

En fait, ce débit d'eau sera réglé à l'aide d'un régulateur ayant comme consigne la température maximale de contrôle à la sortie du surchauffeur (505 °C).

II-3-1-Nettoyage externe (ramonage)

L'entretien en bon état de propreté des surfaces d'échange de chaleur revêt une grande importance. Du coté des fumées, des nettoyages périodiques doivent être effectués pour supprimer ou tout au moins limiter à une valeur acceptable le salissement des surfaces de chauffe par les produits de combustion.

Un tel nettoyage est désigné sous le terme générale de ramonage et l'on appelle ramoneur, les appareils qui permettent d'exécuter ce travail. Ce nettoyage se fait par soufflage d'un fluide et résulte de l'action mécanique du jet de ce fluide qui fait détacher les dépôts. Dans le cas présent, le fluide utilisé est de la vapeur soutirée à la sortie du surchauffeur primaire, (de débit $m_g = 3.7t/h$), et détendu jusqu'à pression $P_v = 15$ bars (soit $t = 414$ °C)

Le choix d'un type de ramoneur dépend de l'adaptation de l'appareil de ramonage aux conditions de température et à la constitution du matériel à nettoyer. Dans le cas des faisceaux de surchauffeurs à haute température, des souffleurs rétractiles longs paraissent mieux efficaces. Ces appareils d'une lance d'environ 7 m permettent sur une grande longueur des surchauffeurs de nettoyer des faisceaux dans des gaz très chauds. Au repos, la lance est en dehors de la chaudière. Lors de l'emploi, la lance pénètre horizontalement dans les surchauffeurs, tourne sur elle même et envoie des jets par son extrémité munie de deux buses opposées. (voir figure 9)

CONCEPTION D'UN SURCHAUFFEUR PENDENTIF: accessoires

L'obtention d'un type de ramoneur se fait en précisant le diamètre de la tuyère au col de l'orifice (D) et le diamètre de la tuyauterie d'amenée en amont de l'orifice (d).

En choisissant un ramonage à la vapeur aux conditions ci-dessus on obtient le diamètre (d) selon la formule de débit injecté par le ramoneur:

$$m_s = 164.5 C \cdot D^2 \sqrt{p_v \rho_v} \sqrt{1 - 0.4015 \beta^4 \left(1 + \frac{1}{4 \beta^4}\right)}$$

où

$C = \alpha (1 - \beta^4)^{1/2}$ est le coefficient de décharge

$\alpha \approx 0.8$ est le coefficient de débit

et $\beta = D/d$

On a $d = 24.2$ mm ; le diamètre de la tuyère étant donné par abaque. Soit $D = 27$ mm.

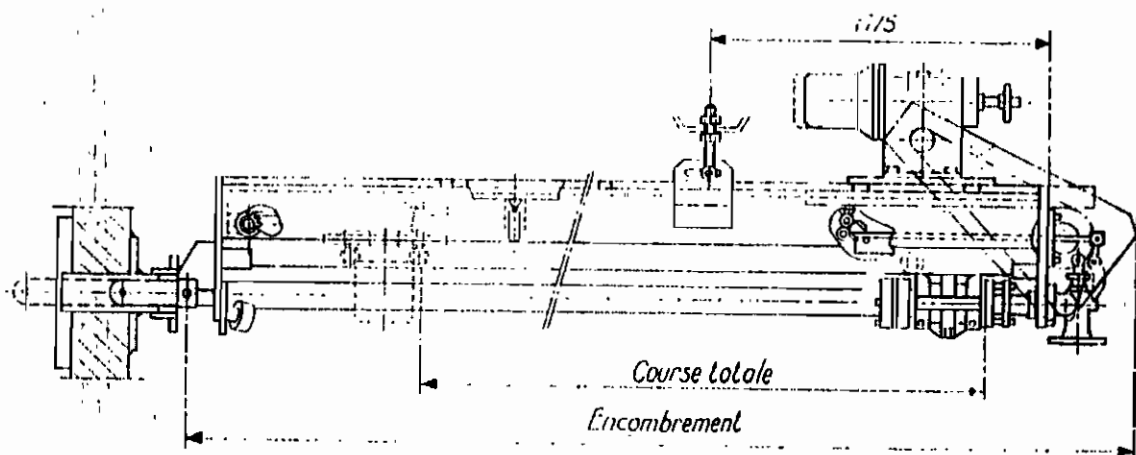


Fig 48. — Souffleur de suies rétractile.

Cinquième partie

RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION

Au terme de ce travail, nous ferons d'abord remarquer qu'il serait judicieux de contrôler rigoureusement voir de modifier le contrat en ce qui concerne les constituants du fuel-oil avec la Société Africaine de Raffinerie (SAR), fournisseur du fuel-oil à la SENELEC. En effet, avons nous constaté que la corrosion maximale est atteinte dans la majorité des cas des analyses obtenues.

Par ailleurs, pour une surveillance des températures du métal, il faudra prévoir dans l'avenir la mise en place des sondes de température-métal ou gaz; ceci permettra en outre d'établir approximativement comme suit l'influence de l'encrassement sur le rendement des surchauffeurs au cours du fonctionnement de la chaudière:

- Calculer la quantité de chaleur Q_r échangée quand les surchauffeurs sont encrassés:

$$Q_r = m_v \cdot C_{p_v} \cdot (T_{v_s} - T_{v_e})$$

- Evaluer K connaissant les températures d'entrée et sortie des surchauffeurs des gaz et de la vapeur.

$$K = \frac{Q_r}{S \cdot t_d}$$

- Evaluer la résistance à l'encrassement externe (R_{ext}) connaissant la résistance à l'encrassement interne (R_{int}), K_e , K_i , e , et lambda qui devraient être fournis par le constructeur.

$$R_{ext} = \frac{1}{K} - \frac{1}{K_e} - \frac{1}{K_i} - \frac{e}{\lambda} - R_{int}$$

- Calculer Q quand les surchauffeurs sont propres ($R_{ext} = 0$) :
- Evaluer le rendement

$$\eta = \frac{Q_r}{Q}$$

- Tracer la courbe du rendement en fonction de R_{ext} et du temps.

En ce qui concerne l'initiative d'installer des surchauffeurs verticaux, la disposition méthodique envisagée dans la conception bien que favorable à l'échange de chaleur ne protège pas les tubes en aval. Plusieurs dispositions peuvent être utilisées; l'essentiel serait de respecter la longueur totale des tubes et les section de passages. Pour les parties finales des surchauffeurs exposées aux gaz les plus chauds, il serait judicieux de disposer leurs tubes en circulation anti-méthodique comme l'indique la figure suivante.

toutefois comme signalé, la disposition devra être faite de telle sorte que la perte de charge totale ne dépasse pas 7 % de la pression totale.

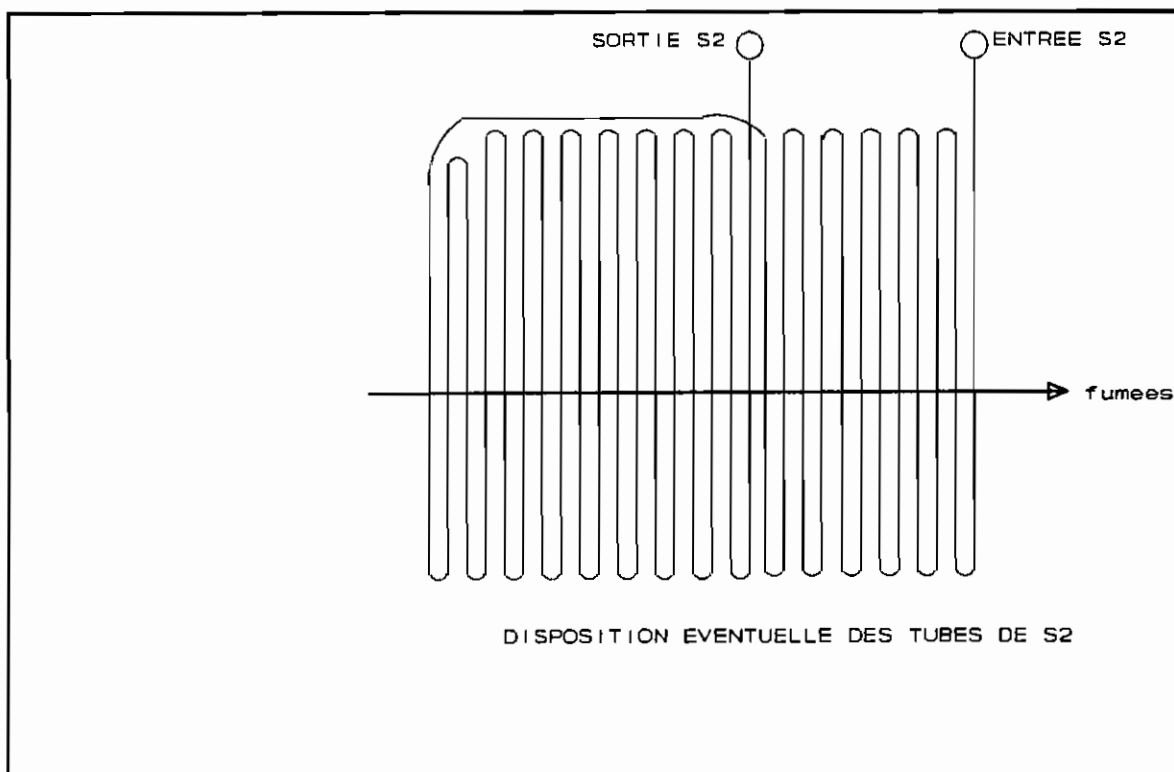


figure 10

Le ramoneur rétractile long pourra être utilisé pour les surchauffeurs horizontaux comme pour les surchauffeurs pendentifs.

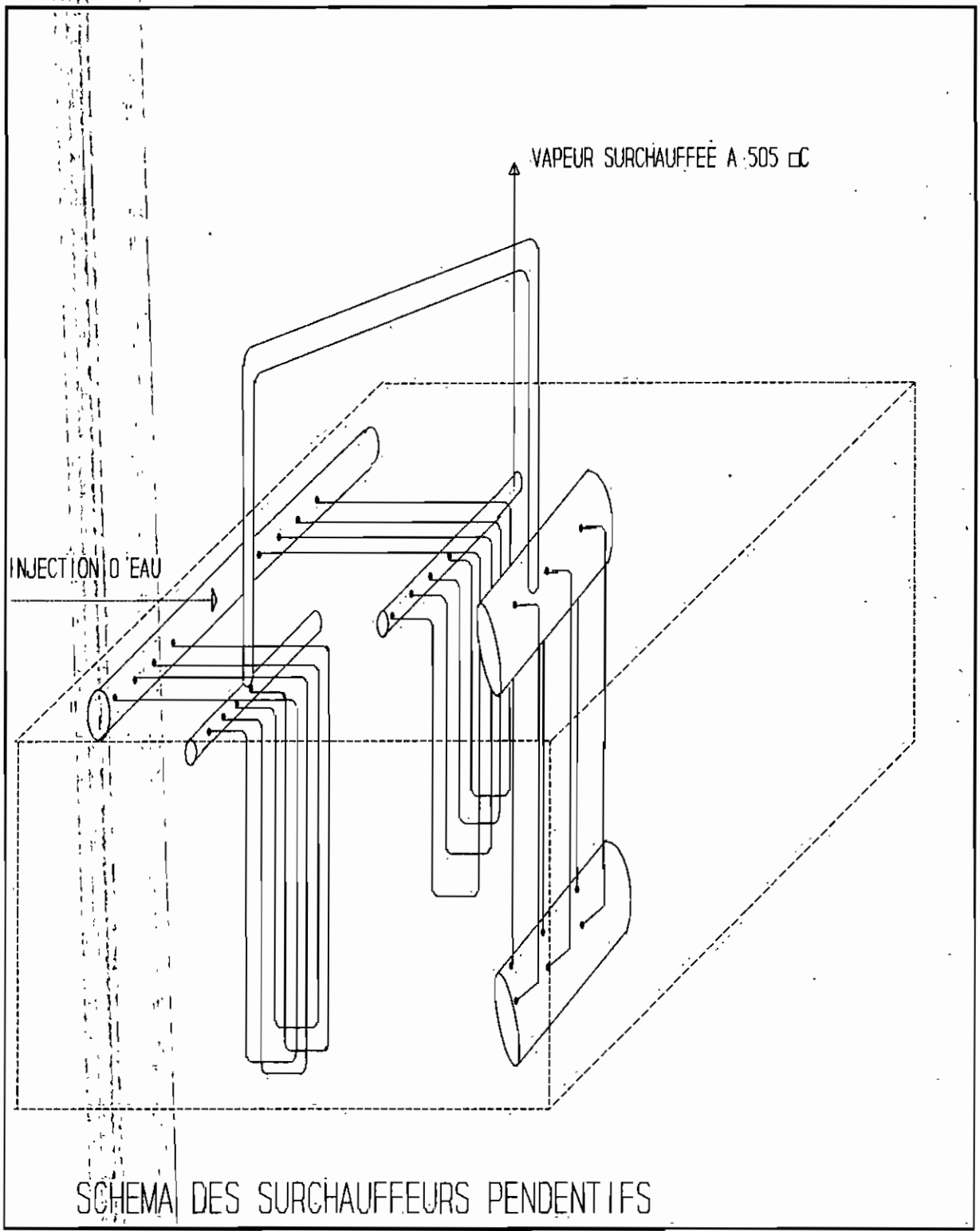
En ce qui concerne le désurchauffeur, il est bon de prévoir malgré tout, sur l'arrivée d'eau un filtre facilement visitable et nettoyable, et de le munir d'un indicateur de salissement constitué par manomètre différentiel. En effet, les problèmes des surchauffeurs sont dus non seulement aux dépôts externes mais aussi à la présence de dépôts à l'intérieur des tubes et à un mauvais réglage du débit d'eau de désurchauffer; c'est d'ailleurs pour cette dernière raison que nous avons conçu un seul

désurchauffeur pour les surchauffeurs pendentifs.

