

PROMOTION

6/82

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

U.S.T.H.B

*2 ex*

université des sciences et de la technologie d'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie-Mécanique

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية

الهندسة

THÈSE DE FIN D'ÉTUDES  
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

**REGULATION AUTOMATIQUE**

de la température de la vapeur  
par injection d'eau

PROPOSE PAR:

A. WERNER

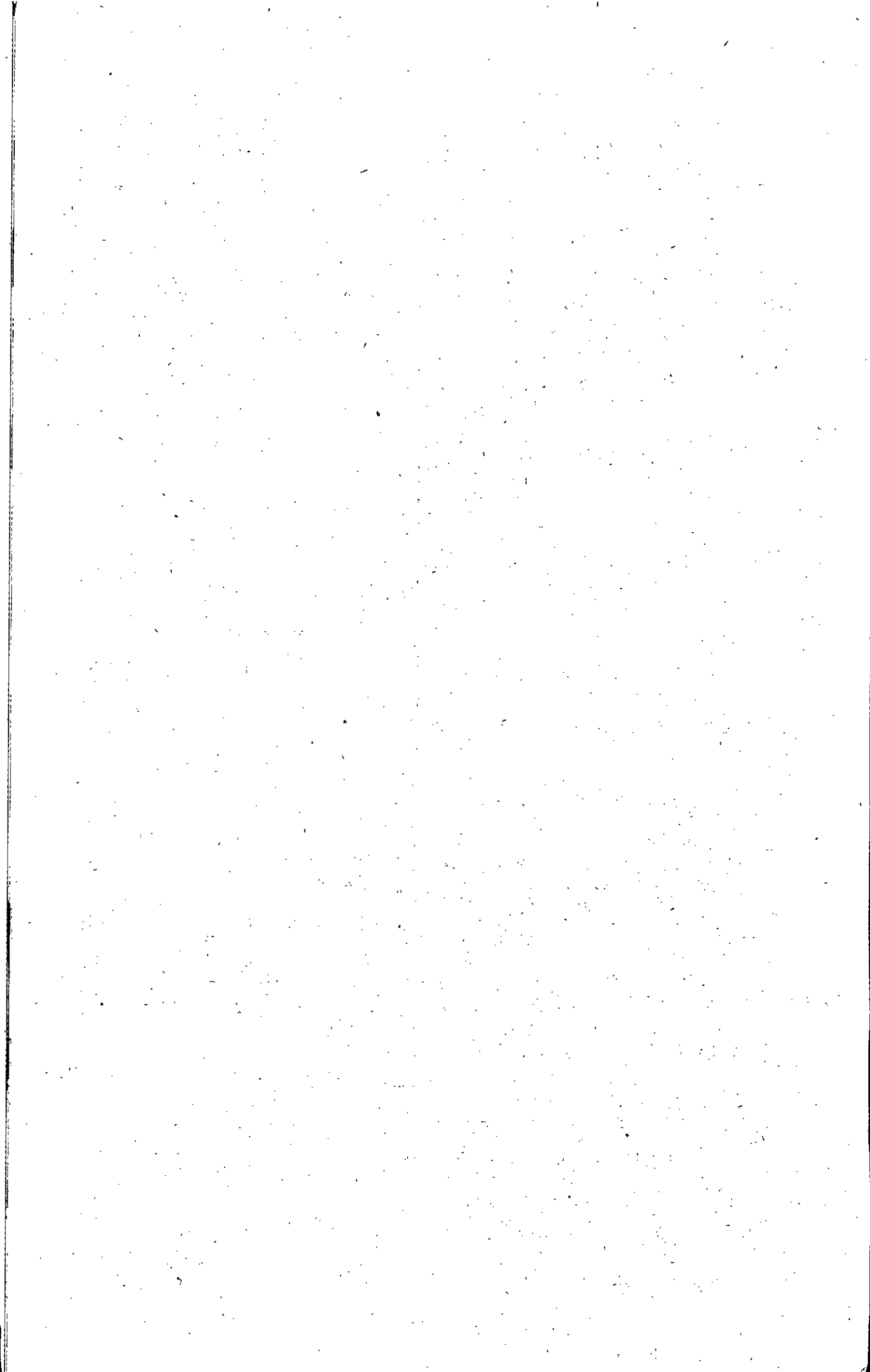
maitre assistant

à l'ENP

ETUDIE PAR:

mohamed-BENBRAIKA

JANVIER-82



PROMOTION

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**U.S.T.H.B**

université des sciences et de la technologie d'ALGER

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

Département de Génie-Mécanique

THESE DE FIN D'ETUDES

**REGULATION AUTOMATIQUE**

de la température de la vapeur  
par injection d'eau

PROPOSE PAR:

A. WERNER

maitre assistant  
à l'ENP

ETUDIE PAR:

mohamed-BENBRAIKA

JANVIER-82

A la mémoire de  
notre cher et regretté  
professeur de régulation  
industrielle monsieur Romuald  
SOWA SMETNY.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

” إِنَّمَا يَخْشَى اللَّهَ مِنْ عِبَادِهِ الْعُلَمَاءُ ”

- ص ١٥٠ - سورة الله العظيم -

je tiens à  
remercier tous ceux qui ont  
contribué à ma formation d'ingénieur  
et plus particulièrement les professeurs du  
GENIE-MECANIQUE. Je réitère mes remerciements  
et ma reconnaissance à monsieur A. WERNER pour  
ses conseils et son suivi et l'assure de mon amitié.  
Mes remerciements pour ZEMOURI et le personnel du centre  
de documentation de la SONELGAZ.

Je n'oublierai pas Hocine BENMESSAOUD du centre  
de calcul de l'école nationale polytechnique d'Alger;  
Hacène CHATER et ZIBANI Hamid pour le passage  
du programme.

Mes amis pour leurs conseils et leur  
aide à la mise en forme de  
ce projet.

A  
Mes parents  
Mes frères et sœurs  
Mes amis  
La promotion "janvier 82"  
je dédie  
ce modeste  
travail

## SUJET

### REGULATION AUTOMATIQUE DE LA TEMPERATURE DE VAPEUR PAR INJECTION D'EAU.

#### Données :

Charge	D : Kg/s	$t_s$ : °C	$t_{eau}$ : °C	$t_e$ : °C	Q : KW	$P_e$ : bar	$P_s$ : bar	$\alpha$ : $\frac{KW}{m^2.K}$
60%	108,333	540	219	496	13 324	136	135	2,5707
75%	136,111	540	230	491	18 548	136,7	135	3,0723
100%	180,555	540	247	486	27 629	138	135	3,8874

#### Caractéristiques du surchauffeur :

Nombre de tubes : 18 faisceaux de 38 tubes : 684 tubes

Dimensions (tube) : on prendra en moyenne 26 m  $\phi$  32.6

$c_{p_m}$  : chaleur spécifique 0,60668  $\frac{KJ}{Kg.K}$

$\rho_m$  : masse volumique : 7850  $\frac{Kg}{m^3}$

$\lambda_m$  : coefficient de conduction 0,03483  $\frac{KW}{m.K}$

#### Travail demandé :

- Description mathématique d'objet de régulation.
- Programmation et calcul par ordinateur de la réponse dynamique pour des charges diverses de la chaudière (60% ÷ 100%).
- choix de l'injecteur d'eau
- choix de la vanne avec servo-mécanisme.
- choix des dispositifs éléments du système de régulation automatique soit électrique, soit pneumatique sur la base de catalogues accessibles.
- Dessin de l'installation de l'injecteur et des capteurs de température dans le refroidisseur.
- schéma du système de régulation automatique.

# TABLE DES MATIERES

Symboles et lettres employés	1
<b>Chp. I - INTRODUCTION -</b>	
1. Aperçu sur la science de la régulation automatique	2
2. Historique	3
3. Rappels	4
3.1 L'évaporisateur	4
3.2 L'économiseur.	4
3.3 Surchauffeur :	4
<i>Transmission de la chaleur, nécessité de la régulation de la</i> <i>vapeur surchauffée, différents procédés de son réglage</i>	9
4. Description générale du problème	9
<b>Chp. II MODELE MATHEMATIQUE DU SURCHAUFFEUR</b>	
1. But de l'étude	11
2. Echange de chaleur dans une cellule.	11
3. Méthode numérique	15
3.1 Méthodes de détermination du rapport $\frac{\Delta x}{\Delta t}$	15
3.2 Stabilité de la solution numérique	19
4. Conductibilité de la chaleur	20
4.1 solution exacte	20
4.2 Calcul de certaines constantes	21
4.3 Calcul des constantes de temps $T_{mv}$ et $T_{m_1 m_2}$	24
4.4 Solution approchée	26
4.5 Détermination de $\Delta t$ et $\Delta x$	28
<b>Chp. III COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU SURCHAUFFEUR</b> <b>CONCEPTION DE REGULATION.</b>	
1. Préparation du programme	30
2. Description du programme	32



2.1	Description des variables.	32
2.2	Programme.	34
2.3	Données	37
3.	Interprétation des résultats.	40
4.	Schéma de l'installation à régler.	43
<u>Chp. IV</u> ELEMENTS TECHNOLOGIQUES.		
1.	Refroidisseur.	44
1.1	Description du refroidisseur	44
2.	Calcul de dimensionnement des tubes.	45
3.	Vérification des soudures.	50
<u>Chp. V</u> ETUDE ET CHOIX DU MATERIEL DE REGULATION.		
1.	Vanne automatique.	53
	Calcul des pertes de charge, équation du débit, calcul du coefficient de débit (Kv), choix de la vanne et spécifications de commande.	63
2.	Tuyère	64
2.1	calcul et choix	64
2.2	Eau de désurchauffe.	65
3.	Servomécanisme	65
4.	Capteurs de température et thermostat.	67
5.	Régulateurs.	70
	<u>CONCLUSION</u>	74
	<u>Bibliographie</u>	75

## Symboles et lettres employés au chapitre 2

$A_i$	$\left[ \frac{m^2}{m} \right]$	surfaces internes des différentes couches (unitaires).
$CP_m$	$\left[ \frac{KJ}{KgK} \right]$	chaleur spécifique du métal.
$CP_v$	$[ " ]$	" " de la vapeur.
$D$	$\left[ \frac{Kg}{s} \right]$	Débit de vapeur.
$e_i$	$[ m ]$	épaisseurs des couches de métal.
$K_i$	$\left[ \frac{KW}{m^2K} \right]$	Coefficient global de transmission.
$m_m$	$\left[ \frac{Kg}{m} \right]$	masse de métal (unitaire).
$m_v$	$\left[ \frac{Kg}{m} \right]$	" " vapeur ( " )
$\dot{q}$	$\left[ \frac{KW}{m} \right]$	flux de chaleur ( " )
$R_i$	$\left[ \frac{m.K}{KW} \right]$	Résistances globales.
$v$	$[ m/s ]$	Vitesse de la vapeur.
$x$	$[ m ]$	longueur d'un tube du surchauffeur.
$T_{mv}$	$[ s ]$	constante de temps entre les couches de métal et vapeur.
$T_{m1m2}$	$[ s ]$	" " " " " " " " 1 et 2.
$\alpha$	$\left[ \frac{KW}{m^2K} \right]$	coefficient de convection
$\lambda$	$\left[ \frac{KW}{m.K} \right]$	coefficient de conduction
$\theta_v$	$[ ^\circ C ]$	température de la vapeur.
$\theta_{v1}$	$[ ^\circ C ]$	" " " " à l'entrée de la cellule
$\theta_{v2}$	$[ ^\circ C ]$	" " " " à la sortie " " "
$\theta_m$	$[ ^\circ C ]$	" de métal
$\theta_{mi}$	$[ ^\circ C ]$	" des différentes couches de métal.
$\Delta x$	$[ m ]$	largeur de la cellule.
$\Delta t$	$[ s ]$	temps que met la particule de vapeur pour parcourir $\Delta x$
$\rho_v$	$\left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$	masse volumique de la vapeur.
$\rho_m$	$\left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$	" " du métal.

## 2. Historique

La première utilisation de la régulation automatique semble avoir été le régulateur à boules de la machine à vapeur de Watt vers 1775. Ce dispositif gouvernait la vitesse de la machine en agissant sur une vanne qui réglait l'arrivée de la vapeur et c'est James Clerk Maxwell qui fit l'étude mathématique du régulateur à boules en 1808.

Les principes de la régulation furent ensuite appliqués à d'autres machines et aux turbines, parallèlement on étudia les régulateurs et les servomécanismes en vue de leur application aux machines à vapeur et aux mécanismes de pilotage des navires.

La première théorie générale de la régulation automatique fut exposée par NYQUIST, cette étude fournissait les éléments pour la détermination de la stabilité des systèmes sans avoir à résoudre des équations différentielles.

Les applications générales de la régulation industrielle ne commencèrent qu'avec les années 1930 et prirent de l'ampleur en 1940 où des systèmes assez complexes étaient d'usage courant.

Les dispositifs de régulation sont utilisés à presque tous les stades des opérations industrielles.

## CHAPITRE I - INTRODUCTION -

### 1. Aperçu sur la science de la régulation automatique.

Le développement de la régulation automatique a contribué pour une part importante au progrès industriel pendant ce que l'on appelle aujourd'hui la deuxième révolution industrielle.

La raison principale pour laquelle on utilise les procédés de régulation automatique est l'économie qu'ils apportent dans l'exploitation des procédés industriels, économie qui est plus importante que les frais d'équipement qu'ils nécessitent.

Il faut y ajouter de nombreux avantages difficiles à chiffrer tels que la suppression de tâches qui ne nécessitent pas un travail intellectuel digne de ce nom, et corrélativement, une demande accrue de personnel de qualification plus élevée.

Enfin, l'élimination de causes humaines d'erreur est encore un argument positif.

Le principe de la régulation automatique est très simple, on utilise une rétro-action pour faire fonctionner un mécanisme de commande. Il est explicité par la définition suivante :

La régulation automatique consiste à maintenir à une valeur déterminée une quantité ou une variable d'état, en mesurant sa valeur existante, en la comparant à la valeur prescrite et en utilisant la différence entre ces deux valeurs pour actionner un dispositif qui tend à réduire cette différence.

La régulation automatique utilise donc une boucle fermée d'action et de rétro-action fonctionnant sans intervention humaine.

## 2. Historique

La première utilisation de la régulation automatique semble avoir été le régulateur à boules de la machine à vapeur de Watt vers 1775. Ce dispositif gouvernait la vitesse de la machine en agissant sur une vanne qui réglait l'arrivée de la vapeur et c'est James Clerk Maxwell qui fit l'étude mathématique du régulateur à boules en 1808.

Les principes de la régulation furent ensuite appliqués aux machines et aux turbines, parallèlement on étudia les régulateurs et les servomécanismes en vue de leur application aux machines à vapeur et aux mécanismes de pilotage des navires.

La première théorie générale de la régulation automatique fut exposée par NYQUIST, cette étude fournissait les bases pour la détermination de la stabilité des systèmes sans avoir à résoudre des équations différentielles.

Les applications générales de la régulation industrielle ne commencèrent qu'avec les années 1930 et prirent de l'ampleur en 1940 où des systèmes assez complexes étaient d'usage courant.

Les dispositifs de régulation sont utilisés à presque tous les stades des opérations industrielles.

### 3 - RAPPELS

Il s'agit dans notre étude de régler la température de la vapeur dans une chaudière.

Cette chaudière est constituée d'échangeurs thermiques auxquels les gaz chauds cèdent leur chaleur et parmi lesquels nous citons : l'évaporisateur, l'économiseur, et le surchauffeur de vapeur ; celui-ci faisant l'objet de notre étude sera étudié plus approfondément.

#### 3-1. L'évaporisateur.

L'évaporisateur est un échangeur thermique qui travaille par rayonnement ou par convection selon sa position et qui a pour rôle de fournir la vapeur saturée au ballon.

#### 3-2. L'économiseur.

L'économiseur est un échangeur de chaleur à surface fait de tubes en acier ou en fonte. Il est destiné à rechauffer l'eau d'alimentation diminuant ainsi la température des gaz d'où un bon rendement pour l'installation.

#### 3.3. Le Surchauffeur.

a) Définition : Ce sont les faisceaux tubulaires du générateur de vapeur qui sont soumis aux températures les plus élevées de la vapeur.

La limite de la température de la vapeur est imposée par le générateur de vapeur et la turbine, par les conditions de résistance des métaux aux températures élevées. Quand la température ne dépasse pas  $540^{\circ}\text{C}$  on utilise des aciers

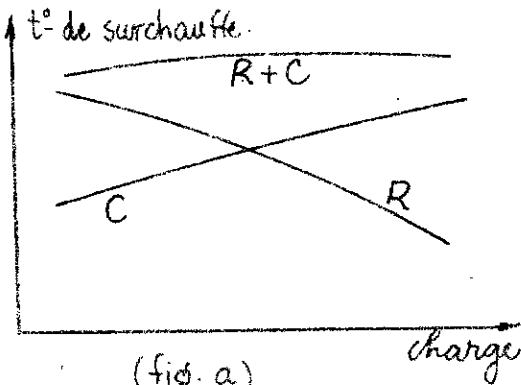
dits "ferritiques" contenant de faibles proportions de Cr, Mo et V. Pour des températures plus élevées on emploie des aciers dits "Austénitiques" à haute teneur en Cr: 18% et haute teneur en Ni: 8%.

Les tubes constituant le surchauffeur sont jumelés pour diminuer la vitesse de la vapeur sans diminuer l'aire de passage des gaz brûlés et principalement pour augmenter la surface de transfert de chaleur.