Finalement, signalons que outre les facteurs mentionnés dans ce rapport d'autres causes comme:

- la présence accidentelle d'eau dans les tubes au démarrage
- la défaillance des lieux de jonction par soudure sous l'action de la corrosion et de la température

sont à l'origine des défauts observés au niveau des surchauffeurs et seule une surveillance rigoureuse des causes, des prises de mesure des paramètres de fonctionnement permettront de remédier et d'évaluer leur influence sur la production de l'énergie.



SCHEMA DES SURCHAUFFEURS PENDENTIFS

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

- Thermique appliquée aux fours industriels, Tome 1, W.Heiligenstaedt, Dunod-Paris.1971
- Techniques de l'ingénieur: Volumes B1 - chaudière; M2 1 - propriétés des alliages
- La vapeur d'eau industrielle R.P. Ositello, Lavoisier 1983
- Basic heat transfert Franck Kreith
- Les combustibles et la combustion dans les centrales thermiques, Fascicule N° 125, Electricité de France, Avril 1974
- Calcul thermique des chaudières, Friedrich Nuber, Dunod Paris 1972
- Corrosion par les gaz de combustion du mazout, Note technique, Electricité de France, Décembre 1970
- Cours de transfert de chaleur, E.P.T, 1990-1991

ANNEXE I

ANALYSES OBTENUES ET TABLEAU
CORROSION HAUTE TEMPERATURE

LAB N° 11237 (suite)

ANALYSES EFFECTUEES SUR PRODUIT BRUT -	RESULTATS
Densité	2,87 g/cm ³
Aluminium en Al ₂ O ₃	1,3 % poids
Calcium en CaO	6,9 % poids
Fer en Fe ₂ O ₃	2,3 % poids
Nickel en NiO	0,5 % poids
Sodium en Na ₂ O	17,1 % poids
Potassium en K ₂ O	0,1 % poids
Vanadium en V ₂ O ₅	49,0 % poids
Magnésium en MgO	1,9 % poids
Sulfates en SO ₃	10,2 % poids
Potentiel d'hydrogène pH à 25° C	7,8 u.pH
Nitrates en NO ₃ ^{-*}	7,7 % poids
Chlorures en Cl ^{-*}	< 0,1 % poids
Silice en SiO ₂	2,4 % poids

* Analyse effectuée sur extrait aqueux obtenu par épuisement de 1g de produit dans 500 ml d'eau distillée bouillie.

SAINT-OUEN, le 26 octobre 1992

L'Ingénieur
 Chef de la Division
 Laboratoires Essais Mesures

A. FEULLOLAY

LAB N° 11238 (suite)

ANALYSES EFFECTUEES SUR PRODUIT BRUT -	RESULTATS
Densité	3,05 g/cm ³
Aluminium en Al ₂ O ₃	8,9 % poids
Calcium en CaO	4,6 % poids
Fer en Fe ₂ O ₃	4,6 % poids
Nickel en NiO	7,5 % poids
Sodium en Na ₂ O	4,5 % poids
Potassium en K ₂ O	< 0,1 % poids
Vanadium en V ₂ O ₅	25,4 % poids
Magnésium en MgO	4,5 % poids
Sulfates en SO ₃	2,1 % poids
Potentiel d'hydrogène pH* à 25° C	6,6 u.pH
Nitrates en NO ₃ ^{-*}	4,2 % poids
Chlorures en Cl ^{-*}	< 0,1 % poids
Silice en SiO ₂	21,1 poids

* Analyse effectuée sur extrait aqueux obtenu par épuisement de 1g de produit dans 500 ml d'eau distillée bouillie.

SAINT-OUEN, le 26 octobre 1992

L'Ingénieur
 Chef de la Division
 Laboratoires Essais Mûres

A. PEILLOUAY

LAB N° 11239 (suite)

ANALYSES EFFECTUEES SUR PRODUIT BRUT -	RESULTATS
Densité	3,21 g/cm ³
Aluminium en Al ₂ O ₃	3,8 % poids
Calcium en CaO	6,0 % poids
Fer en Fe ₂ O ₃	7,7 % poids
Nickel en NiO	9,6 % poids
Sodium en Na ₂ O	8,5 % poids
Potassium en K ₂ O	< 0,1 % poids
Vanadium en V ₂ O ₅	23,6 poids
Magnésium en MgO	1,5 % poids
Sulfates en SO ₃	20,0 % poids
Potentiel d'hydrogène pH* à 25° C	3,6 u.pH
Nitrates en NO ₃ ^{-*}	0,3 % poids
Chlorures en Cl ^{-*}	< 0,1 % poids
Silice en SiO ₂	5,1 % poids

* Analyse effectuée sur extrait aqueux obtenu par épuisement de 1g de produit dans 500 ml d'eau distillée bouillie.

SAINT-OUEN, le 26 octobre 1992

L'Ingénieur
 Chef de la Division
 Laboratoires Essais Mesures

A. PELLERAY

LAB N° 11240 (suite)

ANALYSES EFFECTUEES SUR PRODUIT BRUT -	RESULTATS
Densité	3,05 g/cm ³
Aluminium en Al ₂ O ₃	1,7 % poids
Calcium en CaO	2,6 % poids
Fer en Fe ₂ O ₃	1,1 % poids
Nickel en NiO	1,7 % poids
Sodium en Na ₂ O	9,7 % poids
Potassium en K ₂ O	0,2 % poids
Vanadium en V ₂ O ₅	47,4 % poids
Magnésium en MgO	1,2 % poids
Sulfates en SO ₃	19,0 % poids
Potentiel d'hydrogène pH* 0 25° C	3,1 u.pH
Nitrates en NO ₃ ^{-*}	1,1 % poids
Chlorures en Cl ^{-*}	< 0,1 % poids
Silice en SiO ₂	1,8 % poids

* Analyse effectuée sur extrait aqueux obtenu par épuisement de 1g de produit dans 500 ml d'eau distillée bouillie.

SAINT-OUEN, le 26 octobre 1992

L'Ingénieur
 Chef de la Division
 Laboratoires Essais Mesures


 A. PHILLOLAY

LAB N° 11241 (suite)

ANALYSES EFFECTUEES SUR PRODUIT BRUT -	RESULTATS
Densité	3,0 g/cm ³
Aluminium en Al ₂ O ₃	1,8 % poids
Calcium en CaO	2,6 % poids
Fer en Fe ₂ O ₃	1,0 % poids
Nickel en NiO	0,5 % poids
Sodium en Na ₂ O	16,5 % poids
Potassium en K ₂ O	0,4 % poids
Vanadium en V ₂ O ₅	54,9 % poids
Magnésium en MgO	1,6 % poids
Sulfates en SO ₃	10,7 % poids
Potentiel d'hydrogène pH à 25° C	6,3 a.pH
Nitrates en NO ₃ ^{-*}	8,4 % poids
Chlorures en Cl ^{-*}	< 0,1 % poids
Silice en SiO ₂	0,9 % poids

* Analyse effectuée sur extrait aqueux obtenu par épuisement de 1g de produit dans 500 ml d'eau distillée bouillie.

SAINT-OUEN, le 26 octobre 1992

L'Ingénieur
 Chef de la Division
 Laboratoires Essais Mesures


 A. FBILLOLAY

LAB N° 11242 (suite)

ANALYSES EFFECTUEES SUR PRODUIT BRUT -	RESULTATS
Densité	2,94 g/cm ³
Aluminium en Al ₂ O ₃	1,6 % poids
Calcium en CaO	3,4 % poids
Fer en Fe ₂ O ₃	2,7 % poids
Nickel en NiO	1,8 % poids
Sodium en Na ₂ O	13,8 % poids
Potassium en K ₂ O	0,4 % poids
Vanadium en V ₂ O ₅	37,1 % poids
Magnésium en MgO	1,3 % poids
Sulfates en SO ₃	28,6 % poids
Potentiel d'hydrogène pH* 0 25° C	3,4 u.pH
Nitrates en NO ₃ ^{-*}	0,2 % poids
Chlorures en Cl ^{-*}	< 0,1 % poids
Silice en SiO ₂	2,1 % poids

* Analyse effectuée sur extrait aqueux obtenu par épuisement de 1g de produit dans 500 ml d'eau distillée bouillie.

SAINT-OUEN, le 26 octobre 1992

L'Ingénieur
 Chef de la Division
 Laboratoires Essais Mesures


 A. FEILLOUAY

LAB N° 11243 (suite)

ANALYSES EFFECTUEES SUR PRODUIT BRUT	RESULTATS
Densité du produit brut	2,16 g/cm ³
Teneur en Cendres à 500°C	66,5 % poids
Aluminium en Al ₂ O ₃	0,9 % poids
Calcium en CaO	1,9 % poids
Fer en Fe ₂ O ₃	1,9 % poids
Nickel en NiO	3,1 % poids
Sodium en Na ₂ O	15,0 % poids
Potassium en K ₂ O	0,2 % poids
Vanadium en V ₂ O ₅	22,5 % poids
Magnésium en MgO	1,0 % poids
Sulfates en SO ₃	22,4 % poids
Potentiel d'hydrogène pH à 25° C	3,0 % poids
Nitrates en NO ₃ ^{-*}	0,9 % poids
Chlorures en Cl ^{-*}	< 0,1 % poids [~]
Silice en SiO ₂	1,5 % poids

* Analyse effectuée sur extrait aqueux obtenu par épuisement de 1g de produit dans 500 ml d'eau distillée bouillie.

SAINT-OUEN, le 26 octobre 1992

L'Ingénieur
 Chef de la Division
 Laboratoires Essais Mesures


 A. FEILLOLAY

LAB N° 11244 (suite)

ANALYSES EFFECTUEES SUR PRODUIT BRUT -	RESULTATS
Densité du produit brut	1,92 g/cm ³
Teneur en Cendres à 500°C	40,8 % poids
Aluminium en Al ₂ O ₃	0,4 % poids
Calcium en CaO	0,7 % poids
Fer en Fe ₂ O ₃	14,5 % poids
Nickel en NiO	0,9 % poids
Sodium en Na ₂ O	2,2 % poids
Potassium en K ₂ O	< 0,1 % poids
Vanadium en V ₂ O ₅	6,8 % poids
Magnésium en MgO	0,4 % poids
Sulfates en SO ₃	9,0 % poids
Potentiel d'hydrogène pH* à 25° C	2,7 U. pH
Nitrates en NO ₃ ^{-*}	0,6 % poids
Chlorures en Cl ^{-*}	< 0,1 % poids
Silicé en SiO ₂	1,4 % poids

* Analyse effectuée sur extrait aqueux obtenu par épuisement de 1g de produit dans 500 ml d'eau distillée bouillie.

SAINT-OUEN, le 26 octobre 1992

L'Ingénieur
 Chef de la Division
 Laboratoires Essais Mesures


 A. PEILLOUAY

Tableau: Corrosion haute température

vitesse de corrosion en mm/1000h pour différentes températures, gaz et métal

Fuel - oil n° 2

v = 335 ppm

Na = 82.5 ppm

S = 2.54 %

O₂ = 12 % (u = 2.5%)

Tg	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
400	0.001320	0.001603	0.001922	0.002277	0.002664	0.003079	0.003515	0.003963	0.004413	0.004853	0.005271	0.005654	0.005989
420	0.001403	0.001703	0.002043	0.002420	0.002832	0.003272	0.003735	0.004211	0.004690	0.005158	0.005602	0.006009	0.006365
440	0.001500	0.001821	0.002184	0.002587	0.003027	0.003498	0.003993	0.004502	0.005013	0.005514	0.005989	0.006424	0.006804
460	0.001614	0.001959	0.002350	0.002784	0.003257	0.003784	0.004296	0.004844	0.005394	0.005933	0.006444	0.006912	0.007321
480	0.001748	0.002123	0.002546	0.003016	0.003529	0.004078	0.004655	0.005249	0.005845	0.006428	0.006982	0.007489	0.007933
500	0.001909	0.002318	0.002780	0.003294	0.003854	0.004454	0.005084	0.005732	0.006383	0.007020	0.007624	0.008178	0.008662
520	0.002103	0.002553	0.003062	0.003627	0.004244	0.004905	0.005599	0.006312	0.007029	0.007731	0.008397	0.009007	0.009540
540	0.002337	0.002838	0.003404	0.004032	0.004718	0.005452	0.006223	0.007017	0.007813	0.008593	0.009334	0.010012	0.010604
560	0.002625	0.003187	0.003823	0.004528	0.005298	0.006123	0.006989	0.007880	0.008774	0.009650	0.010482	0.011243	0.011908
580	0.002981	0.003620	0.004341	0.005142	0.006017	0.006953	0.007937	0.008948	0.009965	0.010959	0.011903	0.012768	0.013523
600	0.003427	0.004161	0.004991	0.005912	0.006917	0.007994	0.009125	0.010287	0.011456	0.012559	0.013685	0.014679	0.015547
620	0.003993	0.004849	0.005815	0.006889	0.008060	0.009315	0.010632	0.011987	0.013349	0.014681	0.015946	0.017104	0.018116
640	0.004722	0.005734	0.006877	0.008146	0.009531	0.011015	0.012573	0.014175	0.015785	0.017361	0.018857	0.020226	0.021423
660	0.005676	0.006892	0.008265	0.009790	0.011455	0.013238	0.015111	0.017036	0.018971	0.020865	0.022662	0.024308	0.025747
680	0.006943	0.008431	0.010111	0.011977	0.014013	0.016194	0.018465	0.020841	0.023208	0.025524	0.027724	0.029737	0.031456

Tableau: Corrosion haute température

Perte d'épaisseur par corrosion en mm pour différentes températures, gaz et métal et pour 20000 heures de fonctionnement

Tg	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
400	0.264075	0.320650	0.384552	0.455519	0.532957	0.615909	0.703037	0.792632	0.882643	0.970736	1.054377	1.130946	1.197868
420	0.270650	0.340775	0.408683	0.484109	0.566405	0.654566	0.747153	0.843381	0.938042	1.031664	1.120555	1.201930	1.273052
440	0.300022	0.364297	0.436897	0.517525	0.605504	0.695747	0.798735	0.900526	1.002790	1.102874	1.197300	1.284893	1.360924
460	0.322803	0.391959	0.470071	0.556821	0.651461	0.752880	0.859384	0.968904	1.078932	1.166616	1.288358	1.382456	1.464260
480	0.349774	0.424709	0.509348	0.603346	0.705915	0.815787	0.931190	1.049860	1.169082	1.265763	1.396548	1.497966	1.586606
500	0.381945	0.463772	0.556193	0.658639	0.770843	0.890820	1.016837	1.148423	1.276610	1.404023	1.524998	1.635744	1.732536
520	0.420631	0.510745	0.612531	0.725570	0.848918	0.981047	1.119828	1.262539	1.405912	1.546230	1.679458	1.801421	1.908017
540	0.467567	0.567737	0.680880	0.806533	0.943644	1.090516	1.244783	1.403418	1.562790	1.718765	1.866359	2.002431	2.120922
560	0.525072	0.637561	0.764619	0.905726	1.059700	1.224636	1.397876	1.576021	1.754994	1.930152	2.096459	2.248705	2.381768
580	0.596285	0.724030	0.868321	1.028565	1.203422	1.390727	1.587463	1.789769	1.993014	2.191928	2.380791	2.553685	2.704785
600	0.685516	0.832378	0.998261	1.182485	1.383508	1.598843	1.825019	2.057599	2.291260	2.519940	2.737065	2.935832	3.109355
620	0.798775	0.969901	1.163191	1.377852	1.612088	1.863000	2.126544	2.397550	2.669915	2.936278	3.189276	3.420883	3.623307
640	0.944579	1.146842	1.375513	1.629357	1.906349	2.203061	2.514711	2.835186	3.157149	3.472250	3.771428	4.045312	4.284685
660	1.135212	1.378415	1.653116	1.958191	2.291085	2.647679	3.022226	3.407377	3.794318	4.173012	4.532571	4.861728	5.149412
680	1.388732	1.686248	2.022297	2.395502	2.802739	3.238968	3.697160	4.168326	4.641679	5.104945	5.544301	5.947468	6.299398

ANNEXE II

**CARACTERISTIQUES DES TUBES D'ACIER,
GAZ, ET DE LA VAPEUR**

Tableau XXII. - Caractéristiques mécaniques et physiques des tôles pour chaudières et appareils à pression (d'après NF A 36-208 juillet 1978) (1) (2) (3).

Nuances	Charge provoquant un allongement de fluage de 1 % (en N/mm ²)															
	en 10 ⁴ h à la température (-C) de								en 10 ⁵ h à la température (-C) de							
	425	480	475	500	525	550	575	600	425	480	475	500	525	550	575	600
15 D 3	206	177	155	127	90				176	147	116	78	47			
15 MD 4-08 et 15 MDV 4-08	392	333	255	177	118				314	240	162	103	54			
15 CD 2-08		255	206	167	118	78				198	152	108	72	39		
15 CD 4-08		245	211	172	123	88	54			206	153	123	78	44	20	
10 CD 8-10				123	98	78	84	44				93	74	59	42	25
2 10 CD 8-08			88	85	63	49	34	27			83	61	44	32	24	16

Nuances	Charge provoquant la rupture par fluage (en N/mm ²)															
	en 10 ⁴ h à la température (-C) de								en 10 ⁵ h à la température (-C) de							
	425	450	475	500	525	550	575	600	425	480	475	500	525	550	575	600
15 D 3	353	304	235	177	120				296	216	155	103	62			
15 MD 4-08 et 15 MDV 4-08	421	353	279	198	132				343	285	181	118	69			
15 CD 2-08		343	275	206	147	96				255	196	137	88	49		
15 CD 4-08		343	284	218	157	108	74			265	201	152	98	59	31	
10 CD 8-10				170	147	118	90	69				142	103	81	59	39
2 10 CD 8-08			186	147	113	83	61	44			147	108	75	54	38	27

Nuances	Module d'élasticité (en N/mm ²) (2) à la température de						
	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
15 D-3 à 2 10 CD 8-08	208 000		191 000	186 000	176 500	167 000	

Nuances	Coefficient moyen de dilatation linéique (en 10 ⁻⁶ K ⁻¹) (2) entre 20 °C et						
	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
15 D-3 à 2 10 CD 8-08		11,1	12,1	12,9	13,5	13,9	14,1

Nuances	Conductivité thermique (en W.m ⁻¹ .K ⁻¹) (1) à la température de						
	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
15 D-3 15 MD 4-08 15 MDV 4-08	47,5	46,5	45	43	40,5	38,5	35,5
15 CD 2-08 15 CD 4-08	44	43	42	40,5	38,5	36	33,5
10 CD 8-10	38,5	37	36	35	33,5	31,5	29
2 10 CD 8-08	20	23	25	27	28	28	28

1 N/mm² = 1 MPa = 0,1 hbar = 0,102 kgf/mm².

(1) Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes obtenues par interpolation ou extrapolation des résultats expérimentaux. Elles peuvent être considérées comme sûres à + 20 %.

(2) Toutes les valeurs sont données à titre indicatif.

(3) Les autres caractéristiques mécaniques de ces aciers sont données dans le tableau XXI.

1 N/mm² = 1 MPa = 0,1 hbar = 0,102 kgf/mm².

Form. M 308,2 - 5

3,4 Tôles pour chaudières et appareils à pression en aciers-alliés

Les tableaux XX à XXII établis d'après la norme française NF A 36-206 de juillet 1978, résumant les caractéristiques de ces nuances. (Sa reporter à la norme référencée qui, seule, fait foi).

Tableau XX. - Composition chimique (en %)(¹⁾) des aciers alliés (tôles pour chaudières et appareils à pression) (d'après NF A 36-206 juillet 1978)

Nuances	C max.		Si		Mn		P max.		
	sur coulée	sur produit	sur coulée	sur produit	sur coulée	sur produit	sur coulée	sur produit	
18 D 3	0,18	0,20	0,15 à 0,30	0,10 à 0,35	0,50 à 0,80	0,45 à 0,85	0,035	0,040	(1) En outre, la teneur en carbone est limitée à 0,25 % sur coulée comme sur produit pour toutes les nuances. Toutefois, une teneur de 0,30 % sur coulée comme sur produit est tolérée lorsque le produit n'est pas destiné à subir des opérations de formage à chaud (température supérieure à 700 °C).
18 MD 4-08	0,20	0,22	0,15 à 0,35	0,10 à 0,40	0,90 à 1,40	0,90 à 1,50	0,030	0,035	
18 MDV 4-08	0,18	0,20	0,15 à 0,35	0,10 à 0,40	0,90 à 1,40	0,90 à 1,50	0,030	0,035	
18 CD 2-08	0,18	0,20	0,15 à 0,30	0,10 à 0,35	0,50 à 0,80	0,45 à 0,85	0,030	0,035	
18 CD 4-08	0,18	0,20	0,15 à 0,35	0,10 à 0,40	0,40 à 0,80	0,40 à 0,85	0,030	0,035	
10 CD 9-10	0,18	0,17	0,15 à 0,35	0,10 à 0,40	0,40 à 0,80	0,40 à 0,85	0,030	0,035	
Z 10 CD 8-08	0,15	0,17	0,15 à 0,50	0,10 à 0,55	0,30 à 0,60	0,30 à 0,60	0,030	0,035	
Nuances	S max.		Cr		Mo		V		
	sur coulée	sur produit	sur coulée	sur produit	sur coulée	sur produit	sur coulée	sur produit	
18 D 3	0,030	0,035	(2) (3)	(2) (3)	0,25 à 0,35	0,25 à 0,40	(5)	(5)	(2) Pour ces nuances, le teneur en chrome résiduel est limitée à 0,30 % sur coulée comme sur produit.
18 MD 4-08	0,030	0,035	(2) (4)	(2) (4)	0,40 à 0,80	0,35 à 0,60	(5)	(5)	
18 MDV 4-08	0,030	0,035	(2) (4)	(2) (4)	0,40 à 0,60	0,35 à 0,60	0,04 à 0,08	0,04 à 0,10	(3) Pour ces nuances, le teneur en nickel résiduel est limitée à 0,30 % sur coulée comme sur produit.
18 CD 2-08	0,030	0,035	0,40 à 0,60	0,35 à 0,65 (3)	0,40 à 0,60	0,40 à 0,60	(5)	(5)	(4) Pour ces nuances, le teneur en nickel résiduel est limitée à 0,50 % sur coulée comme sur produit.
18 CD 4-08	0,030	0,035	0,80 à 1,20	0,75 à 1,25 (3)	0,40 à 0,60	0,40 à 0,60	(5)	(5)	(5) Pour ces nuances, le teneur en vanadium résiduel est limitée à 0,04 % sur coulée comme sur produit.
10 CD 9-10	0,030	0,035	2,00 à 2,50	1,95 à 2,55 (3)	0,90 à 1,10	0,90 à 1,15	(5)	(5)	
Z 10 CD 8-08	0,030	0,035	4,00 à 6,00 (3)	3,90 à 6,10 (3)	0,45 à 0,65	0,40 à 0,65	(5)	(5)	

Tableau XXI. - Caractéristiques mécaniques des aciers alliés (tôles pour chaudières et appareils à pression) (⁰) (d'après NF A 36-206 juillet 1978).

Nuances	Traitement thermique de référence normalisé + revenu (refroidissement à l'air)	Caractéristiques de traction à la température ambiante L ₀ = 5,65 √S ₀									
		R min. (¹) (²) N/mm ²	R _e min. (³) (N/mm ²)			A min. (³) (%)					
			e < 60	60 < e < 80	80 < e	e < 30	30 < e < 60	60 < e			
18 D 3	875 °C/925 °C à 800 °C/875 °C	430 à 530	265	255	.....	25	23	22	(1) A la condition que les valeurs minimales d'allongement et de limite d'élasticité soient strictement respectées il sera admis soit un dépassement de 20 N/mm ² en plus sur la limite supérieure, soit un dépassement de 20 N/mm ² en moins sur la limite inférieure de résistance à la traction, pour les produits de plus de 80 mm d'épaisseur. (2) R = A > 10 500, les deux grandeurs R et A étant mesurées sur la même éprouvette. (3) e = épaisseur de la tôle en millimètres a = épaisseur de l'éprouvette de pliage en millimètres pour e < 30, a = e pour e > 30, a = 30		
18 MD 4-08	875 °C/925 °C à 800 °C/875 °C	510 à 610	345	345	325	21	20	19			
18 MDV 4-08	875 °C/925 °C à 800 °C/875 °C	510 à 610	345	345	325	21	20	19			
18 CD 2-08	875 °C/925 °C à 825 °C/700 °C	450 à 550	275	265	.....	25	23	22			
18 CD 4-08	900 °C/950 °C à 650 °C/725 °C	470 à 570	295	.....	.....	23	22	.....		
10 CD 9-10	900 °C/950 °C à 700 °C/775 °C	540 à 640 (e ≤ 20) 520 à 620 (e > 20)	310	310	.....	21	20	18			
Z 10 CD 8-08	900 °C/950 °C à 700 °C/760 °C	590 à 710	390	390	390	15	15	15			
Nuances	Pliage à 180° épaisseur de mandrin (³)	Résilience minimale dsJ/cm ²			R _{0,002} min. (N/mm ²) à la température de						
		KCU à +20 °C	KCV à 0 °C		200 °C	280 °C	300 °C	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C
18 D 3	2 a	6	4	.....	245	226	198	188	177	166	166
18 MD 4-08	2 a	6	4	.....	309	284	284	265	235	216	216
18 MDV 4-08	2 a	6	4	.....	309	284	284	265	235	216	216
18 CD 2-08	2 a	6	4	.....	255	235	216	196	186	181	181
18 CD 4-08	2 a	6	4	.....	275	255	235	216	201	191	191
10 CD 9-10	2 a	6	4	.....	275	255	235	226	216	206	196
Z 10 CD 8-08	2 a	6	4	.....	333	323	309	294	279	265	255

1 N/mm² = 1 MPa = 0,1 hbar = 0,102 kgf/mm².

(0) Les caractéristiques moyennes d'allongement et de rupture par fluage de ces nuances sont données dans le tableau XXII.