### b) Transmission de la chaleur aux surchauffeurs.

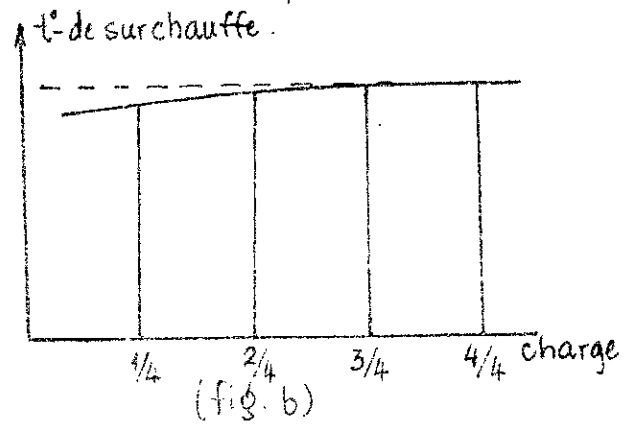
Pour obtenir une température de surchauffe relativement constante, l'idéal est d'associer un surchauffeur par rayonnement avec un surchauffeur par convection (fig. a), mais comment le réaliser? une première

idée est de mettre le surchauffeur Basse température (B.t) dans un endroit où l'échange se fait par convection et le surchauffeur Haute température (H.t) dans un lieu où il travaille par rayonnement



mais ici les tubes du surchauffeur risquent d'être grillés. D'où le compromis souvent utilisé: le surchauffeur B.t sera placé dans le parcours arrière du générateur et le surchauffeur H.t à la

sortie de la chambre de combustion (rayonnement + convection) et la température de surchauffe qui en résulte a habituellement l'allure de la courbe (fig. b).



c) Vapeur surchauffée et ses avantages.

La vapeur saturée venant du réservoir du générateur de vapeur passe dans les tubes du ou des surchauffeurs successifs où sa température est élevée à pression constante.

À la sortie des éléments de surchauffe elle est dirigée vers la turbine.

La température élevée de la vapeur surchauffée présente les avantages suivants :

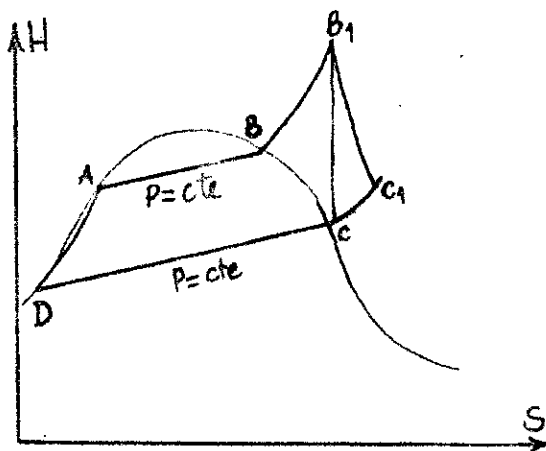
• Le rendement thermique de la turbine augmente avec l'accroissement de la différence entre les températures de la vapeur à l'entrée et à la sortie de la turbine (fig.c) :

$$\eta_i = \frac{H_{B_1} - H_{C_1}}{H_{B_1} - H_c} ; \text{ avec :}$$

H: enthalpie

$B_1C$  : Détente isentropique

$B_1C_1$  : Détente réelle.



(fig.c)

• Quand la température de la vapeur est très élevée à l'admission de la turbine, la condensation de cette vapeur dans les premiers étages est moins abondante et l'érosion, provoquée par les gouttelettes d'eau sur les ailettes de la turbine s'en trouve diminuée.

d) Nécessité de la régulation de la température de vapeur.

Le plus souvent et malgré les précautions prises on ne peut maintenir constante la température de surchauffe sur



toute l'étendue de la vaporisation d'une chaudière sans faire appel à des dispositifs de réglage de la température (voir l'allure de la courbe sur la fig. b). Nous citons quelques facteurs faisant varier la température de la vapeur :

\* La combustion est défectueuse ceci du à :

. La mauvaise qualité du combustible.

. Les brûleurs sont défectueux.

. Incident sur l'alimentation en combustible du générateur de vapeur.

\* Nous pouvons ajouter à cela la non uniformité de la flamme qui entraînera un flux non constant.

\* La variation de la charge de la chaudière et l'injection dans le refroidisseur influent aussi sur la température de la vapeur.

Suite à ça la nécessité de régler la vapeur surchauffée à une valeur bien déterminée s'impose en effet :

- Si la température est très élevée, les métaux constituant les surchauffeurs et les corps de la turbine peuvent subir des contraintes dangereuses dues à l'abaissement de la limite d'élasticité et être à l'origine de graves accidents.

- Si la température est trop faible, le rendement thermique diminue. De plus des condensations abondantes peuvent se produire dans les étages de la turbine.

### e) Procédés de réglage.

Différents procédés sont utilisés pour le réglage de la température de la vapeur surchauffée, à savoir :

1. Par action au moyen des brûleurs.

2. Par variation de la quantité de fumée.

3. Par variation d'humidité de la vapeur saturée.

4. Par injection d'eau dans la vapeur.

## e.1. Règlage par action au moyen des brûleurs.

### a) Variation d'orientation.

L'orientation des brûleurs vers le haut augmente la surchauffe aux basses vaporisations (faibles charges) et vers le bas elle atténue l'augmentation de surchauffe à fortes charges.

Cette action est souvent utilisée pour corriger les variations de qualité du combustible et autres influences.

### b) Etagement des brûleurs.

Ce moyen n'est utilisable que dans les très hautes chambres de combustion comportant plusieurs étages de brûleurs. Aux faibles vaporisations, l'utilisation des brûleurs supérieurs est favorable au maintien de la température de surchauffe.

## e.2. Règlage par variation de la quantité de fumée.

### a) Dérivation par un by-pass (contournement des gaz de comb.)

Une partie des gaz est dérivée à l'entrée soit vers le surchauffeur ou en un point situé sur le circuit intérieur de ces appareils. La dérivation a le plus souvent lieu après la partie de surchauffeur H.t et n'intéresse que la partie B.t.

### b) Recyclage des fumées.

Une partie des gaz de fumée est reprise par le ventilateur et reinjectée dans la chambre de combustion ou autre point. Ce procédé n'est donc valable que s'il y a prédominance des éléments à convection dans les surchauffeurs. On remarquera aussi le danger pouvant provenir de ce procédé en l'occurrence l'inversion de circulation qui met le ventilateur hors-usage, et par ailleurs aux très faibles débits de générateur de vapeur, le recyclage risque de provoquer des extinctions de brûleurs.

Les procédés déjà cités ne sont jamais utilisés seuls vu leur action lente.

### e3. Réglage par variation d'humidité de la vapeur saturée.

En faisant circuler la vapeur saturée avant son entrée au surchauffeur dans un collecteur contenant un serpentín parcouru par une dérivation variable de l'eau d'alimentation on augmente à volonté la teneur en humidité de la vapeur. Une partie de la chaleur reçue par le surchauffeur sera utilisée pour vaporiser l'humidité, et le reste de la chaleur surchauffera la vapeur.

Un tel dispositif est simple, mais il présente une grande inertie et son action est très lente.

### e4. Réglage par injection d'eau dans la vapeur.

Ce procédé a une action très rapide. Il permet d'agir sur la totalité de la vapeur en circulation. Il est simple, ne nécessite pas de robinetterie sur la vapeur et se prête bien au réglage automatique de la température de surchauffe par la commande de l'injection d'eau. Ainsi ce procédé est-il très employé pour les chaudières importantes et à haute pression.

L'injection d'eau ne doit pas être effectuée à la sortie du surchauffeur car cet appareil ne serait pas protégé contre les variations de température de la vapeur, elle se fait entre les différentes sections du surchauffeur.

## 4. DESCRIPTION GENERALE DU PROBLEME.

Nous avons vu dans les paragraphes précédents la nécessité de réglage de la température de la vapeur surchauffée et les différents procédés de réglage et pour notre problème

Le réglage par injection est bien adopté.

### Description du surchauffeur.

Il est constitué de 2 parties parallèles (gauche et droite). Chaque partie comprend 3 sections. Nous avons alors au total 4 injections.

Nous étudierons le comportement dynamique de la vapeur dans la 3<sup>e</sup> section du surchauffeur et notre injection se fera entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> sections.

Le surchauffeur est constitué par un matériau similaire à l'acier allié TU 10 CD 9 10 et ayant ces caractéristiques:

Coefficient de conduction :  $\lambda_m = 0,03483 \quad \frac{KW}{m.K}$

Chaleur spécifique :  $C_{p(m)} = 0,606 \quad \frac{KJ}{Kg.K}$

Masse volumique :  $\rho = 7850 \quad \frac{Kg}{m^3}$

La 3<sup>e</sup> section de notre surchauffeur travaille par rayonnement et a les dimensions suivantes:

38 faisceaux de 18 tubes chacun.

Chaque tube fait 26 mètres de long répartis comme suit:

7,7 m de  $\phi 32$  et d'épaisseur 5 mm.

12,4 m ---  $\phi 32$  et --- 6 mm.

5,9 m ---  $\phi 32$  et --- 7 mm.

On prendra en moyenne (pour le modèle de calcul):

684 tubes de dimensions : 26 m  $\phi 32.6$

Dans notre étude, nous commencerons par adopter un modèle mathématique de calcul qui servira de base pour le calcul dynamique qui se fera sur ordinateur; une fois les courbes de transfert faites elles seront analysées par la méthode de Victor BRDIDA pour ainsi choisir le mode de régulation

## CHAPITRE II MODELE MATHÉMATIQUE DU SURCHAUFFEUR

1. Le comportement dynamique des échangeurs de chaleur a suscité de nombreux travaux au cours des vingt dernières années. Une large partie de ces travaux se fixe pour but d'établir des méthodes de simulation efficaces.

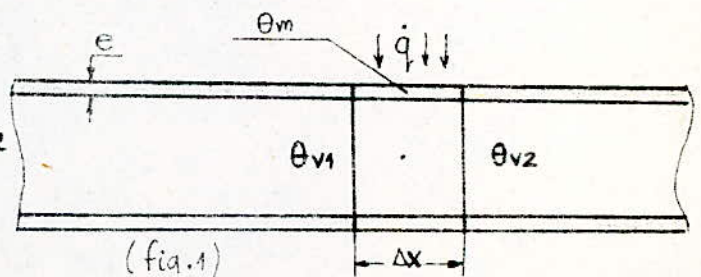
Notre but est d'étudier la transmittance d'un surchauffeur à l'égard de l'injection d'eau de désurchauffe.

Nous prendrons les hypothèses suivantes:

1. Conduction radiale parfaite dans le métal et dans la vapeur. Températures métal et vapeur sont uniformes dans toute section.
2. Conduction longitudinale nulle: Si l'on suppose le tube découpé en un grand nombre de cellules d'échange successives c.a.d aucun échange par conduction entre cellules voisines.
3.  $c_p$ ,  $\alpha$  et  $g$  constants le long d'un tube et identiques pour tous les tubes du faisceau ce qui revient à admettre que la vitesse de la vapeur est constante le long du tube.
4. Flux constant le long du tube et est indépendant du temps.

### 2. Echange de chaleur dans une cellule.

2.1 Considérons le tube ci-contre coupé en  $n$  cellules finies et prenons une cellule élémentaire avec les paramètres mentionnés sur le schéma.



En admettant une répartition uniforme du flux au droit de chaque cellule, faisons le bilan thermique de cette cellule:

a) vapeur d'eau.

Chaleur entrante (fournie à la cellule)

$$C_{p(v)} \cdot D \cdot \theta_{v1} + K A \Delta X (\theta_m - \theta_{v2}) \quad (1)$$

Chaleur sortante (prise à la cellule)

$$C_{p(v)} \cdot D \cdot \theta_{v2} \quad (2)$$

Chaleur restante (emmagasinée par la cellule).

$$m_v \Delta X c_{p(v)} \frac{d\theta_{v2}}{dt} \quad (3)$$

La combinaison (1) - (2) = (3) des 3 équations donne :

$$C_{p(v)} D (\theta_{v1} - \theta_{v2}) + K A \Delta X (\theta_m - \theta_{v2}) = m_v \Delta X c_{p(v)} \frac{d\theta_{v2}}{dt} \Rightarrow$$

$$\frac{D}{m_v} \frac{\theta_{v1} - \theta_{v2}}{\Delta X} + \frac{K A}{C_{p(v)} m_v} (\theta_m - \theta_{v2}) = \frac{d\theta_{v2}}{dt} \quad \text{qui donne :}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{K A}{C_{p(v)} m_v} (\theta_m - \theta) + \frac{D}{m_v} \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \quad (\text{II. a})$$

b) Métal.

Chaleur fournie au métal

$$\dot{q} \cdot \Delta X \quad (1)$$

Chaleur prise au métal

$$K A \Delta X (\theta_m - \theta_{v2}) \quad (2)$$

Chaleur emmagasinée

$$m_m \Delta X c_{p(m)} \frac{d\theta_m}{dt} \quad (3)$$

$$(1) - (2) = (3)$$

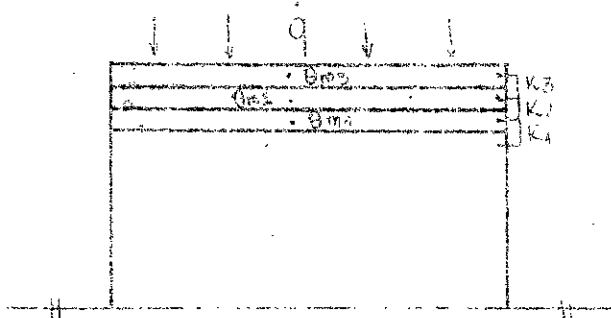
$$\frac{\dot{q}}{m_m c_{p(m)}} - \frac{K A}{m_m c_{p(m)}} (\theta_m - \theta_{v2}) = \frac{d\theta_m}{dt} \quad \text{et qui donne :}$$

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial t} + \frac{K A}{m_m c_{p(m)}} (\theta_m - \theta) = \frac{\dot{q}}{m_m c_{p(m)}} \quad (\text{II. b})$$

2.2 De toutes les hypothèses déjà citées, et se basant sur l'expérience faite par l'institut de la thermotechnique à ŁÓDŹ, c'est la première hypothèse qui est la principale cause d'erreurs.

En divisant l'épaisseur du tube en plusieurs couches on atténuera les erreurs causées par la première hypothèse et par conséquent on pourra avoir, plus de précision quant à l'étude du transfert de chaleur à travers la paroi du métal.

Divisons par exemple la couche d'épaisseur "e" en trois couches d'égales épaisseurs  $e_1 = e_2 = e_3 = \frac{e}{3} = 2 \text{ mm}$ .



(fig. 2)

Ces trois couches ont le même coefficient de conductibilité ( $\lambda_m$ ) mais possèdent des températures ( $\theta_{m_i}$ ), des coefficients de transmission ( $K_i$ ) et des masses ( $m_i$ ) différentes les uns des autres.

le terme en  $K_4$  sera remplacé par le terme comportant le flux:  $\dot{q} \cdot \Delta x$

### Bilan thermique.

#### a) Vapeur

chaleur fournie

$$c_{p(v)} \cdot D \cdot \theta_{v1} + K_1 \cdot A \cdot \Delta x (\theta_{m1} - \theta_{v2}) \quad (1)$$

$$\text{chaleur prise : } c_{p(v)} \cdot D \cdot \theta_{v2} \quad (2)$$

$$\text{chaleur emmagasinée : } m_v \cdot \Delta x \cdot c_{p(v)} \frac{d\theta_{v2}}{dt} \quad (3)$$

$$(1) - (2) = (3) \quad \text{donne : } \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{D}{m_v} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{K_1 A}{m_v c_{p(v)}} (\theta_{m1} - \theta) = 0 \quad (\text{II.1})$$

b) Métal1<sup>o</sup> couche :

$$K_2 A_2 \Delta X (\theta_{m2} - \theta_{m1}) - K_1 A_1 \Delta X (\theta_{m1} - \theta_{v2}) = m_1 \Delta X \cdot c_{p(m)} \frac{d\theta_{m1}}{dt} ; \text{ qui donne}$$

$$\frac{\partial \theta_{m1}}{\partial t} + \frac{K_1 A_1}{m_1 c_{p(m)}} (\theta_{m1} - \theta) - \frac{K_2 A_2}{m_1 c_{p(m)}} (\theta_{m2} - \theta_{m1}) = 0 \quad (\text{II.2})$$

2<sup>o</sup> couche :

$$K_3 A_3 \Delta X (\theta_{m3} - \theta_{m2}) - K_2 A_2 \Delta X (\theta_{m2} - \theta_{m1}) = m_2 \Delta X \cdot c_{p(m)} \frac{d\theta_{m2}}{dt} \Rightarrow$$

$$\frac{\partial \theta_{m2}}{\partial t} + \frac{K_2 A_2}{m_2 c_{p(m)}} (\theta_{m2} - \theta_{m1}) - \frac{K_3 A_3}{m_2 c_{p(m)}} (\theta_{m3} - \theta_{m2}) = 0 \quad (\text{II.3})$$

3<sup>o</sup> couche :

$$\dot{q} \Delta X - K_3 A_3 \Delta X (\theta_{m3} - \theta_{m2}) = m_3 \Delta X c_{p(m)} \frac{d\theta_{m3}}{dt}, \quad \text{elle donne :}$$

$$\frac{\partial \theta_{m3}}{\partial t} + \frac{K_3 A_3}{m_3 c_{p(m)}} (\theta_{m3} - \theta_{m2}) = \frac{\dot{q}}{m_3 c_{p(m)}} \quad (\text{II.4})$$



3. Prenons l'équation (II.a) et voyons ce qui se passera pour une particule.

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} + \frac{D}{m_v} \frac{\partial \theta_v}{\partial x} - \frac{KA}{c_{p(v)} m_v} (\theta_m - \theta_v) = 0 \dots \dots (II.a)$$

$$\frac{D}{m_v} \cdot \frac{[Kg/s]}{[Kg/m]} = v [m/s] \quad : \text{ vitesse de la vapeur.}$$

On aperçoit que  $\frac{\partial \theta_v}{\partial t} + v \frac{\partial \theta_v}{\partial x} = \frac{d\theta}{dt}$  ce qui décrit l'augmen-

tation de température d'une particule traversant le tube.