TABLEAUX 42 et 43. — Constantes caractéristiques des gaz

Temp. °C	Oxygène O_2 , $\gamma_0 = 1,429$ (kg/Nm ³)						Azote N_2 , $\gamma_0 = 1,250$ (kg/Nm ³)						Hydrogène H_2 , $\gamma_0 = 0,090$ (kg/Nm ³)					
	C_{p0} (kcal/ Nm ³ ·°C)	λ^0 (kcal/m·h·°C)	$\eta \times 10^6$ (kg/m·s)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	Pr	C_{p0} (kcal/ Nm ³ ·°C)	λ^0 (kcal/m·h·°C)	$\eta \times 10^6$ (kg/m·s)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	Pr	C_{p0} (kcal/ Nm ³ ·°C)	λ^0 (kcal/m·h·°C)	$\eta \times 10^6$ (kg/m·s)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	Pr
0	0,313	0,0208	19,3	18,8	13,5	0,72	0,311	0,0206	16,6	18,5	13,2	0,72	0,306	0,145	8,4	133	94	0,72
200	0,328	0,0333	29,2	49,3	35,3	0,72	0,314	0,0314	24,7	48,4	34,3	0,71	0,314	0,211	12,2	326	234	0,72
400	0,350	0,0450	37,1	88,8	64,0	0,73	0,326	0,0408	31,2	86,5	61,5	0,72	0,326	0,272	15,1	577	414	0,72
600	0,366	0,0554	43,7	135	98,0	0,73	0,341	0,0488	36,7	128	94	0,74	0,341	0,331	17,6	871	625	0,72
800	0,376	0,0650	49,7	190	137	0,73	0,354	0,0558	41,5	174	131	0,76	0,354	0,390	19,7	1 210	861	0,72
1 000	0,384	0,0738	55,1	250	180	0,72	0,364	0,0619	45,8	222	171	0,78	0,364	0,446	21,8	1 600	1 130	0,71
1 200	0,390	0,0818	59,8	317	226	0,72	0,372	0,0671	49,8	273	215	0,79	0,372	0,499	23,5	2 030	1 415	0,70
Oxyde de carbone CO, $\gamma_0 = 1,250$ (kg/Nm ³)						Vapeur d'eau H ₂ O, $\gamma_0 = 0,804$ (kg/Nm ³)						Gaz carbonique CO ₂ , $\gamma_0 = 1,977$ (kg/Nm ³)						
0	0,311	0,0198	16,6	17,9	13,3	0,75	0,356	0,0150	8,9	11,8	11,1	0,95	0,387	0,0128	13,8	9,24	7,0	0,76
200	0,317	0,0314	24,6	48,1	34,8	0,73	0,371	0,0288	16,7	37,5	36,0	0,97	0,471	0,0271	23,1	27,7	20,2	0,73
400	0,330	0,0415	31	86,8	61,1	0,71	0,395	0,0454	24	79,2	73,5	0,94	0,530	0,0399	30,8	49,8	38,3	0,77
600	0,346	0,0502	36,4	130	93,3	0,72	0,420	0,0642	30,8	137	122	0,90	0,567	0,0507	37,6	80	60,8	0,77
800	0,359	0,0585	41,2	159	130	0,73	0,448	0,0828	37,2	203	182	0,90	0,593	0,0605	43,7	112	86,8	0,78
1 000	0,368	0,0664	45,5	255	170	0,73	0,473	0,1026	43,1	283	249	0,89	0,610	0,0691	49,1	148	116	0,79
1 200	0,375	0,0757	49,2	302	213	0,71	0,495	0,120	48,6	367	325	0,89	0,622	0,0765	54	186	148	0,80
Méthane CH ₄ , $\gamma_0 = 0,717$ (kg/Nm ³)						Gaz de fours à coke $\gamma_0 = 0,530$ (kg/Nm ³)						Gaz de hauts fourneaux $\gamma_0 = 1,520$ (kg/Nm ³)						
0	0,372	0,0261	10,2	19,6	14,2	0,73	0,330	0,041	13,2	34,7	25,0	0,73	0,320	0,0206	17,2	18,2	13,0	0,72
200	0,480	0,0542	16	54,9	38,7	0,71	0,370	0,072	20,8	94,4	68	0,73	0,335	0,0332	26,5	49,6	34,8	0,73
400	0,603	0,0853	20,6	90,4	71	0,73	0,410	0,101	26,4	170	123	0,73	0,353	0,0430	32,6	84	60,8	0,73
600	0,710	0,120	23,5	151	105	0,70	0,447	0,128	30,5	256	184	0,73	0,371	0,0525	38	127	92	0,73
800	0,797	0,159	28,1	220	154	0,71	0,479	0,155	34,5	355	255	0,73	0,386	0,0610	42,4	173	126	0,73
1 000	0,862	0,200	31,3	302	204	0,68	0,505	0,179	37,8	462	333	0,73	0,397	0,0681	45,9	224	162	0,73
1 200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,405	0,0750	49,6	280	203	0,73
Air $\gamma_0 = 1,293$ (kg/Nm ³)						Fumées de gaz de fours à coke $\gamma_0 = 1,213$ (kg/Nm ³)						Fumées de gaz de hauts fourneaux $\gamma_0 = 1,481$ (kg/Nm ³)						
0	0,311	0,0207	17,1	18,5	13,2	0,71	0,327	0,0184	14,6	15,7	12,1	0,78	0,332	0,0181	15,8	15,4	11,0	0,72
200	0,316	0,0318	25,8	48,7	34,5	0,71	0,340	0,0304	23,2	43,4	33,2	0,77	0,354	0,0302	24,7	41,4	30,0	0,73
400	0,330	0,0420	32,8	87,6	62,4	0,72	0,358	0,0421	30,6	81,2	62,4	0,77	0,380	0,0406	31	73,6	53,3	0,73
600	0,344	0,0518	38,6	135	95,5	0,72	0,377	0,0519	35,8	123	94,5	0,77	0,401	0,0495	35,8	111	80	0,73
800	0,357	0,0601	43,9	186	133	0,72	0,395	0,0617	40,6	172	132	0,77	0,417	0,0579	40,2	152	110	0,73
1 000	0,366	0,0677	48,5	241	175	0,73	0,409	0,0700	44,4	223	171	0,77	0,429	0,0641	43,5	195	142	0,73
1 200	0,374	0,0757	52,8	303	226	0,75	0,420	0,0774	47,8	279	213	0,77	0,439	0,0701	46,5	242	175	0,73

2.161.20

TABLEAU 63. — Émissivité
en fonction de la température et du produit $p_r e$

$p_r e$	Température									
	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100
$1 \cdot 10^{-3}$	1,51	1,51	1,50	1,47	1,41	1,31	1,21	1,10	0,99	0,89
1,2	1,75	1,75	1,74	1,71	1,64	1,53	1,41	1,29	1,17	1,03
1,5	2,01	2,00	1,99	1,98	1,95	1,84	1,71	1,55	1,41	1,27
2	2,35	2,35	2,36	2,37	2,37	2,30	2,14	1,95	1,76	1,59
3	2,91	2,88	2,89	2,96	2,97	2,89	2,72	2,51	2,29	2,06
4	3,29	3,27	3,32	3,40	3,43	3,36	3,18	2,94	2,69	2,44
6	3,96	3,88	3,97	4,17	4,25	4,16	3,95	3,67	3,38	3,11
$8 \cdot 10^{-3}$	4,46	4,38	4,51	4,72	4,82	4,76	4,58	4,29	3,97	3,63
$1 \cdot 10^{-2}$	4,83	4,79	4,97	5,24	5,33	5,26	5,10	4,79	4,41	4,04
1,2	5,17	5,12	5,40	5,67	5,77	5,72	5,51	5,18	4,78	4,39
1,5	5,66	5,57	5,82	6,13	6,30	6,25	6,00	5,63	5,22	4,81
2	6,17	6,15	6,32	6,66	6,96	6,82	6,69	6,30	5,88	5,42
3	6,99	6,99	7,40	7,76	7,90	7,88	7,68	7,26	6,78	6,30
4	7,61	7,62	8,03	8,36	8,50	8,50	8,35	7,90	7,40	6,90
6	8,64	8,65	9,06	9,47	9,64	9,65	9,53	9,17	8,64	8,04
$8 \cdot 10^{-2}$	9,32	9,32	9,72	10,15	10,39	10,46	10,36	9,96	9,42	8,96
0,1	9,83	9,93	10,32	10,70	11,00	11,15	11,14	10,88	10,26	9,62
0,12	10,55	10,38	10,60	11,10	11,67	11,90	11,90	11,56	10,98	10,40
0,15	11,20	11,02	11,29	11,82	12,25	12,48	12,53	12,33	11,79	11,02
0,2	12,08	11,80	12,08	12,68	13,13	13,44	13,61	13,42	12,91	12,12
0,3	13,07	12,91	13,30	13,96	14,48	14,77	14,90	14,80	14,47	13,91
0,4	13,90	13,70	14,17	15,0	15,6	16,0	16,2	16,2	15,8	15,1
0,6	15,3	15,0	15,6	16,5	17,4	17,9	18,1	17,9	17,5	16,8
0,8	16,0	15,8	16,5	17,4	18,4	19,0	19,4	19,3	18,9	18,2
1,0	16,6	16,5	17,3	18,1	19,1	19,8	20,4	20,4	20,0	19,3
$\Phi_{em}/100$	24,8	53,5	101,8	177,1	288	445	658	939	1 303	1 763

du CO_2 exprimée en $100 \varepsilon_r$
(p_c nombre < 1) Φ_{em} (kcal/m² · h) e (m)

du gaz (°C)										
1 200	1 300	1 400	1 500	1 600	1 700	1 800	1 900	2 000	2 100	2 200
0,79	0,70	0,62	0,55	0,49	0,43	0,39	0,35	0,31	0,27	0,24
0,93	0,84	0,75	0,67	0,59	0,53	0,46	0,41	0,36	0,31	0,28
1,13	1,01	0,90	0,80	0,71	0,63	0,56	0,49	0,43	0,38	0,33
1,43	1,28	1,14	1,01	0,90	0,80	0,72	0,64	0,57	0,50	0,45
1,86	1,67	1,50	1,35	1,21	1,09	0,97	0,86	0,77	0,69	0,62
2,21	2,00	1,79	1,62	1,45	1,30	1,16	1,03	0,92	0,82	0,73
2,81	2,54	2,30	2,08	1,86	1,67	1,48	1,33	1,19	1,06	0,95
3,31	3,00	2,70	2,45	2,22	2,00	1,80	1,61	1,44	1,28	1,13
3,69	3,34	3,04	2,76	2,50	2,25	2,03	1,83	1,64	1,47	1,31
3,99	3,63	3,31	3,00	2,71	2,44	2,19	2,00	1,77	1,61	1,44
4,40	4,01	3,66	3,33	3,03	2,75	2,50	2,26	2,03	1,83	1,65
5,03	4,63	4,24	3,86	3,49	3,15	2,85	2,58	2,34	2,12	1,91
5,83	5,35	4,89	4,47	4,09	3,72	3,40	3,10	2,82	2,57	2,33
6,39	5,84	5,38	4,95	4,54	4,15	3,80	3,48	3,19	2,92	2,65
7,47	6,92	6,42	5,88	5,41	4,97	4,56	4,19	3,85	3,53	3,23
8,25	7,64	7,10	6,63	6,13	5,62	5,16	4,75	4,37	4,01	3,68
8,97	8,33	7,74	7,19	6,66	6,14	5,64	5,21	4,80	4,43	4,07
9,73	9,00	8,32	7,72	7,15	6,60	6,08	5,58	5,14	4,75	4,36
10,34	9,65	8,99	8,32	7,70	7,12	6,57	6,07	5,62	5,18	4,76
11,38	10,68	9,98	9,33	8,68	7,99	7,39	6,80	6,28	5,79	5,33
13,15	12,31	11,55	10,77	10,03	9,30	8,61	7,97	7,35	6,80	6,25
14,24	13,42	12,57	11,78	10,97	10,18	9,40	8,73	8,07	7,46	6,90
15,9	15,1	14,15	13,30	12,42	11,56	10,80	10,07	9,38	8,68	8,03
17,4	16,4	15,5	14,50	13,53	12,62	11,77	10,95	10,20	9,45	8,75
18,5	17,5	16,5	15,5	14,50	13,53	12,60	11,72	10,90	10,11	9,40
2 335	3 037	3 887	4 901	6 104	7 516	9 160	11 060	13 240	15 730	18 550

TABLEAU 64. — Émissivité de la
en fonction de la température et du produit $p_v e$

$p_v e$	Température									
	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100
$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,93	0,82	0,68	0,56	0,46	0,38	0,31	0,26	0,21	0,17
1,2	1,10	0,94	0,78	0,65	0,54	0,45	0,37	0,31	0,26	0,21
1,5	1,28	1,07	0,90	0,76	0,64	0,54	0,45	0,38	0,32	0,27
2	1,61	1,36	1,15	0,98	0,83	0,70	0,59	0,50	0,43	0,36
3	2,20	1,88	1,61	1,38	1,18	1,01	0,86	0,74	0,63	0,54
4	2,71	2,35	2,02	1,73	1,48	1,27	1,08	0,93	0,79	0,68
6	3,62	3,15	2,76	2,43	2,08	1,78	1,52	1,30	1,12	0,95
$8 \cdot 10^{-3}$	4,42	3,89	3,43	3,00	2,61	2,27	1,97	1,71	1,48	1,29
$1,0 \cdot 10^{-2}$	5,03	4,48	3,95	3,50	3,06	2,66	2,32	2,02	1,76	1,53
1,2	5,78	5,14	4,58	4,06	3,61	3,16	2,76	2,42	2,11	1,85
1,5	6,65	5,91	5,29	4,75	4,28	3,77	3,31	2,91	2,56	2,25
2	7,93	7,10	6,42	5,81	5,30	4,70	4,16	3,68	3,26	2,89
3	9,98	9,08	8,30	7,57	6,89	6,16	5,51	4,92	4,40	3,94
4	11,60	10,64	9,82	9,02	8,25	7,53	6,68	6,01	5,40	4,86
6	14,50	13,50	12,05	11,56	10,61	9,65	8,77	7,97	7,24	6,60
$8 \cdot 10^{-2}$	16,7	15,6	14,68	13,70	12,65	11,57	10,57	9,67	8,84	8,08
0,1	18,4	17,3	16,4	15,5	14,36	13,18	12,10	11,11	10,20	9,36
0,12	20,2	19,0	18,0	17,0	15,8	14,55	13,42	12,37	11,41	10,51
0,15	22,1	21,0	20,3	19,0	17,8	16,4	15,2	14,08	13,03	12,06
0,2	24,9	23,8	22,8	21,6	20,3	18,8	17,5	16,3	15,1	14,07
0,3	28,8	27,7	26,7	25,6	24,1	22,5	21,1	19,7	18,4	17,2
0,4	32,0	30,9	29,9	28,7	27,1	25,4	23,8	22,3	20,9	19,6
0,6	36,4	35,6	34,7	33,6	32,1	30,5	28,6	26,9	25,3	23,8
0,8	39,5	38,7	37,9	36,9	35,5	33,6	31,7	29,8	28,1	26,5
1,0	42,5	41,5	40,6	39,0	37,7	35,2	34,6	32,6	30,8	29,0
$\Phi_{v,100}$	24,8	53,5	101,8	177,1	288	445	658	939	1 303	1 763

vapeur d'eau exprimée en $100 \epsilon_0$
(p_v nombre < 1) e (m) et $\Phi_{v,100}$ (kcal/m² · h)

de 202 (°C)										
1 200	1 300	1 400	1 500	1 600	1 700	1 800	1 900	2 000	2 100	2 200
0,14	0,12	0,096	0,079	0,065	0,053	0,044	0,036	0,030	0,025	0,020
0,18	0,15	0,12	0,108	0,084	0,069	0,058	0,048	0,040	0,033	0,027
0,23	0,19	0,16	0,134	0,113	0,095	0,080	0,067	0,056	0,048	0,040
0,31	0,26	0,22	0,185	0,157	0,133	0,112	0,095	0,080	0,068	0,058
0,46	0,40	0,34	0,29	0,25	0,212	0,181	0,155	0,133	0,114	0,097
0,58	0,50	0,43	0,37	0,31	0,27	0,23	0,197	0,168	0,144	0,123
0,82	0,70	0,60	0,51	0,44	0,37	0,32	0,27	0,23	0,20	0,172
1,12	0,97	0,84	0,73	0,63	0,55	0,48	0,41	0,36	0,31	0,27
1,53	1,16	1,01	0,88	0,77	0,67	0,58	0,51	0,44	0,38	0,33
1,62	1,42	1,24	1,09	0,95	0,83	0,73	0,64	0,56	0,49	0,43
1,98	1,74	1,53	1,35	1,19	1,04	0,92	0,81	0,71	0,63	0,55
2,56	2,27	2,01	1,78	1,58	1,40	1,24	1,10	0,97	0,86	0,76
3,52	3,14	2,81	2,51	2,25	2,01	1,80	1,61	1,43	1,28	1,15
4,37	3,93	3,54	3,18	2,86	2,57	2,32	2,08	1,87	1,69	1,52
5,98	5,44	4,94	4,49	4,08	3,71	3,37	3,07	2,79	2,53	2,30
7,38	6,75	6,17	5,64	5,15	4,71	4,31	3,94	3,60	3,29	3,01
8,60	7,89	7,25	6,66	6,11	5,61	5,15	4,73	4,34	3,99	3,66
9,69	8,94	8,24	7,60	7,00	6,46	5,95	5,49	5,06	4,66	4,30
11,16	10,32	9,55	8,84	8,18	7,57	7,00	6,48	6,00	5,55	5,13
13,09	12,17	11,31	10,52	9,78	9,10	8,46	7,86	7,31	6,80	6,32
16,0	14,96	13,97	13,04	12,18	11,37	10,62	9,92	9,26	8,65	8,08
18,4	17,2	16,2	15,2	14,20	13,31	12,48	11,70	10,94	10,28	9,63
22,5	21,1	19,9	18,8	17,7	16,6	15,7	14,74	13,88	13,07	12,31
24,9	23,5	22,1	20,8	19,6	18,5	17,4	16,4	15,5	14,58	13,73
27,3	25,8	24,3	22,9	21,6	20,4	19,2	18,1	17,1	16,1	15,2
2 335	3 037	3 887	4 901	6 104	7 516	9 160	11 060	13 240	15 730	18 550

Tableau 1-6
Enthalpie et volume massique de la vapeur saturée
et de la vapeur surchauffée
(extrait des tables VDI, 5ème édition 1963, avec autorisation)

Table with multiple columns: Pressure (p), Temperature (t), Enthalpy (h), Specific Volume (v), and various other thermodynamic properties for saturated and superheated steam. The table is organized into sections for saturated steam and superheated steam at different pressure levels.

Tableau 6-39
Viscosité dynamique μ et conductivité thermique λ_f
de l'eau et de la vapeur
à l'état saturé en fonction de la pression

Pression (bar)	Température (°C)	Eau	
		μ (10^{-3} P1)	λ_f (10^{-2} W/m. °C)
0,01	8,970	142,9	56,0
0,05	32,90	74,0	62,2
0,1	45,84	58,9	64,1
0,5	81,35	35,11	67,5
1,0	99,83	28,44	68,3
10,0	179,88	15,27	67,4
20,0	212,37	12,87	65,3
30,0	233,84	11,70	63,4
40,0	250,33	10,90	61,6
50,0	263,92	10,25	59,9
60,0	275,58	9,78	58,2
80,0	294,98	9,08	55,0
100,0	310,98	8,55	52,0
140,0	336,83	7,87	46,6
180,0	358,98	6,83	40,6
200,0	365,71	6,14	36,6
220,0	373,7	4,8	28,9

Pression (bar)	Température (°C)	Vapeur	
		μ (10^{-5} P1)	λ_f (10^{-2} W/m. °C)
0,01	8,970	0,84	1,43
0,05	32,90	0,94	1,61
0,1	45,84	0,99	1,72
0,5	81,35	1,13	2,02
1,0	99,83	1,20	2,10
10,0	179,88	1,53	3,36
20,0	212,37	1,67	3,39
30,0	233,84	1,78	4,50
40,0	250,33	1,86	4,96
50,0	263,92	1,93	5,50
60,0	275,58	1,99	5,99
80,0	294,98	2,11	7,11
100,0	310,98	2,23	8,37
140,0	336,83	2,47	11,30
180,0	358,98	2,82	15,89
200,0	365,71	3,12	18,7
220,0	373,7	4,5	24,3

Tableau 6-40
Viscosité dynamique μ (10^{-3} Pl) et conductivité thermique λ_f (10^{-2} W/m, °C)
de l'eau et de la vapeur surchauffée
en fonction de la pression et de la température

Température (°C)	P = 1 bar		P = 50 bars		P = 100 bars		P = 200 bars	
	μ	λ_f	μ	λ_f	μ	λ_f	μ	λ_f
0	178,7	55,2	177,7	55,4	178,8	55,8	174,8	58,0
10	130,5	59,7	130,1	57,8	129,7	58,0	128,0	58,0
20	100,4	59,9	100,3	60,1	100,2	60,1	100,1	60,8
30	80,1	61,8	80,1	62,0	80,1	62,3	80,0	62,8
40	65,3	63,4	65,3	63,8	65,3	64,0	65,1	64,4
50	55,0	64,9	55,0	65,1	55,0	65,4	55,1	65,9
60	47,0	65,9	47,1	66,1	47,2	66,5	47,3	67,0
70	40,7	66,6	40,7	67,0	40,8	67,3	40,9	67,6
80	35,5	67,5	35,6	67,8	35,7	68,0	35,9	68,5
90	31,5	68,0	31,6	68,2	31,7	68,5	31,9	69,0
100	28,5	68,4	28,4	68,5	28,5	68,5	28,7	69,5
110	1,24	2,27	28,0	68,0	28,1	69,2	28,3	69,8
120	1,27	2,38	23,9	69,0	24,0	69,3	24,2	70,0
130	1,31	2,50	21,9	69,1	22,0	69,4	22,2	70,1
140	1,35	2,62	20,2	69,0	20,3	69,3	20,6	70,1
150	1,38	2,74	18,6	68,9	18,8	69,2	19,1	70,0
160	1,43	2,86	17,5	68,8	17,6	69,0	17,9	69,8
170	1,47	2,99	16,4	68,3	16,5	68,7	16,8	69,5
180	1,52	3,12	15,4	67,9	15,5	68,3	15,7	69,1
200	1,60	3,37	13,7	66,7	13,8	67,2	14,0	68,1
220	1,68	3,60	12,5	65,2	12,6	65,7	12,8	66,8
240	1,76	3,83	11,4	63,2	11,5	63,7	11,7	64,0
260	1,84	4,06	10,4	60,5	10,6	61,2	10,7	62,5
280	1,93	4,26	1,99	5,50	9,88	58,2	9,92	59,7
300	2,01	4,42	2,07	5,61	8,95	54,0	9,14	56,4
310	2,05	4,52	2,11	5,66	8,59	52,4	8,84	54,4
320	2,09	4,63	2,15	5,70	2,26	7,72	8,50	52,4
340	2,18	4,85	2,23	5,81	2,33	7,15	7,77	48,1
360	2,28	5,12	2,31	5,84	2,40	7,03	6,80	42,7
380	2,34	5,40	2,40	6,10	2,46	7,09	2,87	12,9
400	2,43	5,84	2,47	6,32	2,54	7,11	2,83	10,6
420	2,51	5,88	2,55	6,46	2,61	7,20	2,64	9,68
440	2,59	6,10	2,63	6,64	2,69	7,34	2,68	9,10
460	2,67	6,34	2,71	6,86	2,75	7,50	2,94	9,24
480	2,75	6,60	2,78	7,09	2,84	7,66	3,01	9,22
500	2,84	6,88	2,87	7,33	2,92	7,86	3,09	8,28

Nota : Les chiffres en italique représentent les paliers de saturation.