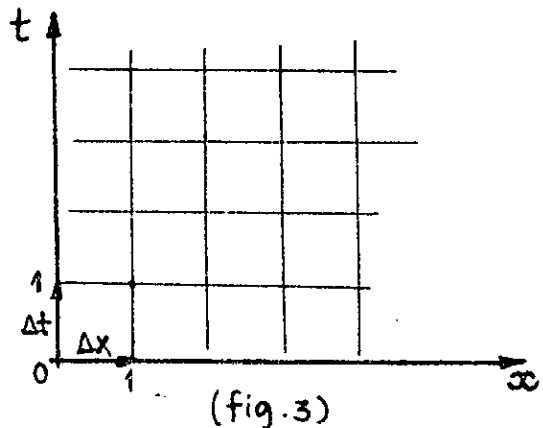
L'équation (II.a) devient :  $\frac{d\theta}{dt} - \frac{KA}{c_{p(v)} m_v} (\theta_m - \theta_v) = 0$  (II.a')

3.1 Pour résoudre le problème numériquement il faut remplacer les différentielles par des différences finies, ce qui exige un choix de grandeurs de ces différences finies.

Pour analyser ces grandeurs, nous considérons un cas simplifié : tube sans apport de chaleur ; c.a.d :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + v \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \dots (II.b)$$

En se reportant à la grille ci-contre, on posera :



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\theta_{t_0, x_1} - \theta_{t_0, x_0}}{\Delta x} \dots (1) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\theta_{t_1, x_1} - \theta_{t_0, x_1}}{\Delta t} \dots (2) \end{array} \right.$$

(1) et (2) dans (II.b):  $\theta_{t_1, x_1} = \theta_{t_0, x_1} - \Delta t \cdot \frac{v}{\Delta x} (\theta_{t_0, x_1} - \theta_{t_0, x_0}) \dots (3)$

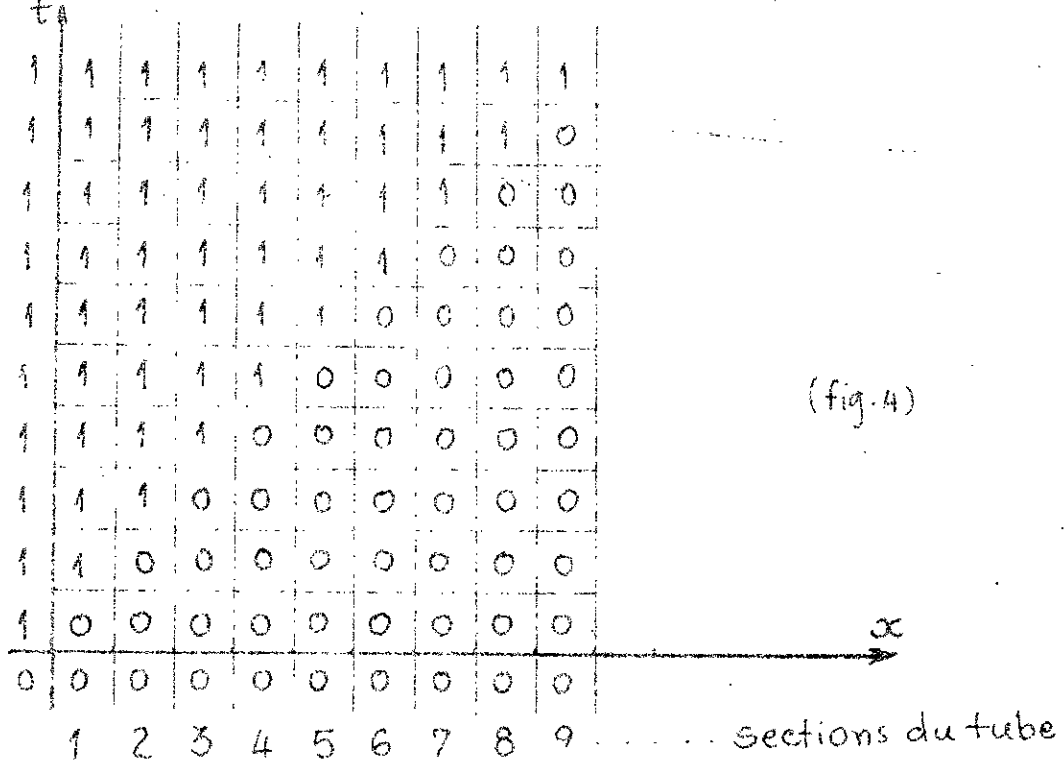
Pour montrer l'importance du rapport  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$  et pour un choix adéquat de ce rapport qui sera utilisé ultérieurement, nous considérons les 2 cas suivants :

1.  $\frac{\Delta x}{\Delta t} = v$

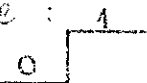
2.  $\frac{\Delta x}{\Delta t} \neq v$

Appliquons la méthode de la grille à ces 2 cas.

1.  $\frac{\Delta x}{\Delta t} = v$  ; l'équation (3) devient :  $\theta_{t_1, x_1} = \theta_{t_0, x_0}$ .



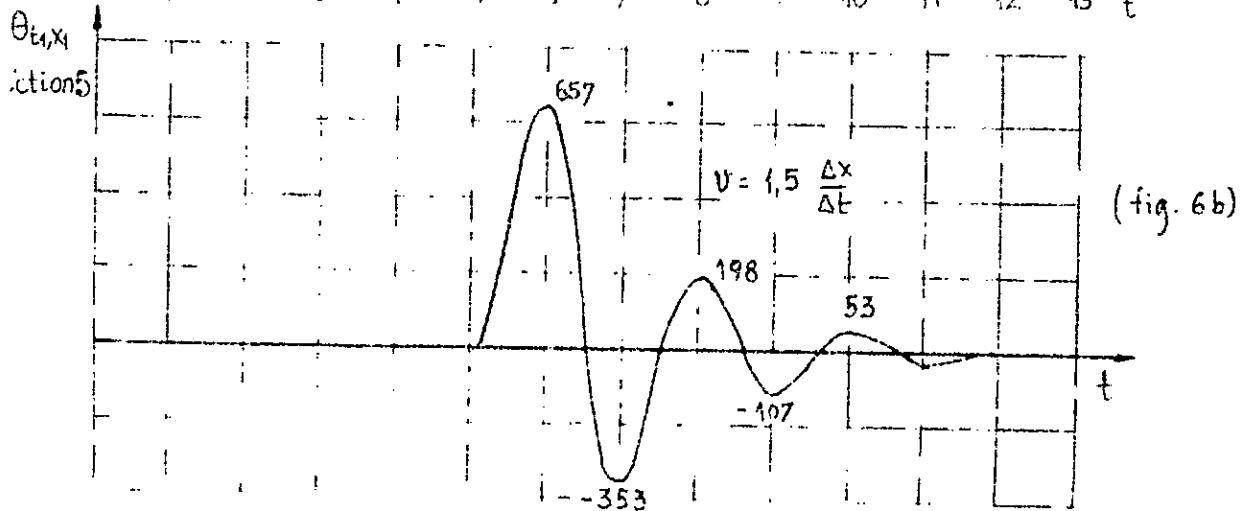
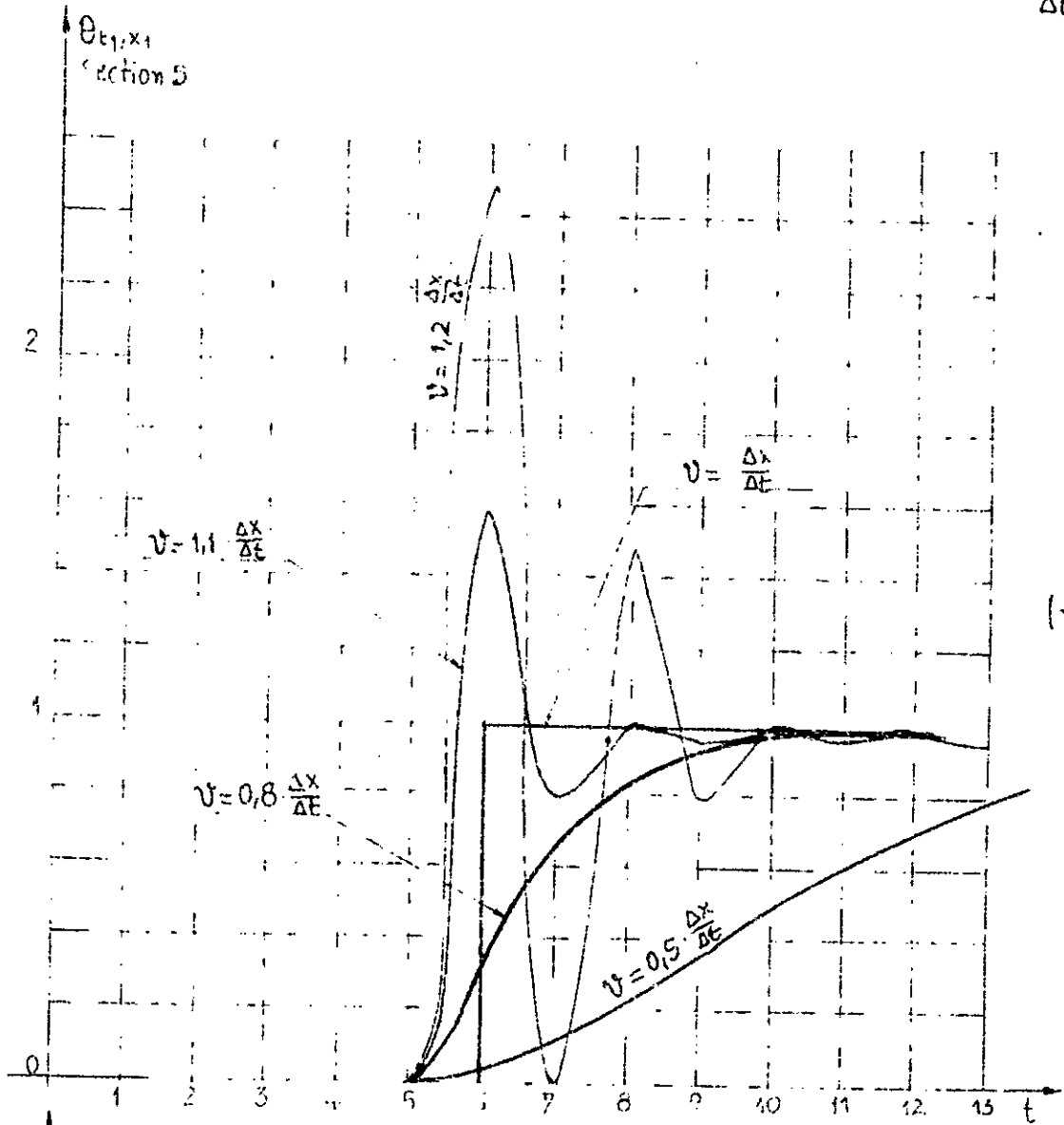
Nous remarquons que pour une entrée échelon (saut) on obtient à la sortie, pour toutes les sections et quel que soit le temps, un échelon (sortie saut):

Par exemple :  sera à la sortie pour la section 5 comme représenté sur la fig. 5 et ce après cinq unités de temps.



(fig. 5)

2.  $\frac{\Delta x}{\Delta t} \neq v$  et là nous distinguons :  $v > \frac{\Delta x}{\Delta t}$  et  $v < \frac{\Delta x}{\Delta t}$ .  
 nous avons choisi :  $v = (0,5, 0,8; 1,1; 1,2, 1,5, 2; 3) \frac{\Delta x}{\Delta t}$



0.1 x 10<sup>6</sup>  
Sections

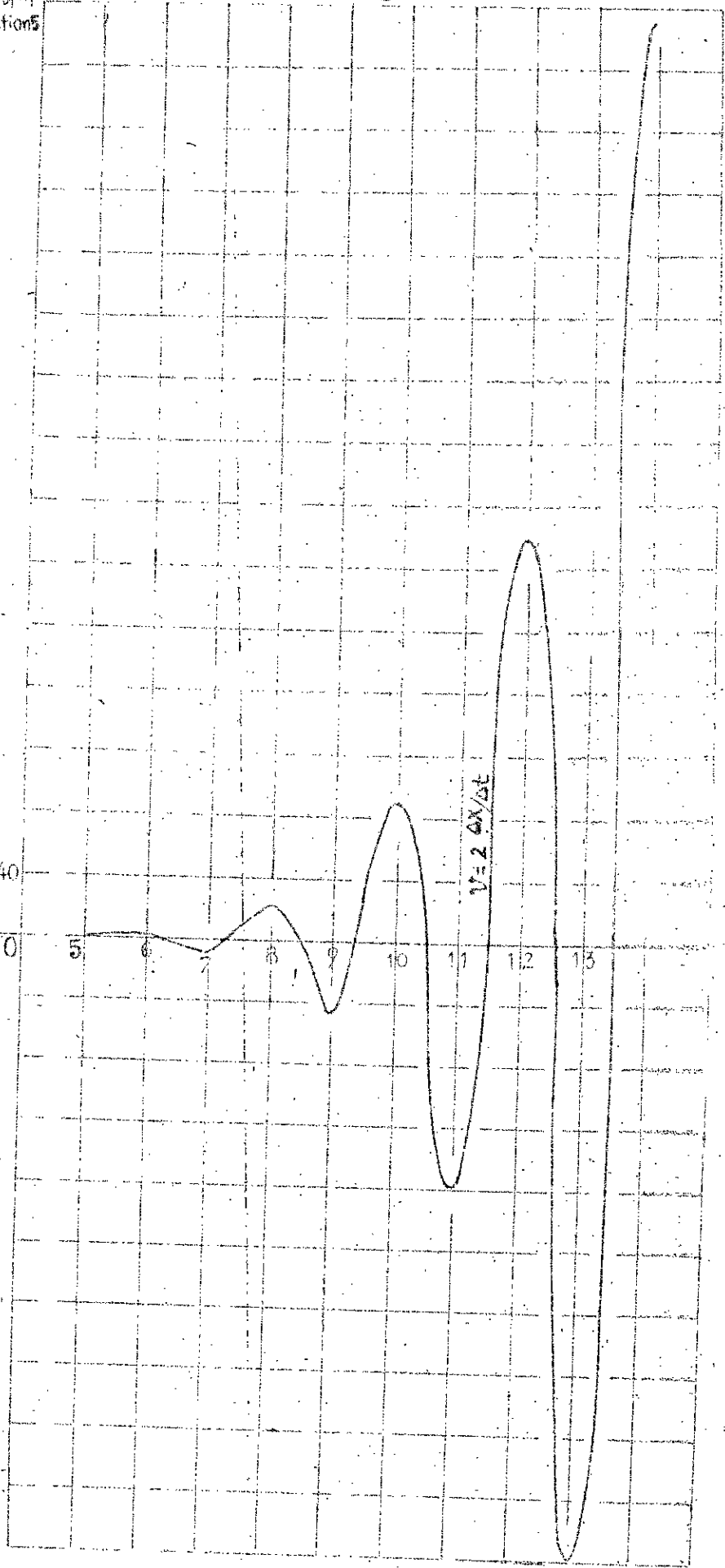
18.

2.6c)

640

0 5 6 7 8 9 10 11 12 13

$v = 2.6x/4t$



$v = 3 \frac{\Delta x}{\Delta t}$  : voici les réponses pour la 5<sup>e</sup> section.

t	6	7	8	9	10	11
$\theta_{t,x_1}$	243	-2487	12393	-55647	216513	763263

### 3.2 Stabilité de la solution numérique

On remarque :

1.  $v = 2 \frac{\Delta x}{\Delta t}$  (fig. 6c) : L'amplitude de la courbe  $\theta_{t,x_1}$  a tendance à augmenter, et est de même pour le cas  $v = 3 \frac{\Delta x}{\Delta t}$  où l'augmentation s'accroît fortement ce qui caractérise l'instabilité de la solution.

2.

2.  $\frac{\Delta x}{\Delta t} < v < 2 \frac{\Delta x}{\Delta t}$  (fig. 6a et 6b)

On a toujours des oscillations mais contrairement au cas précédent, elles sont amorties après un certain temps.

3.  $v < \frac{\Delta x}{\Delta t}$  (fig. 6a)

Là, on a comme réponse un signal relativement allongé.

les cas 2 et 3 présentent une solution stable mais donnent une réponse très lente.

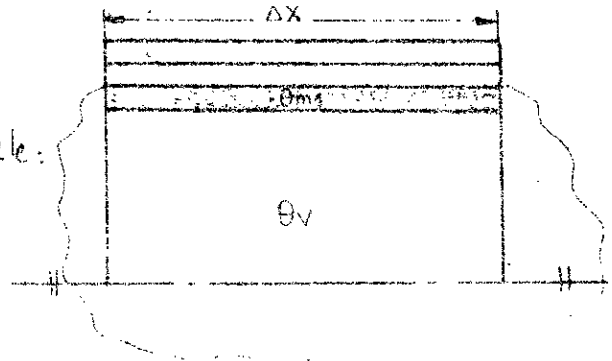
Il reste le seul cas  $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$  (fig. 6a) où le signal échelon à l'entrée est conservé à tout moment et pour toutes les cellules du tube.

Ce cas donne un état de stabilité convenable et une réponse très rapide et c'est ce rapport ( $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ ) qui sera pris en considération et adopté pour la suite du calcul.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

4. Reprenons la cellule déjà étudiée (fig. 7) et considérons uniquement la couche (1) du métal et la section correspondante de vapeur.

4.1. on a pour une particule:



$$\frac{d\theta_v}{dt} = \frac{AK_1}{m_v C_{p(v)}} (\theta_{m_1} - \theta_v) \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_{m_1}}{dt} = - \frac{AK_1}{m_1 C_{p(m)}} (\theta_{m_1} - \theta_v) \quad (2)$$

(fig. 7)

$$(2) - (1) : \frac{d(\theta_{m_1} - \theta_v)}{dt} = - (\theta_{m_1} - \theta_v) \left( \frac{AK_1}{m_1 C_{p(m)}} + \frac{AK_1}{m_v C_{p(v)}} \right)$$

En posant :  $(\theta_{m_1} - \theta_v) = \Delta\theta$ .

$$\frac{AK_1}{m_1 C_{p(m)}} = \frac{1}{T_m} \quad (s^{-1}) \quad \dots (a)$$

$$\frac{AK_1}{m_v C_{p(v)}} = \frac{1}{T_v} \quad (s^{-1}) \quad \dots (b)$$

(a)+(b) ⇒

$$\frac{1}{T_m} + \frac{1}{T_v} = \frac{1}{T_{mv}} \quad ; \quad T_{mv} : \text{constante de temps.}$$

On obtient alors :

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} + \frac{1}{T_{mv}} \Delta\theta = 0 \quad (II.5)$$

Cette équation différentielle a pour résolution :

$$\Delta\theta = c e^{-\frac{t}{T_{mv}}}$$

pour  $t=0$   $c = (\Delta\theta)_0$  d'où :

$$\Delta\theta = (\Delta\theta)_0 e^{-\frac{t}{T_{mv}}} \quad (II.6)$$

4.2 calcul de certaines constantes.