ANNEXE III

CALCULS ET TABLEAUX DE LA CONCEPTION

CALCUL DE LA TEMPERATURE METALE POUR DIFFERENTS DEDITS DE VAPEUR

Surchauffeur II

$t_{vs} = 505^{\circ}\text{C}$

$Kl = 1853 \text{ kcal/h.m}^{\circ}\text{C}$

$Ke = 78.673 \text{ kcal/h.m}^{\circ}\text{C}$

$t_{ge} = 1030^{\circ}\text{C}$

$d_i = 0.050 \text{ m}$

$d_e = 0.060 \text{ m}$

$P_v = 70 \text{ bars}$

$t_{ve} = 420^{\circ}\text{C}$

$S = 160 \text{ m}^2$

m	Q	Ql	T_{pv}	T_{pg}	T_p
110	5564133.	34775.83	529.1442	587.9698	558.5570
111	5814716.	35091.98	529.1880	583.9514	556.5697
112	5665299.	35408.12	529.2314	579.9329	554.5922
113	5715882.	35724.26	529.2745	575.9145	552.5945
114	5766465.	36040.41	529.3173	571.8960	550.6067
115	5817048.	36356.55	529.3598	567.8775	548.6187
116	5867632.	36672.70	529.4021	563.8591	546.6308
117	5918215.	36988.84	529.4440	559.8406	544.6423
118	5968798.	37304.98	529.4856	555.8222	542.6539
119	6019381.	37621.13	529.5270	551.8037	540.6654
120	6069964.	37937.27	529.5681	547.7853	538.6767
121	6120547.	38253.41	529.6089	543.7668	536.6878
122	6171130.	38569.56	529.6494	539.7484	534.6989
123	6221713.	38885.70	529.6897	535.7299	532.7098
124	6272296.	39201.85	529.7297	531.7114	530.7206

LEGENDE: m = Débit de vapeur (t/h)

Q = Quantité de chaleur totale échangée (Kcal/h)

Ql = Flux de chaleur par unité de surface (Kcal/h.m²)

T_p = Température - métale ($^{\circ}\text{C}$)

CALCUL DE LA TEMPERATURE-METALE POUR DIFFERENTS DEBITS DE VAPEUR

Surchauffeur I

$t_{vs} = 450^{\circ}\text{C}$

$KI = 1633 \text{ kcal/h.m}^2\text{C}$

$Ke = 71.779 \text{ kcal/h.m}^2\text{C}$

$t_{ge} = 930^{\circ}\text{C}$

$di = 0.050 \text{ m}$

$de = 0.060 \text{ m}$

$P_v = 70 \text{ bars}$

$t_{ve} = 285.8^{\circ}\text{C}$

$S = 504 \text{ m}^2$

m	Q	QI	Tpv	Tpg	Tp
110	14212165	28198.74	472.2154	537.1449	504.6802
111	14341367	28455.09	472.2557	533.5735	502.9146
112	14470568	28711.44	472.2956	530.0021	501.1489
113	14599770	28967.79	472.3353	526.4307	499.3830
114	14728971	29224.15	472.3747	522.8593	497.6170
115	14858173	29480.50	472.4138	519.2879	495.8508
116	14987374	29736.85	472.4527	515.7165	494.0846
117	15116576	29993.20	472.4912	512.1451	492.3181
118	15245777	30249.55	472.5298	508.5736	490.5516
119	15374979	30505.91	472.5676	505.0022	488.7849
120	15504180	30762.26	472.6054	501.4308	487.0181
121	15633382	31018.61	472.6430	497.8594	485.2512
122	15762583	31274.96	472.6803	494.2880	483.4841
123	15891785	31531.31	472.7173	490.7166	481.7170
124	16020986	31787.67	472.7541	487.1452	479.9497

LEGENDE: m = Débit de vapeur (t/h)

Q = Quantité de chaleur totale échangée (Kcal/h)

QI = Flux de chaleur par unité de surface (Kcal/h.m²)

Tp = Température - métal (°C)

CALCUL DE LA TEMPERATURE-METALE EN FONCTION DE LA PRESSION DE VAPEUR :

Surchauffeur II

$t_{vs} = 505^{\circ}\text{C}$ $Kl = 1853 \text{ kcal/h.m}^2\text{C}$ $Ke = 78.673 \text{ kcal/h.m}^2\text{C}$
 $t_{ge} = 1030^{\circ}\text{C}$ $di = 0.050 \text{ m}$ $de = 0.060 \text{ m}$
 $m = 120 \text{ t/h}$ $t_{ve} = 420^{\circ}\text{C}$ $S = 160 \text{ m}^2$

Pv	Q	Ql	TPv	TPg	TP
60	5908243.	36928.52	528.9135	560.6328	544.7731
65	5988817.	37430.10	529.2396	554.2318	541.7357
70	6069964.	37937.27	529.5661	547.7853	538.6767
75	8154265.	38464.15	529.9093	541.0882	535.4987
80	6242867.	39017.92	530.2679	534.0494	532.1586
85	6333763.	39586.02	530.6358	526.8283	528.7321

Surchauffeur I

$t_{vs} = 450^{\circ}\text{C}$ $Kl = 11633 \text{ kcal/h.m}^2\text{C}$ $Ke = 71.779 \text{ kcal/h.m}^2\text{C}$
 $t_{ge} = 930^{\circ}\text{C}$ $di = 0.050 \text{ m}$ $de = 0.060 \text{ m}$
 $m = 120 \text{ t/h}$ $t_{ve} = 285.8^{\circ}\text{C}$ $S = 504 \text{ m}^2$

Pv	Q	Ql	TPv	TPg	TP
60	15736774	31223.75	472.9445	495.0014	483.9730
65	15691469	31133.86	472.8785	496.2538	484.5681
70	15661382	31074.13	472.8346	497.0860	484.9803
75	15636989	31025.77	472.7990	497.7597	485.2794
80	15618924	30989.93	472.7727	498.2591	485.5159
85	15609462	30971.15	472.7589	498.5206	485.6398

LEGENDE: m = Débit de vapeur (t/h)

Q = Quantité de chaleur totale échangée (Kcal/h)

Ql = Flux de chaleur par unité de surface (Kcal/h.m²)

TP = Température - métale (°C)

Pv = pression moyenne de la vapeur

-----CALCUL DU SURCHAUFFEUR PENDENTIF 2-----

valeurs a fixer a priori
ou obtenues apres chaque iteration

constantes

$di := 50 \cdot 10^{-3}$
 $tpg := 540$
 $tpv := 529$
 $tge := 1030$

$pi := 70$
 $FS := 2.5$
 $tve := 120$
 $y := 0.7$
 $tvs := 505$
 $tgs := 930$

-----a) Calcul des tubes-----

$$tp := \frac{tpg + tpv}{2} \quad tp = 534.5$$

l'acier choisi 10CD9-10

$tp = 534.5$

calcul de i , de sr et de sc

$t_i :=$	100	200	300	400	500	600	$i :=$	37	36	35	33.5	31.5	29	$ts :=$	500	525	550	575	600	$sci :=$	930	740	590	420	250	$sri :=$	1420	1030	810	590	390
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	--------	----	----	----	------	------	----	---------	-----	-----	-----	-----	-----	----------	-----	-----	-----	-----	-----	----------	------	------	-----	-----	-----

$p := i \cdot 0.86$

$ve := \text{linterp}(t_i, p, tp)$

$sr := \text{linterp}(ts, sri, tp)$

$sc := \text{linterp}(ts, sci, tp)$

calcul de e et de

$ve := \begin{cases} sr \\ FS \\ sc \end{cases}$

$f := \min(ve)$

$$c := \frac{pi}{2 \cdot (f + pi \cdot y - pi)}$$

$e := c \cdot di$

$e = 0.005$

$= 5.383 \cdot 10^{-3}$

$de := di + 2 \cdot e$

$de = 0.06$

e

-----b) calcul de kg-----

$$tgm := \frac{tge + tgs}{2} \quad pga := 0.46 \text{ de} \quad pva := 0.35 \text{ de}$$

determination d'

$$tgm = 980 \quad pga = 0.028 \quad pva = 0.021$$

$$bc := 5.84 \cdot 10^{-2} \quad dv := 2.84 \cdot 10^{-2}$$

$$Tgm := tgm + 273 \quad Tpg := tpg + 273$$

$$bc := 3.968 \cdot bc \cdot Tgm \frac{.65 \cdot Tgm \cdot 3.35 - Tpg \cdot 3.35}{100}$$

$$dv := 3.968 \cdot dv \frac{Tgm^4 - Tpg^4}{100}$$

$$kg := \frac{bc + dv}{tgm - tpg}$$

$$kg = 15.128$$

----- c) Calcul de kbg-----

$t_{gm} + t_p$
 $t_m := 2$ $t_m = 757.25$ $T_m := t_m + 273$

-----"Determination des caracteristiques des gaz par interpolation-----

	200	23.1	.73	.0271
	400	30.8	.77	.0399
	600	37.6	.77	.0507
$t_{mi} :=$	800	43.7	$pr_{ci} := .78$	$ci := .0605$
	1000	49.1	.79	.0691
	1200	54	.80	.0765
		16.7	.97	.0288
		24	.94	.0454
		30.8	.90	.0642
	$\phi_{hi} :=$	37.2	$pr_{hi} := .90$	$hi := .0828$
		43.1	.89	.1026
		48.6	.89	.120
		24.7	.71	.0314
		31.2	.72	.0408
		36.7	.74	.0488
	$\eta_{ni} :=$	41.5	$pr_{ni} := .76$	$\eta_i := .0558$
		45.8	.78	.0619
		49.8	.79	.0671

$\rho_{cl} := \rho_{ci} \cdot 10^{-6}$ $\rho_{hl} := \rho_{hi} \cdot 10^{-6}$ $\rho_{nl} := \rho_{ni} \cdot 10^{-6}$

$\rho_c := \text{linterp}(t_{mi}, \rho_{cl}, t_m)$ $\rho_{pc} := \text{linterp}(t_{mi}, \rho_{pci}, t_m)$

$\rho_h := \text{linterp}(t_{mi}, \rho_{hl}, t_m)$ $\rho_{ph} := \text{linterp}(t_{mi}, \rho_{phi}, t_m)$

$\rho_n := \text{linterp}(t_{mi}, \rho_{nl}, t_m)$ $\rho_{pn} := \text{linterp}(t_{mi}, \rho_{pni}, t_m)$

$c := 1.977$

$c := \text{linterp}(t_{mi}, c_i, t_m)$

$h := .804$

$h := \text{linterp}(t_{mi}, h_i, t_m)$

$n := \text{linterp}(t_{mi}, n_i, t_m)$

$n := 1.250$


```

pg := .145 pc + .11 ph + .745 pn
prg := .145 ppc + .11 prh + .745 prn
pg := .145 pc + .11 ph + .745 pn
pg := .145 pc + .11 ph + .745 pn

```

g = 3.757 10⁻⁵
prg = 0.766
g = 0.053
g = 1.306

-----fin de la determination des caracteristiques a tm-----

```

w := 4
Re := g w de
Re = 8.345 103

```

```

kgb := g .6 .3
      .33 Re prg
      de

```

kgb = 60.767

-----d) calcul de ki-----

```

      tve + tvs
      tpv +
      2
tf := -----
      2
      tf = 418.95
      tf + 273
      :=
      100

```

-----determination des caracteristiques-----

```

epv := 55.56 143.05 - 183.54 .25 + 82.751 .5 - 3.6980

```

vtvl :=	320	2.19	6.51	300	33.98
	340	2.27	6.35	350	28.34
	360	2.35	6.38	400	25.02
	380	2.42	6.48	450	22.65
	400	2.50	6.64	500	20.79
	420	2.57	6.76	550	19.27
	440	2.65	6.92	600	18.00
	460	2.73	7.12	650	16.90
	480	2.80	7.32		
	500	2.90	7.54		
	520	2.97	7.75		

v v := v v := vtv2 := v2 :=

$$v_1 := v \cdot v \cdot 10^{-5} \quad v_1 := v \cdot v \cdot 10^{-2}$$

$$v := \text{linterp}(v_{t1}, v_1, t_f)$$

$$v := \text{linterp}(v_{t1}, v_1, t_f)$$

$$v := \text{linterp}(v_{t2}, v_2, t_f)$$

v := 23 -----fin de la determination des caracteristiques de H2O--

$$k_i := 0.01978 \cdot v^{.8} \cdot \text{epv} \cdot v^{.4}$$

$$k_i = 1.633 \cdot 10^3$$

----- e) calcul de k -----

$$k_e := k_g + k_{bg} \quad k_e = 71.779$$

$$k := \frac{1}{\frac{1}{k_e} + \frac{1}{k_i} + \frac{1}{e \cdot \ln \left(\frac{d_e}{d_i} \right)}}$$

$$k = 67.769$$

----- f) calcul de td -----

$$t_d := \frac{(t_{ge} - t_{vs}) - (t_{gs} - t_{ve})}{\ln \left(\frac{t_{ge} - t_{vs}}{t_{gs} - t_{ve}} \right)}$$

$$t_d = 454.127$$

---- g) calcul de d_1 et verification des valeurs a priori-----

$$d_1 := k \cdot t_d$$

$$tpv := tvs + \frac{d_1 \cdot de}{ki \cdot di}$$

$$1 = 3.078 \cdot 10^4$$

$$tpg := tge - \frac{de}{ke}$$

$$tpv = 472.613$$

$$tpg = 501.241$$

$$tp := \frac{tpg + tpv}{2}$$

$$tp = 486.927$$

ANNEXE IV

CALCULS DES SURCHAUFFEURS

HORIZONTALS

Verification des temperatures de metal aux points critiques

1-Surchauffeur N 1

valeurs a fixer a priori
et obtenues apres iterations

constantes

	$\pi := 70$	$d_e := 51 \cdot 10^{-3}$
$tpg := 705$	$t_{ge} := 1340$	$\alpha := 3.6 \cdot 10^{-3}$
$tpv := 367$	$t_{ve} := 283.8$	$d_i := 43.8 \cdot 10^{-3}$
$tgs := 690$	$t_{vs} := 354$	$m_v := 130$
	$Q := 8008.99 \cdot 10^3$	$n := 17$
		$s := 189.8$