4.2.1 calcul de  $S_v$ .

$S_v$  sera calculé à partir du volume massique ( $v$ ) tel que :

$$S_v = \frac{1}{v}$$

On prendra une pression moyenne de 136 bars et une température moyenne de 515 °c pour la détermination de  $S_v$ .

Les tables donnent  $v$  pour les pressions 130 et 140 bars et les températures 480 °c et 550 °c.

	480 °c	550 °c
P = 140 bars	v = 0,0216	= 0,02474 $\frac{m^3}{kg}$
P = 130 bars	= 0,02353	= 0,02685 --

faisons une interpolation pour la température.

P = 140 bars                       $\theta = 515^\circ c$

$$v = 0,0216 + \frac{35}{70} (0,02474 - 0,0216) = 0,02317 \frac{m^3}{kg}$$

P = 130 bars                       $\theta = 515^\circ c$

$$v = 0,02353 + \frac{35}{70} (0,02685 - 0,02353) = 0,02519 \frac{m^3}{kg}$$

$v$  final sera obtenu par une interpolation de la pression et pour P = 136 bars on obtient :

$$v = 0,02519 + \frac{6}{10} (0,02317 - 0,02519) = 0,023978 \frac{m^3}{kg}$$

$$S_v = \frac{1}{v} = 41,7 \frac{kg}{m^3}$$

4.2.2 Calcul de la chaleur spécifique de la vapeur  $C_{p(v)}$ .

On procédera de la même manière que pour le calcul

de  $g_v$  c.a.d par interpolation.

On a que  $\Delta H = c_p \Delta \theta$  ; H: Enthalpie

	480°C	550°C	
P = 140 bars	H = 779,5	825,9	$\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$
P = 130 bars	= 782,9	828,4	- " -

P = 140 bars  $c_p = \frac{\Delta H}{\Delta \theta} = \frac{825,9 - 779,5}{550 - 480} = 0,662857 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg.K}}$

P = 130 bars  $c_p = 0,65 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg.K}}$

par interpolation de la pression on obtient:

P = 136 bars avec :

$$c_p = 0,65 + \frac{6}{10} (0,663 - 0,65) = 0,6577 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg.K}}$$

$$c_{p_v} = 2,7545 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg.K}}$$

$c_p$  est le même pour les différentes charges de la chaudière.

#### 4.2.3 Calcul des coefficients de transmission.

A Calcul de  $K_1$

On utilise la formule suivante :

$$R_1 = \frac{1}{K_1} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{\alpha d} + \frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{d+2}{d} \right)$$

1- charge 100% :

$$\alpha = 0,93 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \text{h}^\circ\text{C}} ; \lambda_m = 0,03483 \frac{\text{Kw}}{\text{m.K}} ; d = 20 \text{ mm.}$$

A.N :  $K_1 = 0,22077 \frac{\text{Kw}}{\text{m.K}}$



2. charge 75%.

$$\alpha = 0,735 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}} ; \lambda_m = 0,03483 \frac{\text{Kw}}{\text{m} \cdot \text{K}} ; d = 20 \text{ mm.}$$

A.N :  $K_1 = 0,178069 \frac{\text{Kw}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

3. charge 60%.

$$\alpha = 0,615 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}} ; \lambda_m = 0,03483 \frac{\text{Kw}}{\text{m} \cdot \text{K}} ; d = 20 \text{ mm.}$$

A.N :  $K_1 = 0,150907 \frac{\text{Kw}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

B. Calcul de  $K_2$

$$R_2 = \frac{1}{K_2} = \frac{1}{2\pi\lambda_m} \ln \frac{26}{22} = 0,7625 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{Kw}}$$

$$K_2 = 1,31139 \frac{\text{Kw}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

C. Calcul de  $K_3$ .

$$R_3 = \frac{1}{K_3} = \frac{1}{2\pi\lambda_m} \ln \frac{30}{26} = 0,6532 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{Kw}}$$

$$K_3 = 1,5309 \frac{\text{Kw}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

4.2.4. Calcul des masses.

$$m = \rho \cdot V.$$

a) Vapeur.

$$m_v = \rho_v \cdot V_v ; V_v = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \Delta x.$$

$$\rho_v = 41,7 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

A.N :  $m_v = 41,7 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 20^2 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta x$

b) Métal

$$m_1 = \rho_m V_{m1} = \rho_m \frac{\pi}{4} \left( (d+4)^2 - d^2 \right) \cdot \Delta x$$

A.N :  $m_1 = 7850 \cdot \frac{\pi}{4} (24^2 - 20^2) \cdot 10^{-6} \Delta x$  (Kg)

$$m_2 = \rho_m V_{m2} = \rho_m \frac{\pi}{4} \left( (d+8)^2 - (d+4)^2 \right) \cdot \Delta x$$

A.N :  $m_2 = 7850 \cdot \frac{\pi}{4} (28^2 - 24^2) \cdot 10^{-6} \Delta x$  (Kg)

$$m_3 = \rho_m V_{m3} = \rho_m \frac{\pi}{4} \left( (d+12)^2 - (d+8)^2 \right) \cdot \Delta x$$

A.N :  $m_3 = 7850 \cdot \frac{\pi}{4} (32^2 - 28^2) \cdot 10^{-6} \Delta x$  (Kg)

#### 4.25 Calcul des surfaces internes.

$$A_i = \pi \cdot d_i \cdot \Delta x.$$

a) Vapeur :

$$A_1 = A_v = \pi \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta x.$$

b) Métal :

$$A_2 = \pi \cdot 24 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta x$$

$$A_3 = \pi \cdot 28 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta x$$

#### 4.3 Calcul des constantes de temps $T_{mv}$ et $T_{m1,m2}$ .

##### 4.3.1 calcul de $T_{mv}$ (charge 100%).

$$\frac{1}{T_v} = \frac{A_1 K_1}{m_v c_{p_v}}$$

A.N :  $\frac{1}{T_v} = 0,384407 \text{ s}^{-1}$

$$\frac{1}{T_{m1}} = \frac{A_1 K_1}{m_1 c_{p_m}}$$

A.N :  $\frac{1}{T_{m1}} = 0,021071 \text{ s}^{-1}$

$$\frac{1}{T_v} + \frac{1}{T_{m1}} = \frac{1}{T_{mv}} = 0,405478 \text{ s}^{-1} \Rightarrow T_{mv} = 2,466 \text{ s.}$$

4.3.2 Calcul de  $T_{m,m2}$ : (charge 100%)

$$\frac{1}{T_{m2}} = \frac{A_2 K_2}{m_2 c p_m} \quad \text{A.N : } \frac{1}{T_{m2}} = 0,1270897 \text{ s}^{-1}$$

$\frac{1}{T_{m1}}$  étant connu on obtient :  $\frac{1}{T_{m,m2}} = 0,14816 \text{ s}^{-1}$

$$T_{m,m2} = 6,74942 \text{ s}$$

4.3.3  $\frac{T_{mv}}{T_{m,m2}} = 0,36$  ; c.a.d  $T_{m,m2} > T_{mv}$ .

On a :  $\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta}{T} \Rightarrow \frac{d\theta}{\theta} = \frac{dT}{T}$  ; T : constante de temps.

si on pose :

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta T}{T_{mv}}$$

$\theta$  représente ici une différence :

1.  $\theta = \theta_{m1} - \theta_v$
2.  $\theta = \theta_{m2} - \theta_{m1}$

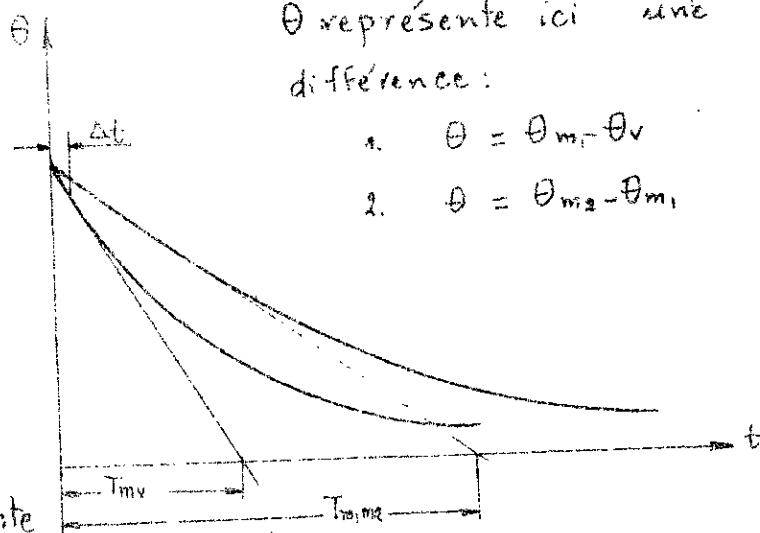
et si  $\Delta t$  est constant :

$$\frac{\Delta\theta}{\theta}(T_{mv}) < \frac{\Delta\theta}{\theta}(T_{m,m2})$$

On pourra conclure que plus la constante de temps augmente plus petite est

l'erreur relative  $\frac{\Delta\theta}{\theta}$  et donc le résultat obtenu sera plus précis.

On prendra pour constante de temps  $T_{mv}$  ;  $\Delta t$  ainsi choisi conviendra bien pour les autres constantes de temps.



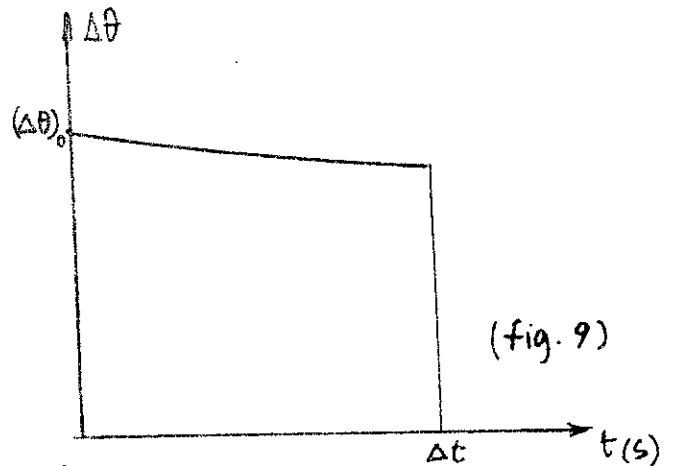
(fig. 8)

4.4. Comme on avait déjà vu, l'équation différentielle (II.5) avait pour solution l'équation (II.6); celle-ci appelée solution exacte (exponentielle) et a l'allure suivante.

$$\Delta\theta = (\Delta\theta)_0 e^{-\frac{t}{T_{mv}}}$$

$$t=0 \quad \Delta\theta = (\Delta\theta)_0 = 1$$

$$t = \Delta t \quad \Delta\theta = 0,97438092$$



les équations (1) et (2), à savoir;

$$\frac{d\theta_v}{dt} = \frac{A_1 K_1}{m_v c_{p_v}} (\theta_{m_1} - \theta_v) \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_{m_1}}{dt} = -\frac{A_1 K_1}{m_1 c_{p_m}} (\theta_{m_1} - \theta_v) \quad (2)$$

possèdent en plus de la solution exacte une solution approchée dite méthode numérique de 2<sup>e</sup> ordre et qui se résume en trois étapes qui sont les suivantes:

$$a) \quad \theta_{m_1} \left( \frac{\Delta t}{2} \right) = \frac{d\theta_{m_1}}{dt} \cdot \frac{\Delta t}{2} + \theta_{m_1}(0) \quad (3)$$

$$\theta_v \left( \frac{\Delta t}{2} \right) = \frac{d\theta_v}{dt} \cdot \frac{\Delta t}{2} + \theta_v(0) \quad (4)$$

$\theta_{m_1}(0)$  et  $\theta_v(0)$  sont respectivement les températures initiales du métal et de la vapeur.

(3) et (4) deviennent:

$$\theta_{m_1} \left( \frac{\Delta t}{2} \right) = -\frac{A_1 K_1}{m_1 c_{p_m}} (\theta_{m_1}(0) - \theta_v(0)) \cdot \frac{\Delta t}{2} + \theta_{m_1}(0) \dots (5)$$

$$\theta_v \left( \frac{\Delta t}{2} \right) = \frac{A_1 K_1}{m_v c_{p_v}} (\theta_{m_1}(0) - \theta_v(0)) \cdot \frac{\Delta t}{2} + \theta_v(0) \dots (6)$$

b) On injectera (5) et (6) dans (1) et (2) :

$$(7) \dots \frac{d\theta_{m1}}{dt} = -\frac{A_1 K_1}{m_1 c_{p_m}} \left\{ \left[ \theta_{m1}(0) - \frac{A_1 K_1}{m_1 c_{p_m}} (\theta_{m1}(0) - \theta_v(0)) \cdot \frac{\Delta t}{2} \right] - \left[ \theta_v(0) + \frac{A_1 K_1}{m_v c_{p_v}} (\theta_{m1}(0) - \theta_v(0)) \cdot \frac{\Delta t}{2} \right] \right\}$$

$$(8) \dots \frac{d\theta_v}{dt} = \frac{A_1 K_1}{m_v c_{p_v}} \left\{ \left[ \theta_{m1}(0) - \frac{A_1 K_1}{m_1 c_{p_m}} (\theta_{m1}(0) - \theta_v(0)) \cdot \frac{\Delta t}{2} \right] - \left[ \theta_v(0) + \frac{A_1 K_1}{m_v c_{p_v}} (\theta_{m1}(0) - \theta_v(0)) \cdot \frac{\Delta t}{2} \right] \right\}$$

$$c) \quad \theta_{m1}(\Delta t) = \theta_{m1}(0) + \frac{d\theta_{m1}}{dt} \cdot \Delta t \quad \dots \dots (9)$$

$$\theta_v(\Delta t) = \theta_v(0) + \frac{d\theta_v}{dt} \cdot \Delta t \quad \dots \dots (10)$$

(7) dans (9) :

$$\begin{aligned} \theta_{m1}(\Delta t) &= \theta_{m1}(0) + \left\{ \left[ \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{A_1 K_1}{m_1 c_{p_m}} + \frac{A_1 K_1}{m_v c_{p_v}} \right) - 1 \right] [\theta_{m1}(0) - \theta_v(0)] \right\} \cdot \frac{A_1 K_1}{m_1 c_{p_m}} \cdot \Delta t \\ &= \theta_{m1}(0) + \left[ \left( \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{1}{T_{mv}} - 1 \right) (\theta_{m1}(0) - \theta_v(0)) \right] \frac{1}{T_m} \cdot \Delta t \quad \dots \dots (11) \end{aligned}$$

(8) dans (10) :

$$\theta_v(\Delta t) = \theta_v(0) - \left[ \left( \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{1}{T_{mv}} - 1 \right) (\theta_{m1}(0) - \theta_v(0)) \right] \cdot \frac{\Delta t}{T_v} \quad \dots \dots (12)$$

En posant  $\theta_{m1}(\Delta t) - \theta_v(\Delta t) = \Delta\theta$  et  
 $\theta_{m1}(0) - \theta_v(0) = (\Delta\theta)_0$  .

(11) - (12) donne :

$$\Delta\theta = (\Delta\theta)_0 + \Delta t \left[ \left( \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{1}{T_{mv}} - 1 \right) (\Delta\theta)_0 \right] \frac{1}{T_{mv}}$$

$$= (\Delta\theta)_0 \left[ 1 + \frac{\Delta t}{T_{mv}} \left( \frac{\Delta t}{2 T_{mv}} - 1 \right) \right]$$

$$\Delta\theta = (\Delta\theta)_0 \left[ 1 + \frac{\Delta t^2}{2 T_{mv}^2} - \frac{\Delta t}{T_{mv}} \right] \quad \dots \dots (II.7)$$

4.5. Des différentes méthodes de résolution des équations (1) et (2) on a choisi les solutions exacte et approchée de 2<sup>e</sup> ordre que voici :

$$\Delta\theta = (\Delta\theta)_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_{mv}}} \quad (\text{II.6})$$

$$\Delta\theta = (\Delta\theta)_0 \cdot \left[ 1 - \frac{\Delta t}{T_{mv}} + \frac{\Delta t^2}{2 T_{mv}^2} \right] \dots (\text{II.7})$$

#### 4.5.1. Détermination de $\Delta t$ .

posons  $(\Delta\theta)_0 = 1$  et adoptons un  $\Delta t = 0,064\text{s}$  celui-ci sera vérifié après calcul de l'erreur des deux solutions.

(II.6) donne pour  $T_{mv} = 2,466\text{s}$  une valeur de

$$\Delta\theta = 0,97438092$$

quant à l'équation (II.7) elle donne :

$$\Delta\theta = 0,97428113$$

ce qui donne l'erreur :

$$\frac{0,97438092 - 0,97428113}{0,97438092} = 0,01\%$$

Cette erreur négligeable laisse dire que pour le  $\Delta t$  considéré les deux équations (II.6) et (II.7) donnent des résultats confondus ce qui confirme la précision de ce pas de temps ( $\Delta t$ ) choisi, celui-ci sera adopté pour la suite du calcul. Signalons toutefois qu'une erreur voisine de 1% peut-être tolérée.

$$\Delta t = 0,064\text{s}$$

4.5.2 Calcul de  $\Delta X$ .

on avait adopté le rapport  $\frac{\Delta X}{\Delta t} = v$ .

$\Delta t$  étant déterminé, il nous reste à calculer  $v$  suivant la relation :

$$v = \frac{D}{m_v}$$

$D$ : Débit de vapeur (Kg/s)

$m_v$ : masse unitaire de vap. (Kg/m)

a) Charge 60%.

$$D = 390 \text{ t/h} = 108,333 \text{ Kg/s}$$

$$m_v = \rho_v \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot l = 41,7 \cdot \frac{\pi \cdot 20^2}{4} \cdot 10^{-6} \cdot 1$$

A.N.  $v = 12,09 \text{ m/s}$ .

b) Charge 75%

$$D = 490 \text{ t/h} = 136,111 \text{ Kg/s}$$

$m_v$  le même que pour la charge 60%

A.N.  $v = 15,19 \text{ m/s}$ .

c) Charge 100%.

$$D = 650 \text{ t/h} = 180,555 \text{ Kg/s}$$

$m_v$  déjà calculé

A.N.  $v = 20,15 \text{ m/s}$ .

charge 60%  $\Delta X = 0,77 \text{ m}$

charge 75%  $\Delta X = 0,97 \text{ m}$

charge 100%  $\Delta X = 1,289 \text{ m}$ .

## CHAPITRE III

COMPOTEMENT DYNAMIQUE DU SURCHAUFFEUR  
CONCEPTION DE REGULATION

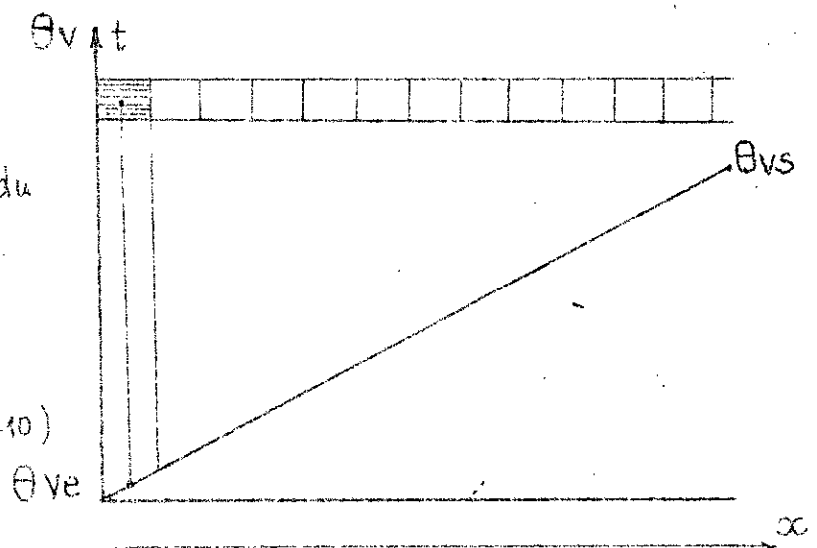
1- L'étude du comportement dynamique d'un surchauffeur est tellement complexe qu'on est obligé de faire le calcul dynamique par ordinateur pour les diverses charges de la chaudière déjà citées. \*

Le programme de calcul comportera deux grandes parties à savoir les conditions initiales et le calcul dynamique.

La première partie (conditions initiales) est scindée en deux approximations.

1.1 1<sup>re</sup> Approximation.

En supposant une répartition uniforme du flux, on admet que l'augmentation de la température le long du tube est linéaire (fig 10)



(fig. 10)

L'augmentation de la température sera :

$$\Delta \theta_v = \frac{q \cdot x}{D \cdot c_p \cdot K} \quad \text{--- (III.1) ;}$$

K : nombre de trancions du tube  
(  $K = \frac{26}{\Delta x}$  )



On a que:  $D = \frac{x}{K} \cdot \frac{A \cdot S}{\Delta t}$  et

$$c_{p_v} \cdot A \cdot S_v \cdot 1 = c_{p_v} \cdot m_v$$

Ces 2 relations remplacées dans (III.1) donnent:

$$\Delta \theta_v = \frac{\dot{q}_v \cdot \Delta t}{m_v c_{p_v}} \quad (\text{III.2})$$

Cette deuxième approximation (III.2) est meilleure que la première qui comportait  $K$ ; celui-ci résulte d'une division non exacte de la longueur du tube par le pas  $\Delta x$  et une fois arrondi influe sur l'approximation (III.1).

### 1.2. Calcul du nombre de tronçons $K$ .

$$K = \frac{l}{\Delta x} = \frac{x}{\Delta x}; \quad x \equiv l: \text{longueur du tube.}$$

charge 60% :

$$K = \frac{26}{0,77} = 33,76$$

arrondi à 34 :  $K = 34$

charge 75% :

$$K = \frac{26}{0,97} = 26,8$$

$K = 27$

charge 100%

$$K = \frac{26}{1,289} = 20,1$$

$K = 20$ .

### 1.3. 2° Approximation

Dans cette partie on prendra les étapes de la méthode numérique déjà vue (chapitre précédent) comme approximation qui est d'ailleurs bonne car

elle donne un résultat vraiment proche de celui de la solution exacte.

Ces trois étapes appliquées aux trois couches de métal et à celle de la vapeur formeront les équations de notre calcul principal.

A ces équations on appliquera un certain nombre d'itérations pour avoir des valeurs presque stables et presque exactes des températures des différentes couches de métal et celle de la vapeur.

Elles seront alors préparées pour le calcul dynamique.

1.4. La seconde partie qui est le calcul dynamique est caractérisée par la perturbation de la température d'entrée de la vapeur, l'intervention du temps et le calcul des équations préparées dans la première partie pour obtenir finalement la température finale ou de sortie de la vapeur.

## 2. Description du programme

### 2.1. Variables.

2.1.1. Entiers :

- I : Index de comptage des trancos le long de x
- K : Nombre de trancos
- M : ——— d'itérations de l'approximation  
M = 1, Max.
- N : Nombre de pas de temps ; N = NIN, NAX.

### 2.1.2. Tableaux :

TV (50)	:	température de la vapeur.
TM1 (50)	"	de la 1 <sup>o</sup> couche de métal
TM2 (50)	"	" " 2 <sup>o</sup> " " "
TM3 (50)	"	" " 3 <sup>o</sup> " " "

2.13 Réels :

CM	: $C_{p_m}$	: chaleur spécifique du métal	$\frac{KJ}{kg \cdot K}$
CV	: $C_{p_v}$	: " " de la vapeur	" "
D	: D	: Débit de vapeur	kg/s
DT	: $\Delta t$	: pas de temps	s
DTV	: $\Delta \theta_v$	: Augmentation de la $t^\circ$ dans un traron	$^\circ C$
Q	: $\dot{q}$	: flux de chaleur (unitaire)	$\frac{KW}{m}$
R1	: $R_1$	: Résistance thermique globale ( $\frac{1}{K_1}$ ) entre la couche de vap. et la 1 <sup>re</sup> couche de métal	$\frac{m \cdot K}{KW}$
R2	: $R_2$	: Résistance thermique ( $\frac{1}{K_2}$ ) entre les couches de métal 1 et 2.	$\frac{m \cdot K}{KW}$
R3	: $R_3$	: Résistance thermique ( $\frac{1}{K_3}$ ) entre les couches de métal 2 et 3.	$\frac{m \cdot K}{KW}$
T	: t	: temps	s
TVE	: $\theta_{ve}$	: $t^\circ$ de la vap. à l'entrée du surchauffeur	$^\circ C$
TVE1	: $\theta_{ve1}$	: " " " " " " " " " "	$^\circ C$
TV1	: $\theta_{v1}$	: $t^\circ$ de la première section de vapeur	$^\circ C$
TM1	: $\theta_{m1}$	: $t^\circ$ de la première couche de métal	$^\circ C$
TM2	: $\theta_{m2}$	: " " " deuxième " " "	$^\circ C$
TM3	: $\theta_{m3}$	: " " " troisième " " "	$^\circ C$
VCV	: $m_v C_{p_v}$	: Volume calorifique de la vapeur	$\frac{KJ}{K \cdot m}$
VCM1	: $m_1 C_{p_m}$	: " " " " première couche de métal	$\frac{KJ}{K \cdot m}$
VCM2	: $m_2 C_{p_m}$	: Volume calorifique de la deuxième couche de métal.	$\frac{KJ}{K \cdot m}$
VCM3	: $m_3 C_{p_m}$	: Volume calorifique de la troisième couche de métal	$\frac{KJ}{K \cdot m}$
X	: l	: longueur du tube.	$\frac{KJ}{K \cdot m}$
TVS	: $\theta_{vs}$	: température de sortie de la vapeur	$^\circ C$ .

2.2 PROGRAMME

MASTER BENBRAÏKA  
GENIE - MECANIQUE

Commentaire

```
DIMENSION TV(50) , TM1(50) , TM2(50) , TM3(50)
READ (5,100) K, KIK, MAX, NIN, NAX
WRITE (6,100) K, KIK, MAX, NIN, NAX
READ (5,102) CV, D, DT, Q, R1
WRITE (6,102) CV, D, DT, Q, R1
READ (5,102) R2, R3, TVE, TVE1, VCV
WRITE (6,102) R2, R3, TVE, TVE1, VCV
READ (5,102) VCM1, VCM2, VCM3, X
WRITE (6,102) VCM1, VCM2, VCM3, X
100 FORMAT (5I16)
102 FORMAT (5F16.6)
```

Lecture et impression  
des données

Déclaration des données

```
DTV = Q * DT / VCV
TV(2) = .5 * DTV + TVE
TM1(2) = TV(2) + R1 * Q
TM2(2) = TM1(2) + R2 * Q
TM3(2) = TM2(2) + R3 * Q
K2 = K + 1
DØ 10 I = 3, K2
TV(I) = TV(I-1) + DTV
TM1(I) = TM1(I-1) + R1 * Q
TM2(I) = TM2(I-1) + R2 * Q
TM3(I) = TM3(I-1) + R3 * Q
```

Première approximation

10 CONTINUE

$$TV(1) = TVE$$

$$D\phi \ 12 \quad I = 2, K2$$

$$D\phi \ 12 \quad M = 1, MAX$$

$$TV0 = TV(I-1)$$

$$TM10 = TM1(I)$$

$$TM20 = TM2(I)$$

$$TM30 = TM3(I)$$

$$TV1 = TV0 + (TM10 - TV0) * DT / (2 * R1 * VCV)$$

$$TM11 = TM10 + ((TV0 - TM10) / R1 + (TM20 - TM10) / R2) * DT / (2 * VCM1)$$

$$TM21 = TM20 + ((TM10 - TM20) / R2 + (TM30 - TM20) / R3) * DT / (2 * VCM2)$$

$$TM31 = TM30 + (Q + (TM20 - TM30) / R3) * DT / (2 * VCM3)$$

$$TV(I) = TV0 + (TM11 - TV1) * DT / (R1 * VCV)$$

$$TM1(I) = TM10 + ((TV1 - TM11) / R1 + (TM21 - TM11) / R2) * DT / VCM1$$

$$TM2(I) = TM20 + ((TM11 - TM21) / R2 + (TM31 - TM21) / R3) * DT / VCM2$$

$$TM3(I) = TM30 + (Q + (TM21 - TM31) / R3) * DT / VCM3$$

12 CONTINUE

$$K1 = 0$$

$$D\phi \ 13 \quad N = 1, MAX$$

$$IF (N - NiN) \quad 4, 5, 4$$

$$5 \quad TVE = TVE1$$

← mmmmm perturbation

4 CONTINUE

$$T = N * DT$$

$$TV(1) = TVE$$

$$D\phi \ 14 \quad I = 2, K2$$

$$TV0 = TV(I-1)$$

$$TM10 = TM1(I)$$

$$TM20 = TM2(I)$$

$$TM30 = TM3(I)$$

Deuxième approximation

Calcul principal

$$TV1 = TV0 + (TM10 - TV0) * DT / (2 * R1 * VCV)$$

$$TM11 = TM10 + ((TV0 - TM10) / R1 + (TM20 - TM10) / R2) * DT / (2 * VCM1)$$

$$TM21 = TM20 + ((TM10 - TM20) / R2 + (TM30 - TM20) / R3) * DT / (2 * VCM2)$$

$$TM31 = TM30 + (Q + (TM20 - TM30) / R3) * DT / (2 * VCM3)$$

$$TV(I) = TV0 + (TM11 - TV1) * DT / (R1 * VCV)$$

$$TM1(I) = TM10 + ((TM11 - TM21) / R1 + (TM21 - TM11) / R2) * DT / VCM1$$

$$TM2(I) = TM20 + ((TM21 - TM11) / R2 + (TM31 - TM21) / R3) * DT / VCM2$$

$$TM3(I) = TM30 + (Q + (TM21 - TM31) / R3) * DT / VCM3$$

14 CONTINUE

Calcul principal

K1 = K1 + 1

IF (K1 - KIK) 13, 2, 2

2 WRITE (6, 101) T, TV(K+1)

101 FORMAT (3H T=, F7.2, 1HS, 6X, 5H TV=, F8.3

K1 = 0

13 CONTINUE

Impression

STOP

END

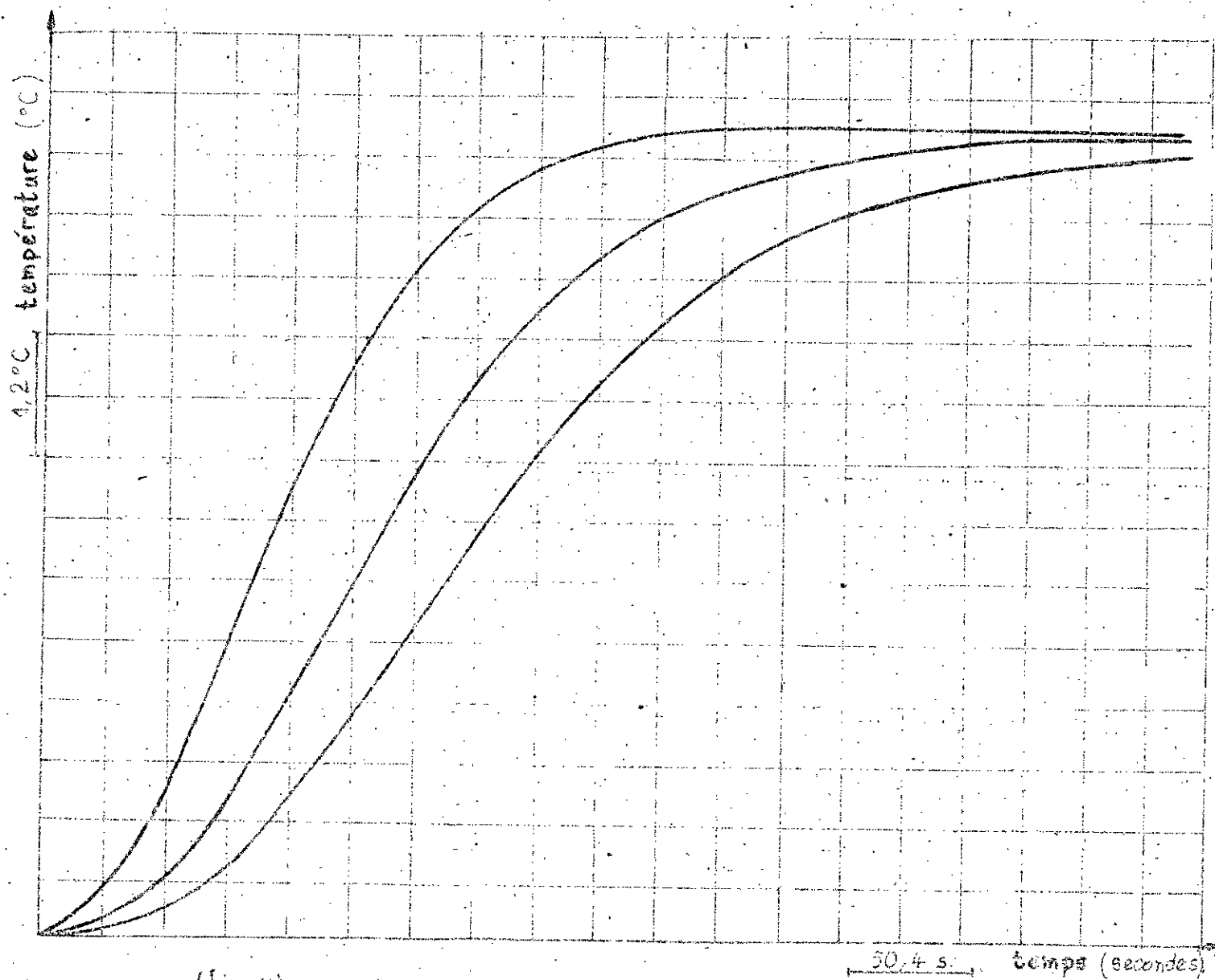
2.3 Tableau de données :

Charge :	60 %	75 %	100 %
Données			
K	34	27	20
KiK	10	10	10
MAX	50	50	30
NiN	467	467	467
NAX	5600	5600	5000
CV	2,7545	2,7545	2,7545
D	108,333	136,111	180,555
DT	0,064	0,064	0,064
Q	0,75	1,04488	1,55359
R1	6,626589	5,615795	4,529599
R2	0,7625	0,7625	0,7625
R3	0,6532	0,6532	0,6532
TVE	496	491	486
TVE1	504	499	494
VCV	0,036085	0,036085	0,036085
VCM1	0,6583	0,6583	0,6583
VCM2	0,778005	0,778005	0,778005
VCM3	0,897698	0,897698	0,897698
X	26,0	26,0	26,0





27.