--1) calcul du flux -----> $\dot{q} := \frac{Q}{s} = 4.22 \cdot 10^4$

-----2) conduction des tubes-----

$tp := \frac{tpg + tpv}{2} = 536$

acier utilise 15CD2-05

$tp = 536$

calcul de λ

$t :=$	$\left[\begin{array}{l} 100 \\ 200 \\ 300 \\ 400 \\ 500 \\ 600 \end{array} \right]$	$i :=$	$\left[\begin{array}{l} 43 \\ 42 \\ 40.5 \\ 38.5 \\ 36 \\ 33.5 \end{array} \right]$
--------	--	--------	--

$\rho := i \cdot 86$

$\lambda := \text{interp}(t, \rho, tp)$

$\lambda = 8.385 \cdot 10^3$

-----3) calcul de kg _____

$$tgm := \frac{tge + tgs}{2} \quad pca := 0.145 \cdot 0.9 \text{ de} \quad pva := 0.11 \cdot 0.9 \text{ de}$$

determination d'

$$tgm = 1.015 \cdot 10^3 \quad pca = 0.007 \quad pva = 0.005$$

$$pe := 5.50 \cdot 10^{-2} \quad v := 1.5 \cdot 10^{-2}$$

$$Tgm := tgm + 273 \quad Tpg := tpg + 273$$

$$pe := 3.968 \cdot \frac{pe \cdot Tgm^{3.35} - pc \cdot Tpg^{3.35}}{Tgm^4 - Tpg^4} \cdot 100$$

$$pv := 3.968 \cdot \frac{pv \cdot Tgm^4 - pc \cdot Tpg^4}{Tgm^4 - Tpg^4} \cdot 100$$

$$kg := \frac{pe + pv}{tgm - tpg}$$

$$kg = 15.199$$

-----4) calcul de kbg-----

tgm + tp
tm := 2 tm = 775.5 Tm := tm + 273

*****interpolation des caracteristiques des gaz a tm*****

tmi :=	200	uci :=	23.1	pci :=	.73	ci :=	.0271
	400		30.8		.77		.0399
	600		37.6		.77		.0507
	800		43.7		.78		.0605
	1000		49.1		.79		.0691
	1200		54		.80		.0765

			16.7		.97		.0288
			24		.94		.0454
			30.8		.90		.0642
	phi :=		37.2	phi :=	.90	hi :=	.0820
			43.1		.89		.1026
			48.6		.89		.120

			24.7		.71		.0311
			31.2		.72		.0408
			36.7		.74		.0480
	ni :=		41.5	pni :=	.76	ni :=	.0558
			45.8		.78		.0619
			49.8		.79		.0671

uc1 := pci 10⁻⁶ phi1 := phi 10⁻⁶ pni1 := ni 10⁻⁶

uc := linterp(tmi,uc1,tm) pc := linterp(tmi,pci,tm)

ph := linterp(tmi,phi,tm) prh := linterp(tmi,prhi,tm)

pn := linterp(tmi,pni,tm) prn := linterp(tmi,prni,tm)

uc := linterp(tmi,uci,tm) uc := 1.977

ph := linterp(tmi,phi,tm) ph := .804

pn := linterp(tmi,ni,tm) pn := 1.250

ug := .145 uc + .11 ph + .745 pn g = 4.071 10⁻⁵

```

prg := .145 prc + .11 prh + .745 prn          prg = 0.779
kg := .145 c + .11 h + .745 n                g = 0.06
pg := .145 pc + .11 ph + .745 pn            g = 1.306

```

```

Vgm := 137000          g Vgm de          3
Regm := 3600 g 6.12          Regm = 7.61 10
Vgm = 4.76

```

*****fin de la recherche des caracteristiques des gaz*****

```

cl := 0.258          m := 0.623

```

```

m .33
Nug := 1.13 cl Regm prg

```

```

kg := Nug
de

```

```

kg = 82.745

```

-----calcul de ki-----

```

tpv + (tve + tvs) / 2
tf := (tpv + (tve + tvs) / 2) / 2          tf = 403
tf := (tf + 273) / 100

```

caracteristiques de la vapeur a tf*****

```

cpv := 55.56 [ 143.05 - 183.54 + 82.751 - 3.6989 ]

```

vtvl :=	320	2.19	6.51	300	33.98
	340	2.27	6.35	350	28.34
	360	2.35	6.38	400	25.02
	380	2.42	6.48	450	22.65
	400	2.50	6.64	500	20.75
vtvl :=	420	2.57	6.76	550	19.27
	440	2.65	6.92	600	18.00
	460	2.73	7.12	650	16.90
	480	2.80	7.32		
	500	2.90	7.54		
	520	2.97	7.75		

$v_{vl} := v \cdot v \cdot 10^{-5}$ $v_l := v \cdot v \cdot 10^{-2}$

$v := \text{linterp}(vtv1, v_l, tf)$

$v := \text{linterp}(vtv1, v_l, tf)$

$v := \text{linterp}(vtv2, v_2, tf)$ $v = 29.135$

*****fin de la recherche des caracteristiques de la vapeur*****

$s := \frac{d_i^2}{4} \cdot n$ $v := \frac{mv \cdot 1000}{3600 \cdot v \cdot s}$ $v = 48.388$

$ki := 0.86 \cdot 0.023 \cdot \left[\frac{v}{d_i} \right]^{.8} \cdot \left[\frac{v \cdot v \cdot d_i}{cpv \cdot v} \right]^{.4}$

$ki = 3.537 \cdot 10^3$

----- 6) calcul de K -----

$ke := kg + kbg$ $ke = 66.659$

$k := de^{-1} \cdot \left[(ke \cdot de)^{-1} + (ki \cdot di)^{-1} \right] \cdot e^{-1} \cdot \frac{de}{\ln \left(\frac{de}{di} \right)}$

$k = 64.685$

----- 7) calcul de td -----

$td := \frac{(tge - tvs) - (tgs - tve)}{\ln \left(\frac{tge - tvs}{tgs - tve} \right)}$

$td = 653.804$

-----8) calcul de ϵ_1 et verification des valeurs a priori-----

$$\epsilon_1 := k \cdot t_d \quad \epsilon_1 = 4.229 \cdot 10^4$$

$$t_{pv} := t_{vs} + \frac{\epsilon_1 \cdot d_e}{k_i \cdot d_i} \quad t_{pv} = 367.924$$

$$t_{pg} := t_{ge} - \frac{\epsilon_1}{k_e} \quad t_{pg} = 705.558$$

$$t_p := \frac{t_{pg} + t_{pv}}{2} \quad t_p = 536.741$$

NB la temperature de sortie des gaz est recherchee de telle sorte $k \cdot t_d$ calcule ci-dessus = ϵ_1 calcule plus haut

cette procedure est repetee pour les autres surchauffeurs

```

g := .145 .c + .11 .h + .745 .u
prg := .145 .prc + .11 .prh + .745 .pru
ng := .145 .nc + .11 .nh + .745 .nu
og := .145 .oc + .11 .oh + .745 .ou
g = 1.021 10^-5
prg = 0.775
ng = 0.058
og = 1.306

```

----- fin de la determination des caracteristiques a tm-----

```

w := 4
Re := g w de
Re = 7.761 10^3

```

```

kgb := .33 Re .6 .3
de

```

```

kgb = 63.545

```

-----d) calcul de ki-----

```

tf := (tpv + (tve + tvs) / 2) / 2
tf = 495.75

```

-----determination des caracteristiques de la vapeur---

```

cpv := 55.56 + 143.05 - 103.54 + 82.751 - 3.6989

```

vtvl :=	v/v :=	v/v :=	vtv2 :=	v2 :=
320	2.19	6.51	300	33.98
340	2.27	6.35	350	28.34
360	2.35	6.38	400	25.02
380	2.42	6.48	450	22.65
400	2.50	6.64	500	20.79
420	2.57	6.76	550	19.27
440	2.65	6.92	600	18.00
460	2.73	7.12	650	16.90
480	2.80	7.32		
500	2.90	7.54		
520	2.97	7.75		

$$v1 := v \cdot v \cdot 10^{-5} \quad v1 := v \cdot v \cdot 10^{-2}$$

$$av := \text{lininterp}(vtv1, v1, tf)$$

$$av := \text{lininterp}(vtv1, v1, tf)$$

$$av := \text{lininterp}(vtv2, av2, tf)$$

v := 30 -----fin de determination des caracteristiques de H2O-----

$$ki := 0.01978 \left[\frac{v}{di} \right]^{.8} \left[\frac{v \cdot v \cdot di}{\rho \cdot v} \right]^{.4}$$

$$ki = 1.853 \cdot 10^3$$

-----e) calcul de k-----

$$ke := kg + kbg \quad ke = 78.673$$

$$k := \frac{ke}{de} \cdot \left(\frac{ke}{de} \right)^{-1} + \left(\frac{ki}{di} \right)^{-1} + \frac{e}{de - di}$$

$$k = 73.752$$

-----f) calcul de td-----

$$td := \frac{(tge - tvs) - (tgs - tve)}{\ln \left[\frac{tge - tvs}{tgs - tve} \right]}$$

$$td = 517.464$$

---- g) calcul de \bar{t}_l et verification des valeurs a priori-----

$$\bar{t}_l := k \cdot t_d \quad \bar{t}_l = 3.816 \cdot 10^4$$

$$t_{pv} := t_{vs} + \frac{\bar{t}_l \cdot d_i}{k_i \cdot d_i} \quad t_{pv} = 529.623$$

$$t_{pg} := t_{ge} - \frac{\bar{t}_l}{k_e} \quad t_{pg} = 544.901$$

$$t_p := \frac{t_{pg} + t_{pv}}{2} \quad t_p = 537.262$$

$$e := \frac{d_i}{2} \cdot \exp\left(\frac{t_{pg} - t_{pv}}{\bar{t}_l \cdot d_i}\right) - 1 \quad e = 0.005$$

$$Q_2 := 6069.96 \cdot 10^3 \quad s := \frac{Q_2}{\bar{t}_l} \quad s = 159.049$$

NB La temperature d'entree des gaz est cherchee de telle sorte que t_p soit inferieure a la limite

Verification des temperatures de metal au points critiques

2-Surchauffeur N 2

valeurs a fixer a priori
et obtenues apres iterations

constantes

	$\pi := 70$	$d_e := 51 \cdot 10^{-3}$
$tpg := 701$	$tge := 1310$	$\alpha := 3.6 \cdot 10^{-3}$
$tpv := 444$	$tve := 300$	$d_i := 43.8 \cdot 10^{-3}$
$tgs := 771$	$tvs := 424$	$\mu_v := 130$
		$\mu := 17$
	$Q := 11879.76 \cdot 10^3$	
	$s := 182.8$	

1) calcul du flux $\rightarrow \dot{q} := \frac{Q}{s} = 6.259 \cdot 10^4$

2) conduction des tubes

$tp := \frac{tpg + tpv}{2} = 572.5$

acier utilise 10CD9-10

$tp = 572.5$

calcul de

$\lambda :=$	$\begin{bmatrix} 100 \\ 200 \\ 300 \\ 400 \\ 500 \\ 600 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 37 \\ 36 \\ 35 \\ 33.5 \\ 31.5 \\ 29 \end{bmatrix}$
--------------	--	--

$p := 1.86$

$\lambda := \text{interp}(1, p, tp)$

$e = 7.022 \cdot 10^{-3}$

-----3) calcul de kg-----

$$tgm := \frac{tge + tgs}{2} \quad pca := 0.145 \cdot 0.9 \text{ de} \quad pva := 0.11 \cdot 0.9 \text{ de}$$

determination d'

$$tgm = 1.056 \cdot 10^3 \quad pca = 0.007 \quad pva = 0.005$$

$$\phi_c := 5.50 \cdot 10^{-2} \quad \phi_v := 1.17 \cdot 10^{-2}$$

$$Tgm := tgm + 273 \quad Tpg := tpg + 273$$

$$\phi_c := 3.968 \cdot \phi_c \cdot Tgm \cdot \left(\frac{3.35}{100} \right)^{.65} \cdot Tgm - Tpg \cdot \left(\frac{3.35}{100} \right)^{3.35}$$

$$\phi_v := 3.968 \cdot \phi_v \cdot \left(\frac{Tgm - Tpg}{100} \right)^4$$

$$kg := \frac{\phi_c + \phi_v}{tgm - tpg}$$

$$kg = 15.298$$

-----4) Calcul de kbg-----

$$t_m := \frac{t_{gm} + t_p}{2} \quad t_m = 814 \quad T_m := t_m + 273$$

*****interpolation des caracteristiques des gaz a tm*****

tmi :=	200	eci :=	23.1	prci :=	.73	ci :=	.0271
	400		30.8		.77		.0399
	600		37.6		.77		.0507
	800		43.7		.78		.0605
	1000		49.1		.79		.0691
	1200		54		.80		.0765

	16.7		.97		.0288
	24		.94		.0454
	30.8		.90		.0642
phi :=	37.2	prhi :=	.90	hi :=	.0828
	43.1		.89		.1026
	48.6		.89		.120