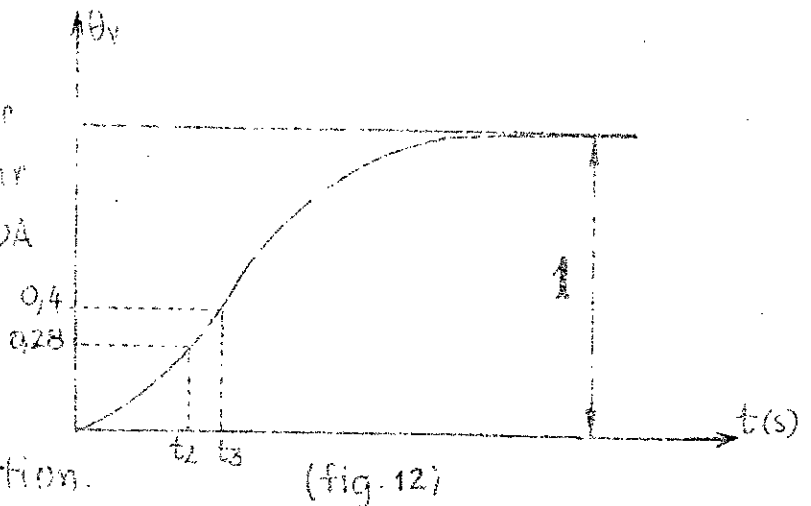
(fig. 14) RÉPONSES INDICIELLES

### 3. Interprétation des résultats.

3.1 les réponses du calcul dynamique sont représentées en courbes sur la (fig. 11), ces courbes sont appelées réponses indicielles.

Ci-contre une réponse indicielle, identifiée par la méthode de V. BROÏDA pour le calcul

d'action des régulateurs et la détermination des boucles de régulation.



La fonction de transfert de cette courbe s'écrit comme une suite infinie de fonctions exponentielles.

En lui appliquant l'approximation de V. BROÏDA qui admet que cette fonction du  $n^{\text{ième}}$  ordre peut être assimilée à une fonction du 1<sup>er</sup> ordre suivie d'un temps mort.

Donc pour un membre d'inertie avec une constante de temps  $\theta$  et un temps mort  $a$ , il suffit de relever les temps  $t_2$  et  $t_3$  de la courbe (fig. 11) et faire les correspondances suivantes :

$$a \# 2,8 t_2 - 1,8 t_3$$

$$\theta \# 5,5 (t_3 - t_2).$$

L'efficacité de la régulation est directement liée au rapport  $\frac{\theta}{a}$ . Si ce rapport est défavorable ( $\frac{\theta}{a} \approx 1$ )

la régulation tend à devenir inexistante ou très lâche, on est obligé alors d'avoir recours à une solution spéciale qui est dans notre cas :  
la solution "cascade".

### 3.2 Application à notre cas.

a) charge nominale 100%

La courbe relative à cette charge donne:

$$t_2 = 82 \text{ s} \quad ; \quad t_3 = 94 \text{ s}$$

d'où la constante de temps :  $\theta = 5,5(t_3 - t_2) = 60 \text{ s}$ .

$$\text{le temps mort} \quad : \quad a = 2,8t_2 - 1,8t_3 = 60,4 \text{ s}.$$

$$\text{ce qui donne} \quad : \quad \frac{\theta}{a} = 0,993.$$

b) charge 75%

$$t_2 = 163 \text{ s} \quad ; \quad t_3 = 188 \text{ s}.$$

$$\theta = 137,5 \text{ s}$$

$$a = 118 \text{ s}$$

$$\Rightarrow \frac{\theta}{a} = 1,16.$$

c) charge 60%

$$t_2 = 197 \text{ s}$$

$$\theta = 165 \text{ s}$$

$$t_3 = 227 \text{ s}$$

$$a = 143 \text{ s}$$

$$\frac{\theta}{a} = 1,15$$

3.3 Ce rapport  $\frac{\theta}{a}$  pour les différentes charges ne fait que favoriser la solution cascade, celle-ci sera adoptée pour nos boucles de régulation automatique.

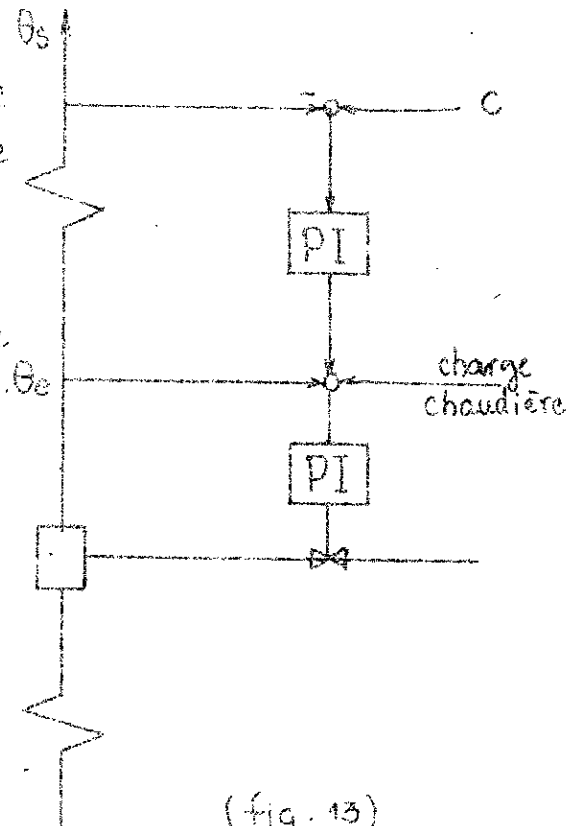
La solution "cascade" est caractérisée par la présence de 2 régulateurs, l'un principal appelé régulateur "Maître", l'autre secondaire appelé régulateur "Esclave".

Le régulateur esclave a pour rôle d'agir sur un servomoteur accouplé à une vanne automatique pour

régler le débit d'eau de désurchauffe. Ce régulateur reçoit sa consigne du régulateur principal et sa grandeur mesurée ( $\theta_e$ ) est la température d'entrée de la vapeur donnée par un capteur de température, placé à l'entrée du surchauffeur, mesurant la température résultante influencée par les débits de vapeur et d'eau d'injection.

Le régulateur principal quant à lui, il reçoit sa grandeur mesurée ( $\theta_s$ ), influencée principalement par le flux calorifique, à l'aide d'un capteur de température placé à la sortie du surchauffeur il la compare à la valeur consigne imposée par les conditions d'exploitation. Sa réponse sous forme de signal sera la consigne du régulateur secondaire.

La figure ci-contre montre l'exemple typique d'une chaîne de régulation de la température de surchauffe. La grandeur à régler est  $\theta_s$  de la vapeur et la température  $\theta_e$  à l'entrée du surchauffeur est utilisée comme grandeur auxiliaire de réglage. La boucle auxiliaire présente une grande importance car elle permet de détecter rapidement et de compenser les perturbations - qui prennent naissance dans les éléments de surchauffe situés en amont du surchauffeur réglé.



(fig. 13)

Elle présente un comportement dynamique très favorable ce qui explique son influence déterminante sur les perturbations qui ont été neutralisées avant leur entrée au surchauffeur. Le schéma précédent présente une régulation cascade PI/PI celle-ci donne une qualité de régulation très voisine de celle de la cascade PI/P.

4. Cet éclaircissement nous guide vers un schéma des boucles restructurées.

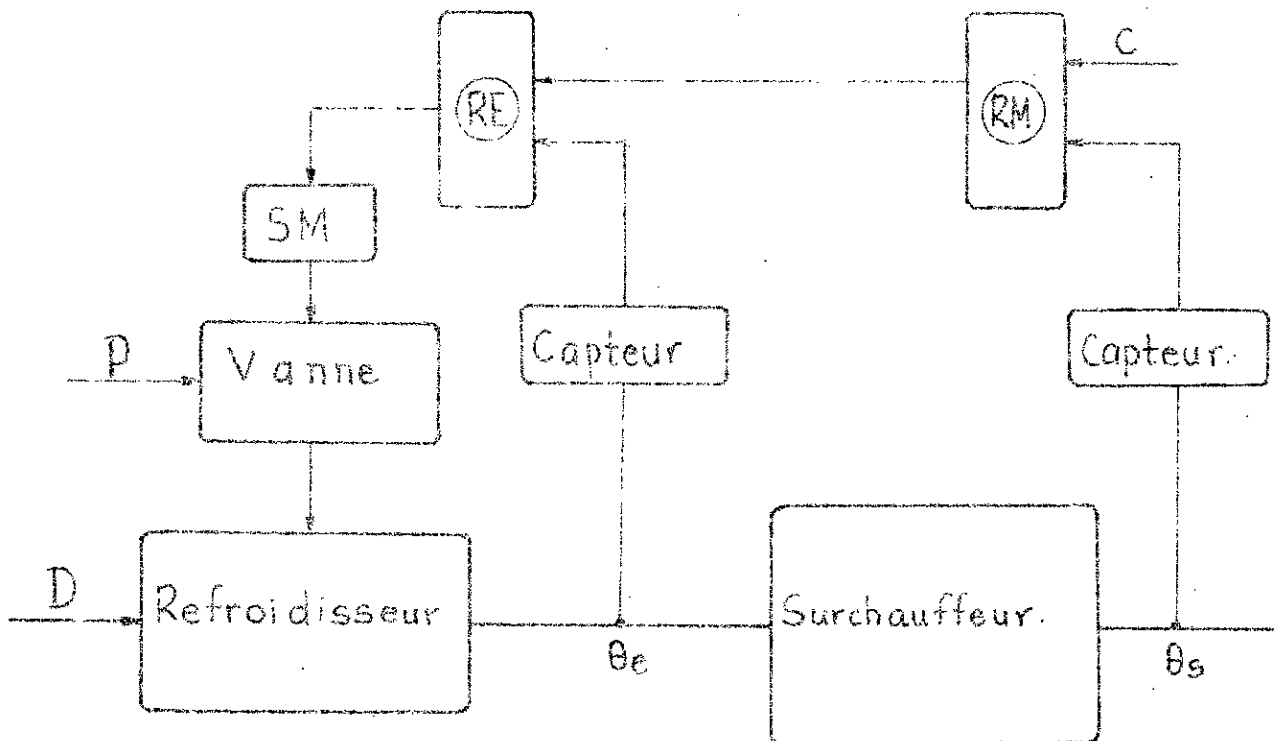


fig. 14 Schéma des boucles de régulation.

# CHAPITRE IV

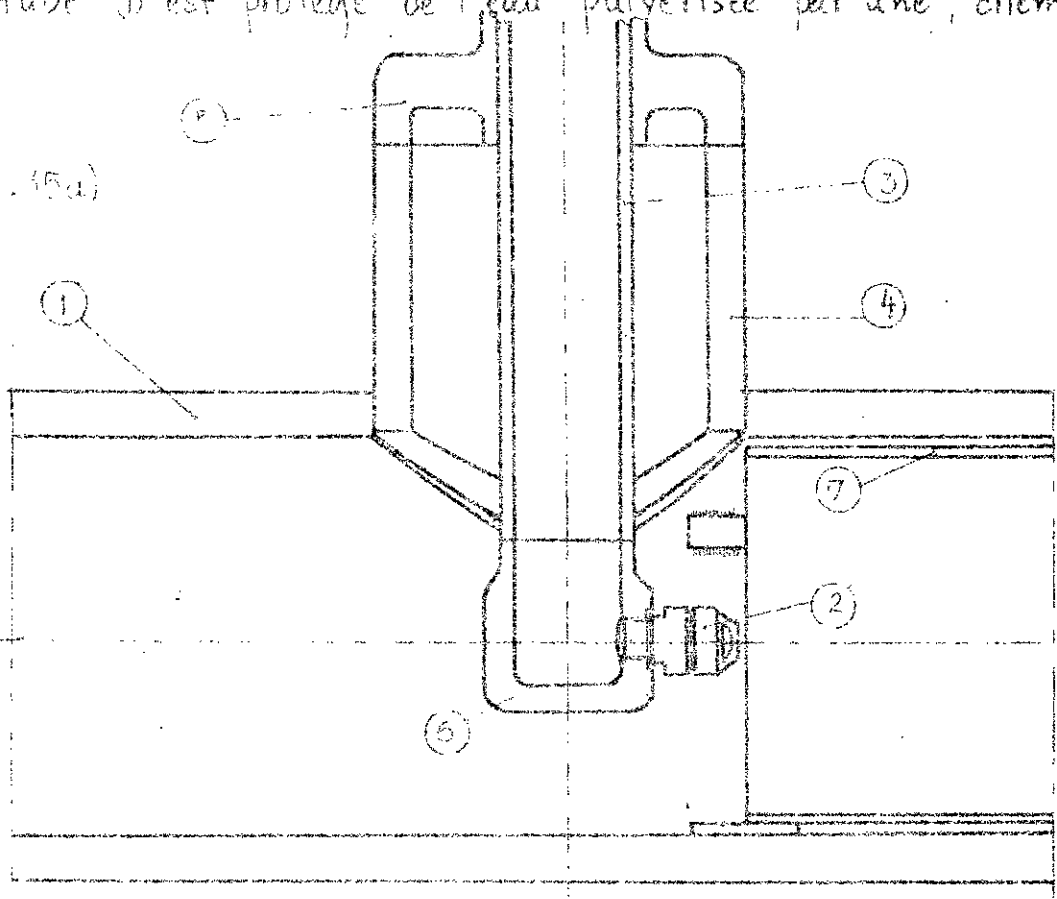
## ELEMENTS TECHNOLOGIQUES

### 1. Refroidisseur

C'est un dispositif servant pour la régulation de la température de vapeur surchauffée. Son principe est de pulvériser l'eau chaude par une tuyère au passage de la vapeur d'eau et c'est ainsi que se refroidit la vapeur. Il est constitué de :

- Un tube qui conduit la vapeur au surchauffeur noté ①
- Un ensemble tuyère ② et porte-tuyère ③, ce dernier est raccolé (soudé) à un tube ④ amenant l'eau de désurchauffe contrôlée par une vanne automatique.
- Un tube ⑤ qui est soudé au flasque ⑥, celui-ci maintient et sert de conduite au tube ③.
- Le tube ⑤ est protégé de l'eau pulvérisée par une chemise ⑦.

(fig. 15a)



## 2. Calcul de dimensionnement des tubes.

En plus des tubes mentionnés sur la figure 15, nous calculerons le tube d'amenée d'eau de désurchauffe à la vanne à partir des pompes; ce tube sera noté ⑧.

La relation utilisée pour le dimensionnement est:

$$S = \frac{D}{\rho \cdot v} \quad (\text{IV.1}).$$

$$S = \frac{\pi D^2}{4}; \quad d: \text{diamètre intérieur du tube.}$$

D: Débit du fluide

$\rho$ : masse volumique.

v: vitesse d'écoulement.

Les contraintes dans ces tubes seront calculées selon les formules de Lamé.

$$\sigma_r = \frac{P_a \cdot a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)$$

$$\sigma_t = \frac{P_a \cdot a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{a^2}\right)$$

$\sigma_r$ : contrainte radiale

$\sigma_t$ : " tangentielle

$P_a$ : Pression interne

a: Diamètre intérieur.

b: " extérieur.

Ces 2 contraintes donneront la contrainte réduite ( $\sigma_{red}$ ).

Une fois dimensionnés, ces tubes seront vérifiés par l'hypothèse d'Huber qui donne  $\sigma_{red}$  comparé à  $R_{p0,2}$  (ou  $\sigma_R$ ) avec un coefficient de sécurité de l'ordre de 2 à 2,5.

$$\sigma_{red} = \frac{P_a}{D_e^2 - D_i^2} \sqrt{D_i^4 + 3D_e^4} \dots \dots (N.2); \text{ avec:}$$

$P_a$ : pression interne dans le tube.

$D_i$ : Diamètre intérieur du tube

$D_e$ : " extérieur " "

$\sigma_{red}$ : Contrainte réduite. (contrainte idéale).

## 2.1 Calcul et choix des tubes.

### 2.1.1 Tube du refroidisseur (noté ① sur fig. 15a)

Données :

Vitesse de la vapeur ( $v$ ) : 40 m/s

Notre surchauffeur étant constitué de 2 parties, on dispose donc de deux refroidisseurs supportant chacun la moitié du débit de la vapeur. Donc le débit pour le refroidisseur qu'on calcule sera:  $D = \frac{D_{total}}{2}$ .

On se limitera aussi à prendre le débit nominal (100%) en admettant que les charges inférieures vérifieront automatiquement.

$$D = \frac{650}{2} \text{ t/h} = 90,27 \text{ kg/s.}$$

$$S_v = 41,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (calculé au chp II).}$$

A.N. : (N.1) donne  $d \equiv D_i = 262 \text{ mm.}$



La norme française NF A49-213 pour les tubes sans soudure utilisés aux températures élevées donne:

$$D_e = 323,9 \text{ mm} ; e = 32 \text{ mm} ; D_i = 259,9 \text{ mm}$$

(IV.2) donne :

$$\sigma_{red} = 71,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (P_a = 13,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$

$$\sigma_R = 167 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ pour } 10^5 \text{ heures de fonctionnement.}$$

nous obtenons ainsi un coefficient de sécurité  $K = 2,33$  et le tube choisi :

Tube 323,9 32 NF A49-213 en acier ferrit. nuance TU Z10 CD Nb V9-2

2.1.2 Tube entre pompe d'alimentation en eau de désurchauffe et vanne (noté  $\textcircled{a}$  sur fig. 15b).

Données :

$$P = 172 \text{ bars}$$

$$t^\circ = 247 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v = 3,5 \text{ m/s}$$

$$D \equiv W = 10 \text{ t/h (débit d'eau d'injection).}$$

Il nous reste à déterminer la masse volumique  $\rho$  de cette eau sous les conditions :

$$P = 172 \text{ bars et } t^\circ = 247 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Les tables donnent (Thermodynamics tables in SI units) :

$$P = 172 \text{ bars} \quad t^\circ = 250 \text{ }^\circ\text{C} \quad \rho = 813,64 \text{ kg/m}^3$$

$$t^\circ = 225 \text{ }^\circ\text{C} \quad \rho = 846,76 \text{ ---}$$

par interpolation de la température, on obtient  $\rho(172; 247)$

$$\rho = 817,614 \text{ kg/m}^3$$

(IV.1) donne :

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{W}{\rho \cdot v}$$

A.N :  $d \equiv D_i = 112 \text{ mm}$ .

La norme française donne un tube de :

$D_e = 139,7 \text{ mm}$  ;  $e = 12,5 \text{ mm}$  ;  $D_i = 114,7 \text{ mm}$

(IV.2) donne  $\sigma_{red} = 98,09 \frac{N}{\text{mm}^2}$ .

avec  $R_{p0,2} = 216 \frac{N}{\text{mm}^2}$  on obtient  $K = 2,2$  d'où :

Tube 139,7 12,5 NFA49-213 acier non allié nuance TU48-C.

2.13. Tube reliant vanne et porte-tuyère (noté ③ sur fig. 15d).

Données :

Les mêmes que pour ⑧ sauf que la pression diminue à 144 bars.

On prendra un tube de :

$D_e = 88,9 \text{ mm}$  ;  $e = 8 \text{ mm}$  ;  $D_i = 72,9 \text{ mm}$  et on

le vérifie par l'hypothèse de Huber qui donne.

$$\sigma_{red} = 81 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \sigma_p = 167 \frac{N}{\text{mm}^2} \Rightarrow K = 2,1$$

d'où le tube :

tube 88,9 8 NFA49-213 en acier ferritique

nuance TU210 CD Nb V0-2

2.1.4 Tube raccolé au refroidisseur (noté ④ sur fig. 15a)  
ce tube est dans les mêmes conditions que le  
refroidisseur, on prendra :

$$D_e = 244,5 \text{ mm} ; e = 25 \text{ mm} ; D_i = 194,5 \text{ mm}.$$

$$\sigma_{red} = 69 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} ; \sigma_2 = 167 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \Rightarrow K = 2,4 \text{ d'ou le tube.}$$

Tube 244,5 25 NF A 49-213 en acier ferritique.  
nuance TU Z 10 CD Nb V 9-2

## 2.2 Compositions chimiques en pourcentage des tubes.

### TU 48-C

	C	Mn	P	S	Si	Cu	Sw
coulée	0,22	0,65 ± 1,2	0,04	0,04	0,1 ± 0,35	0,25	0,03
produit	0,24	0,6 ± 1,3	0,045	0,045	0,09 ± 0,4	0,25	0,03

### TU Z 10 CD Nb V 9-2

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	V
coulée	0,15	0,8	0,03	0,03	0,20	0,3	8,5	1,7	0,25	0,3	0,2
		1,3			0,65		10,5	2,3		0,55	0,4
produit	0,17	0,7	0,035	0,035	0,15		8,40	1,65		0,25	0,18
		1,4			0,170		10,65	2,38		0,60	0,43

### 3. Vérification des soudures.

Dans le calcul de soudure qui suit on supposera que l'effort est uniformément réparti suivant la longueur du joint et que la contrainte est uniformément répartie suivant la section sollicitée.

La relation adoptée pour les soudures bout à bout sera :

$$\sigma = P \cdot \frac{D}{2e}$$

P: pression  $[\frac{N}{mm^2}]$

D: Diamètre intérieur [mm]

e: épaisseur [mm]

Celle-ci sera comparée à  $\sigma_R (R_{p0,2})$  avec un coeff<sup>t</sup> d'environ 3.

Soudures ③ et ⑦ sur fig. 15b

$$\sigma_t = P \cdot \frac{D}{2e} = 14,4 \cdot \frac{72,9}{2 \cdot 8} = 65 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{red} = 81 \frac{N}{mm^2}$$

$$c = \frac{\sigma_R}{\sigma_t} = \frac{167}{65} \approx 3.$$

Soudure notée 5 sur fig. 15b

$$F = P \cdot S = 13,8 \cdot \frac{\pi}{4} (194,5^2 - 88,9^2) = 324364 \text{ N.}$$

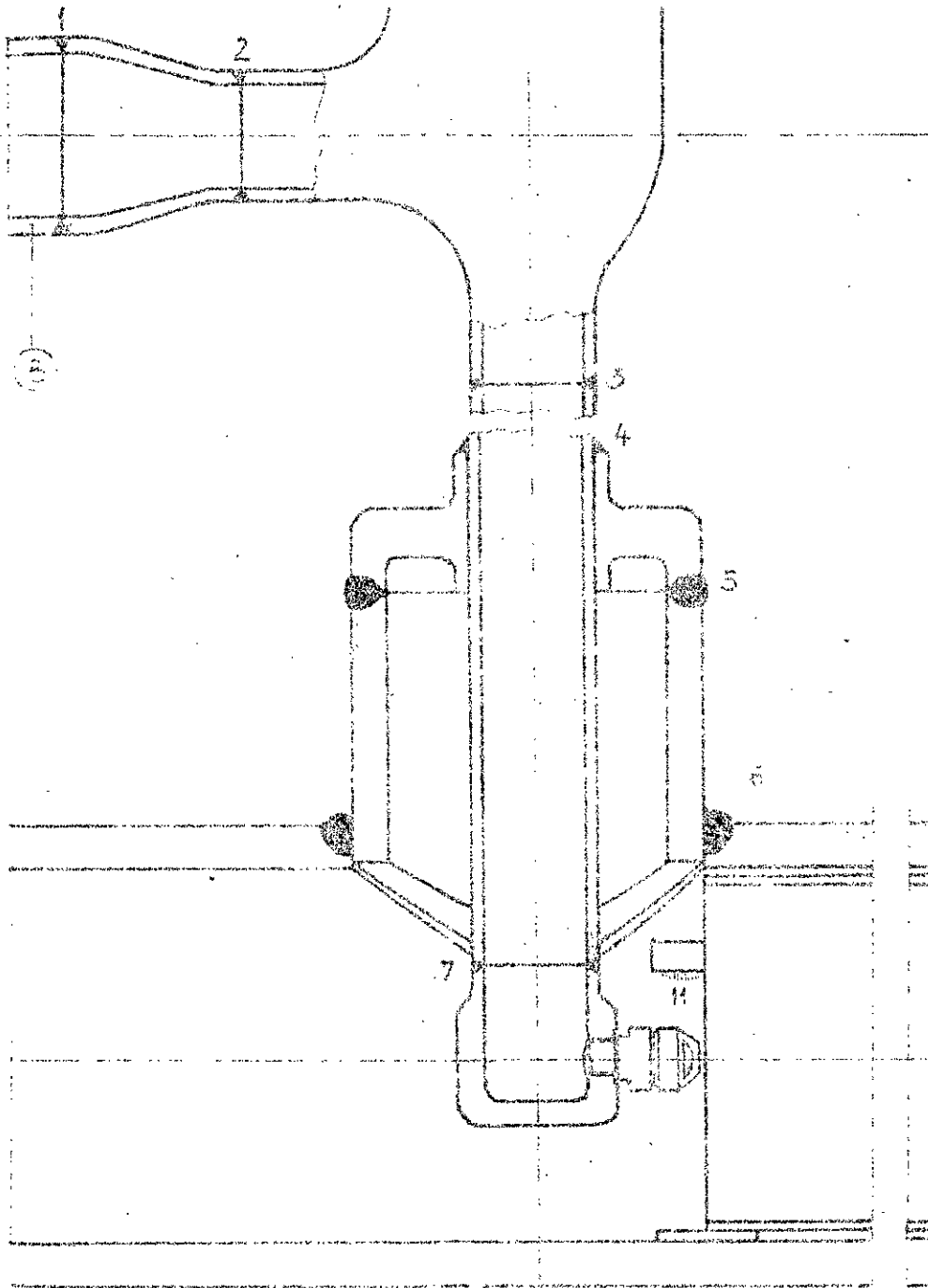
$$\sigma_t = \frac{F}{\pi \cdot D_i \cdot e} = \frac{324364}{\pi \cdot 194,5 \cdot 25} = 21 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_t} = \frac{167}{21} = 7,8.$$

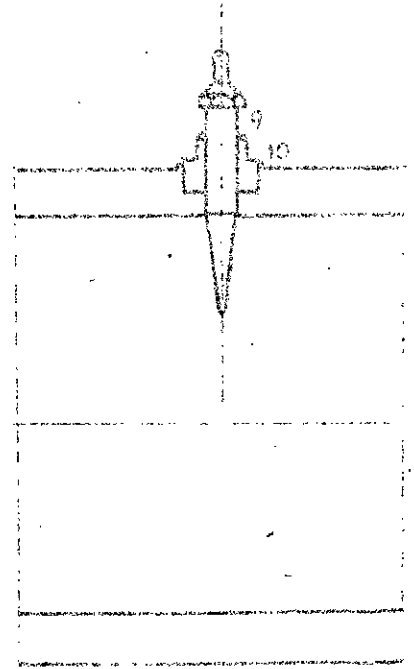
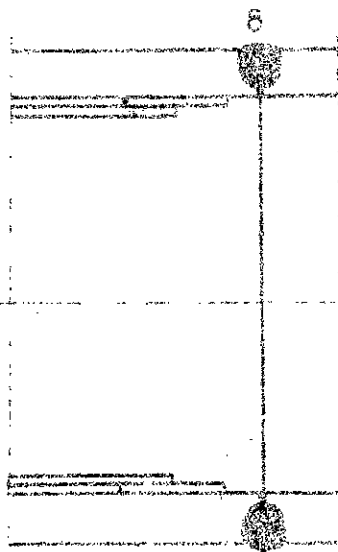
Les soudures 9 et 10 de la fig. 15b résisteront car elles sont sollicitées par la contrainte due à la pression dynamique qui est faible, donnant:

$$8 \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,03336 \frac{N}{mm^2} \text{ d'où } F = 30 \text{ N négligeable.}$$

la soudure notée 4 résistera elle aussi à cause de la force négligeable sur le porte-tuyère.



(fig. 15 b)



Les soudures notées 1, 2 et 3 seront vérifiées par :

$$\sigma = P \cdot \frac{D}{2e}$$

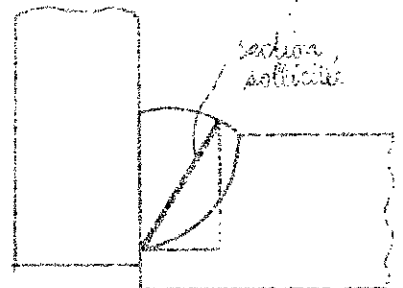
$$1 \quad \sigma = 17,2 \cdot \frac{114,7}{2 \cdot 12,5} = 78,9 \frac{N}{mm^2} ; \quad \frac{\sigma_R}{\sigma} = \frac{216}{78,9} = 2,74$$

$$2 \quad \sigma = 17,2 \cdot \frac{72,9}{2 \cdot 8} = 78,3 \frac{N}{mm^2} ; \quad \frac{\sigma_E}{\sigma} = \frac{216}{78,3} = 2,75$$

$$3 \quad \sigma = 13,8 \cdot \frac{259,9}{2 \cdot 32} = 56 \frac{N}{mm^2} ; \quad \frac{\sigma_E}{\sigma} = 2,98 = \frac{167}{56}$$

Soudure notée 6

On prendra la projection de la section sollicitée par une traction.



$$F = P \cdot S = 324364 \text{ N (déjà calculée)}$$

$$\sigma_t = \frac{F}{\frac{\pi}{4} (274,5^2 - 214,5^2)} = 26,5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_t} = 6,3$$

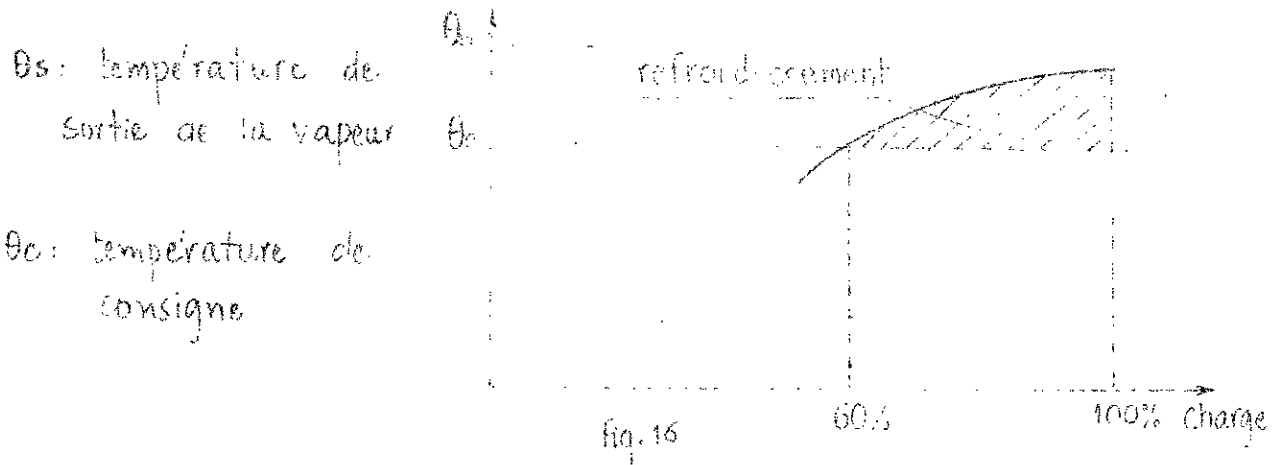
Ceci en prenant l'épaisseur de la soudure égale à l'épaisseur du tube, on a vu que toutes les soudures résistent bien et on sait qu'une soudure bout à bout, bien faite résiste mieux que le matériau lui-même.

## CHAPITRE V

### ETUDE ET CHOIX DU MATERIEL DE REGULATION.

#### 1. Vanne automatique :

1.1. Cette vanne comme tout le système de régulation fonctionnera entre les charges 60% et 100% comme indiqué sur la figure. 16



#### Données :

pression de la pompe constante = 172 bars

pertes de charge dans la tuyère = 6 bars (charge 100%)

longueur du tube reliant la pompe et la vanne : 80 m

Débit d'eau :  $w = 10 \text{ t/h}$  pour 100% ( $w = 0$  pour 60%)

Vitesse de l'eau : 3,5 m/s.

#### 1.2. calcul des pertes de charges.

##### 1.2.1. entre pompe et vanne

$$\Delta P_f = \lambda \frac{l}{D} \rho \frac{U^2}{2}$$

$U$  : vitesse du fluide

$D$  : Diamètre du tube

$l$  : longueur "

$\lambda$  : Coefficient de forme.

on déterminera le nombre de Reynolds ( $Re$ ) pour calculer  $\lambda$ .

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

$L$ : diamètre intérieur du tube = 0,1147 m

La viscosité dynamique  $\mu$  est déterminée par interpolation :

$$\mu (247^\circ\text{C}, 172 \text{ b.}) = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ kgf. s/m}^2.$$

$$\text{A.N. } Re = \frac{817 \cdot 3,5 \cdot 0,1147}{11,9 \cdot 10^{-6}} = 27577254.$$

$Re > 10^5$  Régime turbulent.

on suppose que les parois internes du tube sont lisses :

$$\lambda = 0,316 Re^{-1/4} = 0,00436063$$

$$\text{A.N. } \Delta p_t = 0,15 \text{ bars} \quad \text{on prendra } \Delta p_t = 200 \text{ mbars.}$$

### 2.2.2 Dans la vanne.

En se basant sur les pressions d'entrée de la vapeur pour les différentes charges, on les a reportées sur la figure, on a tracé la courbe correspondante et qui nous servira (son allure) pour la détermination des pertes de charge.

a) pour la charge 100% on somme  $\Delta p_t$ ,  $\Delta p$  tuyère et pression d'entrée ( $P = 138$  bars), ce résultat sera enlevé de la pression d'entrée de l'eau ( $P = 172$  bars) et on obtient la perte de charge dans la vanne:

$$\Delta p_{\text{vanne}} = 172 - (138 + 6 + 0,2) = 27,8 \text{ bars.}$$



b) charge 75%  
 du graphe ( fig. ) on tire  $\Delta P_{vanne}$

$$\Delta P_{vanne} = 172 - 138,8 = 33,2 \text{ bars.}$$

c) Charge 60%

Ce calcul ne sera pas fait pour cette charge car il sert à déterminer le coefficient de débit  $K_v$  et  $K_r$  pour ce cas est nul ( $W=0$ )

et voici la méthode de détermination de la perte de charge schématisée comme suit. ( fig 17 )

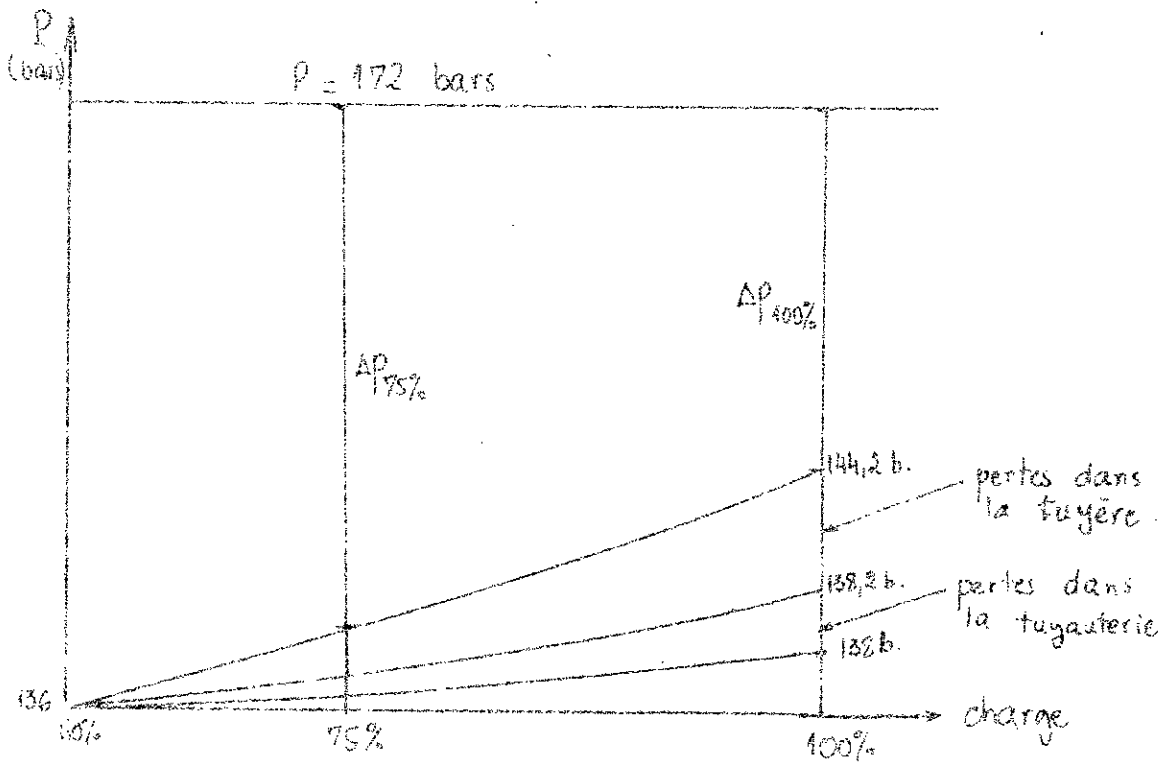


fig. 17a

p (bars)