	24.7		.71		.0314
	31.2		.72		.0408
	36.7		.74		.0488
psi :=	41.5	prni :=	.76	ni :=	.0558
	45.8		.78		.0619
	49.8		.79		.0671

$$ucl := uci \cdot 10^{-6} \quad phi := phi \cdot 10^{-6} \quad unl := ni \cdot 10^{-6}$$

$$uc := \text{linterp}(tmi, ucl, tm) \quad prc := \text{linterp}(tmi, prci, tm)$$

$$uh := \text{linterp}(tmi, phi, tm) \quad prh := \text{linterp}(tmi, prhi, tm)$$

$$un := \text{linterp}(tmi, unl, tm) \quad prn := \text{linterp}(tmi, prni, tm)$$

$$ac := \text{linterp}(tmi, uci, tm) \quad ac := 1.977$$

$$ah := \text{linterp}(tmi, phi, tm) \quad ah := .804$$

$$an := \text{linterp}(tmi, psi, tm) \quad an := 1.250$$

$$ug := .145 uc + .11 uh + .745 un \quad -5$$

$$g = 4.167 \cdot 10$$

$prg := .145 prc + .11 prh + .745 prn$ $prg = 0.784$
 $kg := .145 kc + .11 kh + .745 kn$ $g = 0.062$
 $pg := .145 pc + .11 ph + .745 pn$ $g = 1.306$

$Vgm := \frac{137000}{3600 pg 6.12}$ $Regm := \frac{kg Vgm de}{pg}$ $Regm = 7.363 10^3$
 $Vgm = 4.76$

-----fin de la recherche des caracteristiques des gaz -----

$cl := 0.258$ $m := 0.623$

$Nug := 1.13 cl Regm prg$

$kg := Nug \frac{de}{g}$

$kg = 84.477$

----- 5) calcul de ki-----

$tf := \frac{tpv + \frac{tve + tvs}{2}}{2}$ $tf = 482.25$ $tf := \frac{tf + 273}{100}$

""""Caracterisque de la vapeur a tf""""

$cpv := 55.56 + 143.05 \cdot .25 + 183.54 \cdot .5 + 82.751 \cdot .5 - 3.6989$

320	2.19	6.51	300	33.90
340	2.27	6.35	350	28.30
360	2.35	6.38	400	25.00
380	2.42	6.48	450	22.60
400	2.50	6.64	500	20.70
420	2.57	6.76	550	19.20
440	2.65	6.92	600	18.00
460	2.73	7.12	650	16.90
480	2.80	7.32		
500	2.90	7.54		
520	2.97	7.75		

$$v1 := v v 10^{-5} \quad v1 := v v 10^{-2}$$

$$v := \text{linterp}(vtv1, v1, tf)$$

$$pv := \text{linterp}(vtv1, v1, tf)$$

$$v := \text{linterp}(vtv2, v2, tf) \quad v = 24.878$$

*****fin de la recherche des caracteristiques de la vapeur*****

$$s := \frac{d_i^2}{4} n \quad v := \frac{mv \cdot 1000}{3600 \cdot v \cdot s} \quad v = 56.669$$

$$k_i := 0.86 \cdot 0.023 \left[\frac{v}{d_i} \right]^{.8} \left[\frac{v \cdot v \cdot d_i}{cpv} \right]^{.4}$$

$$k_i = 3.529 \cdot 10^3$$

-----calcul de k-----

$$k_e := k_g + k_{bg} \quad k_e = 98.042$$

$$k := \frac{-1}{de} \left[(k_e \cdot de)^{-1} + (k_i \cdot d_i)^{-1} \right] + \frac{e}{de - d_i} \left[\frac{de}{\ln \frac{de}{d_i}} \right]^{-1}$$

$$k = 93.619$$

-----calcul de td-----

$$td := \frac{(t_{ge} - t_{vs}) - (t_{gs} - t_{ve})}{\ln \left[\frac{t_{ge} - t_{vs}}{t_{gs} - t_{ve}} \right]}$$

$$td = 669.014$$

-----calcul de \dot{m}_1 et verification des valeurs a priori-----

$$\dot{m}_1 := k \cdot t_d \quad \dot{m}_1 = 6.263 \cdot 10^4$$

$$t_{pv} := t_{vs} + \frac{\dot{m}_1 \cdot d_e}{k_i \cdot d_i} \quad t_{pv} = 444.663$$

$$t_{pg} := t_{ge} - \frac{\dot{m}_1}{k_e} \quad t_{pg} = 701.17$$

$$t_p := \frac{t_{pg} + t_{pv}}{2} \quad t_p = 572.916$$

NB la temperature de sortie des gaz est recherchee de telle sorte que que $K \cdot t_d$ calcule ci dessus = \dot{m}_1 calcule plus haut
meme procedure pour les trois surchauffeurs.

Verification des temperatures de metal au points critiques

3-Surchauffeur N 3

valeurs a fixer a priori
et obtenues apres iterations

constantes

	pi := 70	de := 51 10 ⁻³
tpg := 668	tge := 1340	α := 4.5 10 ⁻³
tpv := 522	tve := 380	di := 42 10 ⁻³
tgs := 968	tvs := 505	
		mv := 130
	Q := 9940.02 10 ³	n := 13
	s := 145.15	

1) calcul du flux-----> $\dot{q}_1 := \frac{Q}{s} = 6.848 10^4$

----- 2) conduction des tubes-----

tp := $\frac{tpg + tpv}{2}$ tp = 595

acier utilise 10CD9-10

tp = 595

calcul de α , de sr et de sc

t :=	$\begin{bmatrix} 100 \\ 200 \\ 300 \\ 400 \\ 500 \\ 600 \end{bmatrix}$	α :=	$\begin{bmatrix} 37 \\ 36 \\ 35 \\ 33.5 \\ 31.5 \\ 29 \end{bmatrix}$	p := α . 86
				:= linterp(t, p, tp)
				= 5.566 10 ³

----- 3) calcul de kg -----

$$\text{tgm} := \frac{\text{tge} + \text{tgs}}{2} \quad \text{pca} := 0.145 \cdot 0.9 \text{ de} \quad \text{pva} := 0.11 \cdot 0.9 \text{ de}$$

determination d'

$$\text{tgm} = 1.154 \cdot 10^3 \quad \text{pca} = 0.007 \quad \text{pva} = 0.005$$

$$\text{ec} := 5.50 \cdot 10^{-2} \quad \text{ev} := 1.17 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{Tgm} := \text{tgm} + 273 \quad \text{Tpg} := \text{tpg} + 273$$

$$\text{ec} := 3.968 \cdot \text{c Tgm} \cdot \frac{.65 \cdot \text{Tgm}^{3.35} - \text{Tpg}^{3.35}}{100^4}$$

$$\text{ev} := 3.968 \cdot \text{ev} \cdot \frac{\text{Tgm}^4 - \text{Tpg}^4}{100^4}$$

$$\text{kg} := \frac{\text{ec} + \text{ev}}{\text{tgm} - \text{tpg}}$$

$$\text{kg} = 17.217$$

----- 4) Calcul de kbg-----

$$t_m := \frac{t_{gm} + t_p}{2} \quad t_m = 874.5 \quad T_m := t_m + 273$$

*****interpolation des caracteristiques des gaz a t_m*****

tmi :=	200	23.1	.73	.0271
	400	30.8	.77	.0399
	600	37.6	.77	.0507
	800	43.7	.78	.0605
	1000	49.1	.79	.0691
	1200	54	.80	.0765

	16.7	.97	.0288
	24	.94	.0454
	30.8	.90	.0642
phi :=	37.2	.90	.0828
	43.1	.89	.1026
	48.6	.89	.120

	24.7	.71	.0314
	31.2	.72	.0408
	36.7	.74	.0488
phi :=	41.5	.76	.0558
	45.8	.78	.0619
	49.8	.79	.0671

$$\mu_{cl} := \mu_{ci} \cdot 10^{-6} \quad \mu_{hl} := \mu_{hi} \cdot 10^{-6} \quad \mu_{nl} := \mu_{ni} \cdot 10^{-6}$$

$$\mu_c := \text{linterp}(t_{mi}, \mu_{cl}, t_m) \quad \mu_{rc} := \text{linterp}(t_{mi}, \mu_{rci}, t_m)$$

$$\mu_h := \text{linterp}(t_{mi}, \mu_{hl}, t_m) \quad \mu_{rh} := \text{linterp}(t_{mi}, \mu_{rhi}, t_m)$$

$$\mu_n := \text{linterp}(t_{mi}, \mu_{nl}, t_m) \quad \mu_{rn} := \text{linterp}(t_{mi}, \mu_{rni}, t_m)$$

$$\mu_c := \text{linterp}(t_{mi}, \mu_{ci}, t_m) \quad \mu_c := 1.977$$

$$\mu_h := \text{linterp}(t_{mi}, \mu_{hi}, t_m) \quad \mu_h := .804$$

$$\mu_n := \text{linterp}(t_{mi}, \mu_{ni}, t_m) \quad \mu_n := 1.250$$

$$\mu_g := .145 \mu_c + .11 \mu_h + .745 \mu_n \quad g = 4.307 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{prg} := .145 \text{ prc} + .11 \text{ prh} + .745 \text{ prn} \quad \text{prg} = 0.776$$

$$\text{g} := .145 \text{ c} + .11 \text{ h} + .745 \text{ n} \quad \text{g} = 0.058$$

$$\text{g} := .145 \text{ c} + .11 \text{ h} + .745 \text{ n} \quad \text{g} = 1.306$$

$$\text{Vgm} := \frac{1.37000}{3600 \text{ g} \cdot 6.12} \quad \text{Regm} := \frac{\text{g} \cdot \text{Vgm} \cdot \text{de}}{\text{g}} \quad \text{Pogm} = 7.739 \cdot 10^3$$

$$\text{Vgm} = 4.76$$

*****fin de la recherche des caracteristiques des gaz*****

$$\text{cl} := 0.2 \quad \text{m} := 0.6$$

$$\text{Nug} := 1.13 \text{ cl} \text{ Regm} \text{ prg} \quad \text{m} = .33$$

$$\text{kg} := \text{Nug} \cdot \text{g} \cdot \text{de}$$

$$\text{kg} = 51.46$$

----- 5) calcul de ki -----

$$\text{tf} := \frac{\text{tve} + \text{tvs}}{\text{tpv} + \frac{\text{tf} + 273}{2}} \quad \text{tf} = 342.95 \quad \text{:=} \frac{100}{100}$$

*****caracteristiques de la vapeur tf*****

$$\text{cpv} := 55.56 \cdot 143.05 - 183.54 \cdot .25 + 82.751 \cdot .5 - 3.6989$$

320	2.19	6.51	300	33.98
340	2.27	6.35	350	28.34
360	2.35	6.38	400	25.02
380	2.42	6.48	450	22.65
400	2.50	6.64	500	20.79
420	2.57	6.76	550	19.27
440	2.65	6.92	600	18.00
460	2.73	7.12	650	16.90
480	2.80	7.32		
500	2.90	7.54		
520	2.97	7.75		

$$\mu v1 := v v 10^{-5} \quad \rho v1 := v v 10^{-2}$$

$$\lambda v := \text{linterp}(vtv1, \rho v1, tf)$$

$$\rho v := \text{linterp}(vtv1, \mu v1, tf)$$

$$\rho v := \text{linterp}(vtv2, \mu v2, tf) \quad \rho v = 21.45$$

*****fin de la recherche des caracteristiques de la vapeur**

$$s := \frac{d_i^2}{4} \quad v := \frac{m v 1000}{3600 \rho v s} \quad v = 93.471$$

$$k_i := 0.86 \cdot 0.023 \begin{bmatrix} \rho v \\ d_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho v v d_i \\ \rho v \end{bmatrix}^{.8} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v \end{bmatrix}^{.4} \text{cpv}$$

$$k_i = 4.834 \cdot 10^3$$

----- 6) calcul de k -----

$$k_e := k_g + k_{bg} \quad k_e = 101.694$$

$$k := \frac{1}{\frac{1}{k_e} + \frac{1}{k_i} + \frac{1}{e} \ln \frac{d_e}{d_i}} \quad \text{with } e = \frac{d_e - d_i}{d_e}$$

$$k = 97.255$$

----- 7) calcul de td -----

$$t_d := \frac{(t_{ge} - t_{vs}) - (t_{gs} - t_{ve})}{\ln \frac{t_{ge} - t_{vs}}{t_{gs} - t_{ve}}}$$

$$t_d = 704.296$$

-- 8) calcul de $\bar{\theta}_1$ et verification des valeurs a priori-----

$$\bar{\theta}_1 := k \cdot t_d \quad \bar{\theta}_1 = 6.85 \cdot 10^4$$

$$tpv := t_{vs} + \frac{\bar{\theta}_1 \cdot d_e}{k_i \cdot d_i} \quad tpv = 522.206$$

$$tpg := t_{ge} - \frac{\bar{\theta}_1}{k_e} \quad tpg = 666.449$$

$$tp := \frac{tpg + tpv}{2} \quad tp = 594.328$$

NB la temperature de sortie des gaz est recherchee de telle sorte que $k \cdot t_d$ calcule ci - dessus = $\bar{\theta}_1$ plus haut.

meme procedure pour les trois surchauffeurs