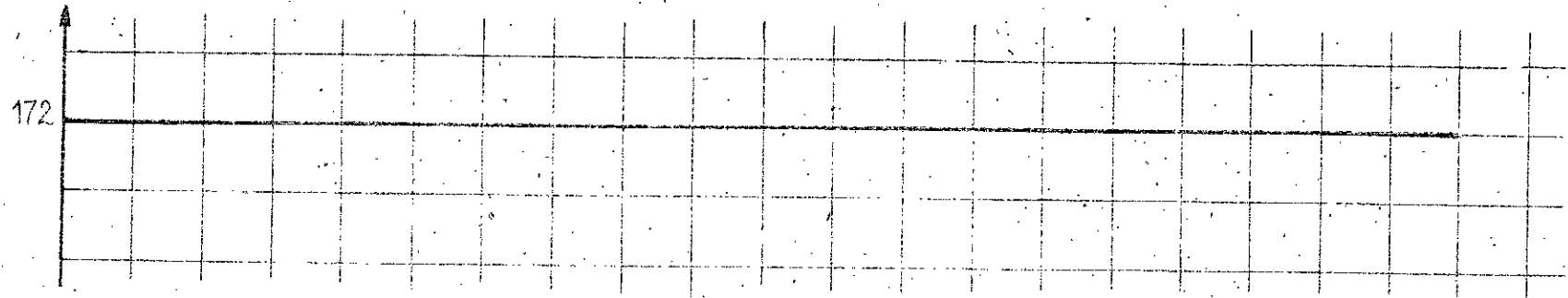
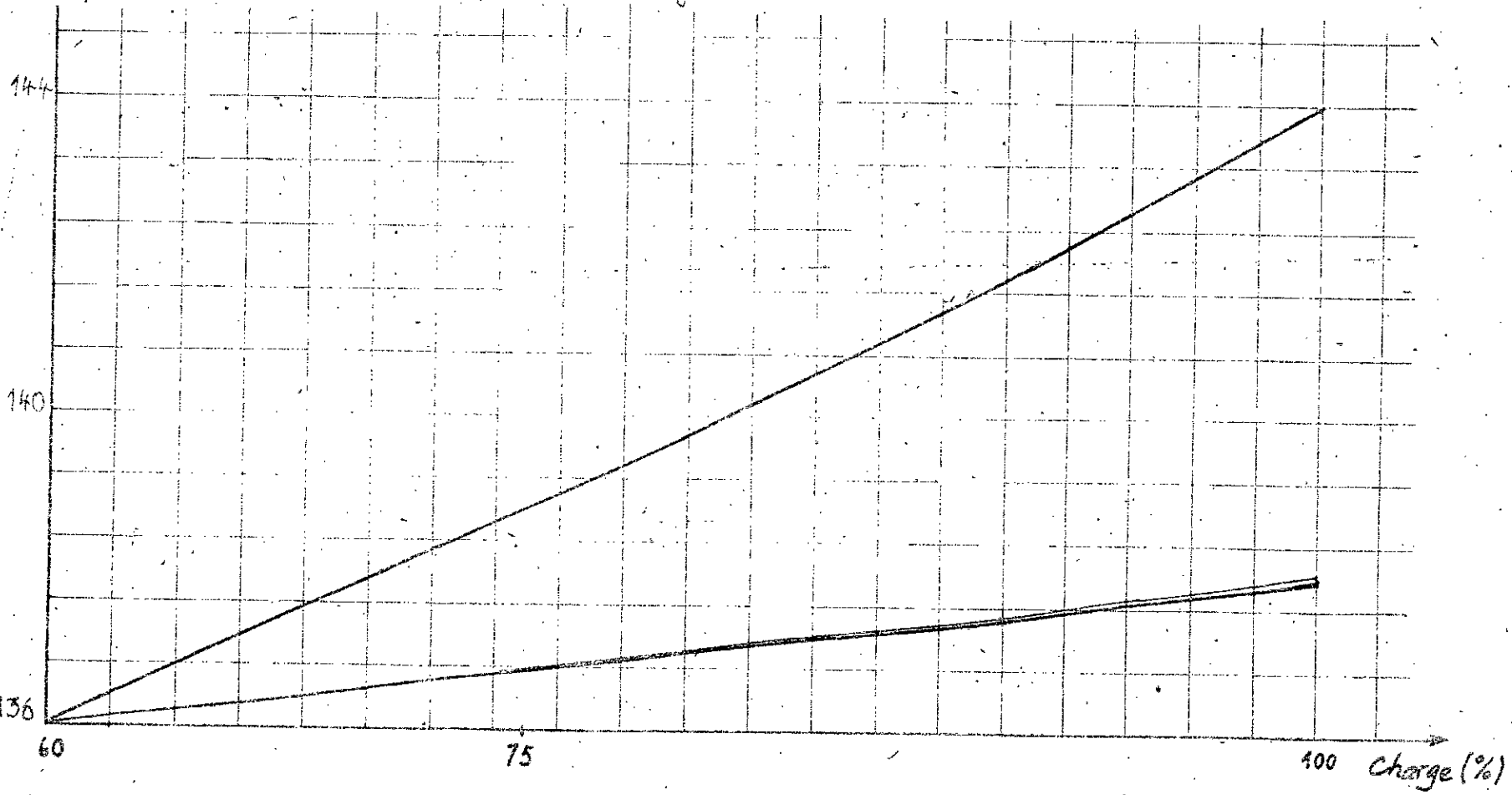


fig. 17 b



-56-

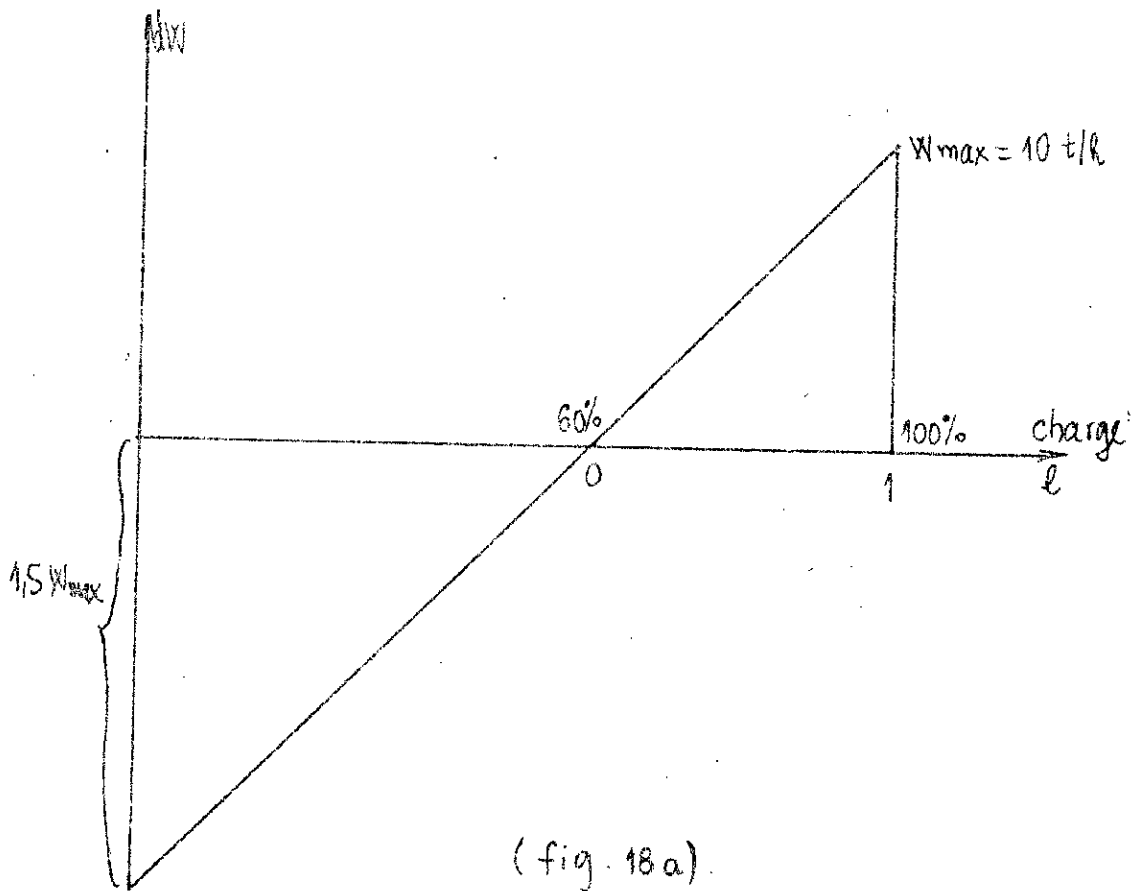
### 2.3 Equation du débit d'eau dans la vanne.

Nous voulons obtenir une variation linéaire du débit d'injection  $W$  en fonction de l'ouverture  $l$  de la vanne:

$$\frac{dW}{dl} \propto K_2 D. \quad \text{avec :}$$

$$D \propto K_1 (W_{\max} \cdot 1,5 + W). \quad \text{d'où :}$$

$$\frac{dW}{dl} = K (1,5 W_{\max} + W)$$



l'équation précédente devient :

$$\frac{dW}{dl} - KW = 1,5 W_{\max}$$

cette équation différentielle se résout comme suit:

$$\frac{dW}{W} - K dl = 0 \quad \Rightarrow \quad W = C e^{Kl}$$

$$dW = 1,5 K W_{\max} \quad \Rightarrow \quad C_0 = -1,5 W_{\max} e^{-Kl}$$

$$W_0 = -1,5 W_{\max} \quad \text{ce qui donne:}$$

$$W = C e^{Kl} - 1,5 W_{\max}$$

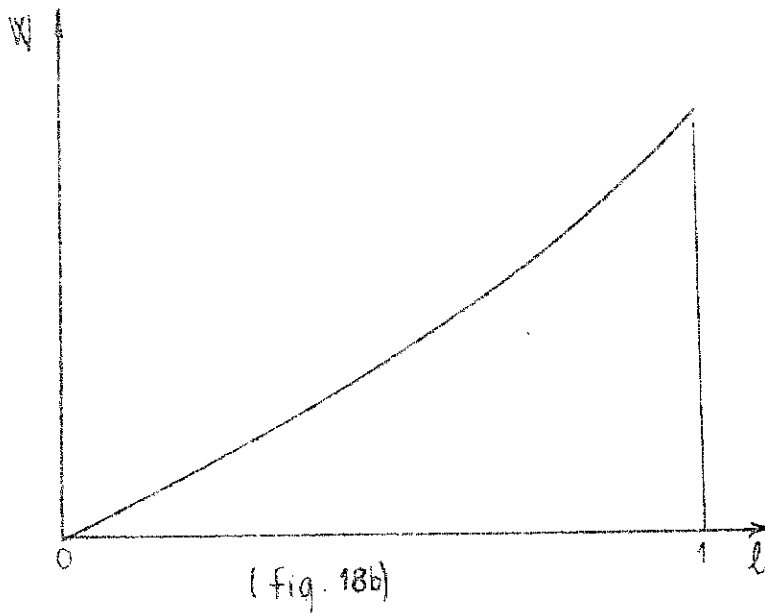
conditions aux limites .

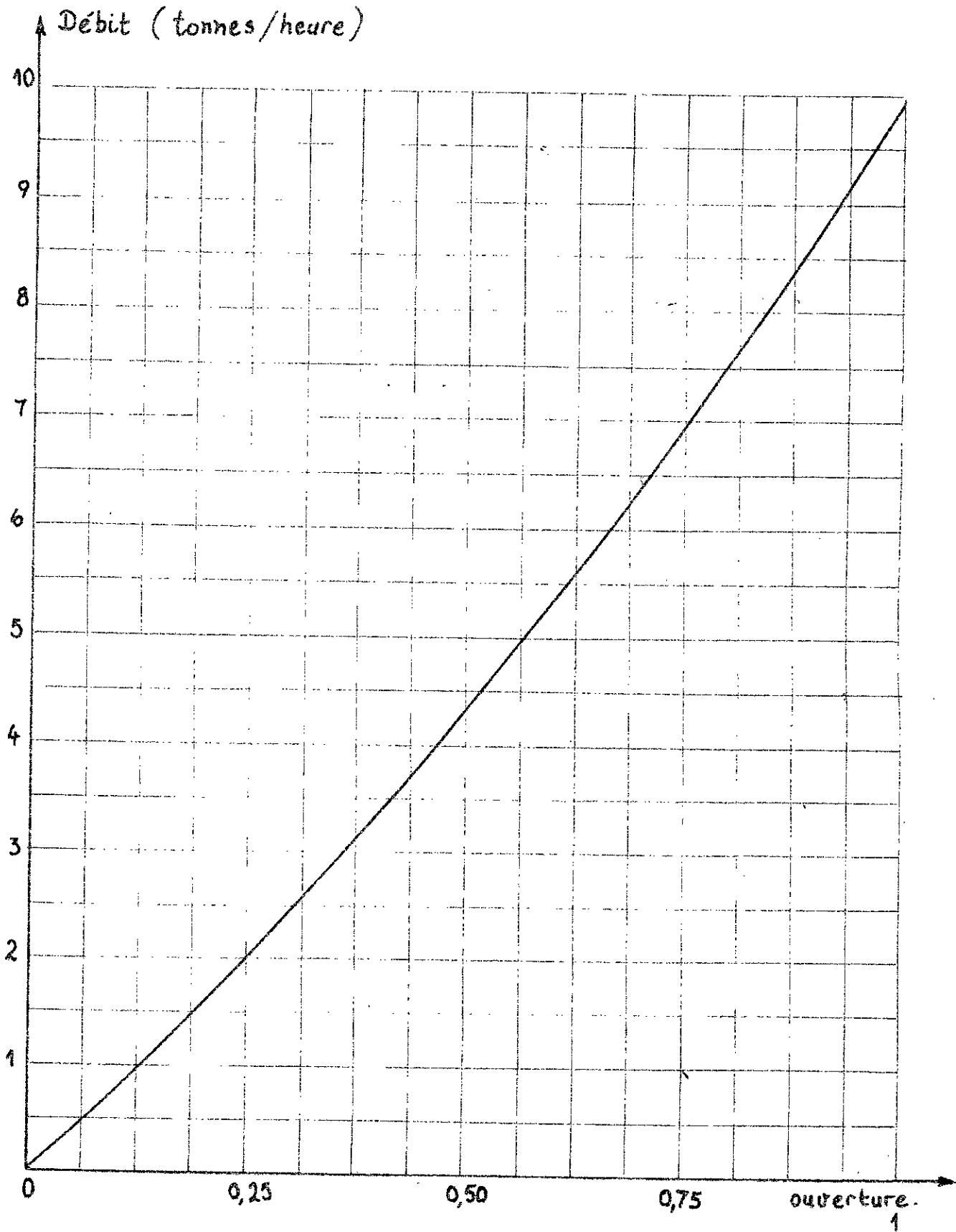
$$l=0 \quad W=0 \quad \Rightarrow \quad C = 1,5 W_{\max} .$$

$$l=1 \quad W=W_{\max} \quad \Rightarrow \quad K = 0,5108 . \quad ; \text{ alors:}$$

$$W = 1,5 W_{\max} (e^{0,5108 l} - 1)$$

cette équation est représentée sur la (fig. 18a)  
et a l'allure de la figure (18b):





(fig. 18c)

## 2.4 Calcul des coefficients de débit : $K_v$

Choisir une vanne revient à déterminer sa grandeur caractéristique ( $K_v$ ) et se reporter ensuite aux catalogues.

### 2.4.1 Définition du $K_v$ :

C'est le volume d'eau ( $m^3/h$ ) de masse volumique  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  qui traverse une vanne sous une perte de charge de 1 bar pendant une minute.

Pour un liquide quelconque, on a:

$$K_v = Q \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{unit}} \cdot \rho}{\Delta p \cdot \rho_{\text{unit}}}} ; \quad \begin{array}{l} K_v ; Q : m^3/h \\ \Delta p_{\text{unit}} : 1 \text{ bar} \\ \rho_{\text{unitaire}} : 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{array}$$

dans notre cas  $Q \equiv W$ .

### 2.4.2.a Détermination du $K_v$ pour la charge 100%.

$$\Delta p = 27,8 \text{ bars} ; \quad \rho = 817,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} ; \quad Q = 10 \cdot \frac{10^3}{817,6} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{A.N. : } K_v = 2,09$$

b) charge 75%.

$P = 172 \text{ bars}$  ;  $t^{\circ} = 230^{\circ}\text{C}$  par interpolation on obtient:

$$\rho = 840,14 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta p = 33,2 \text{ bars}$$

par simple calcul on a:  $W = 3,75 \text{ t/h}$

$$Q = W = 3,75 \frac{10^3}{840,14} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{A.N. : } K_v = 0,71$$

c) charge 60%

$$K_v = 0 \quad \text{car} \quad W = 0.$$

Ces  $K_v$  sont reportés sur le diagramme (fig. 19) en fonction de l'ouverture de la vanne  $\ell$ .

Vu l'insuffisance de calcul du  $K_v$  (régime turbulent) et pour compenser les excès provoqués par la chaudière, nous remplaçons la charge 100% par une charge 85% et nous déterminons une nouvelle charge 100% (qui est en réalité 124%).

En extrapolant la courbe de  $K_v$ s (caractérist. souhaitée) jusqu'à la nouvelle charge 100% nous obtenons :

$$K_v = 3,7.$$

## 2.5. Choix de la vanne.

On choisira s'il ya possibilité une vanne à soupape à un seul siège qui représente les avantages suivants :

- Simplicité de construction.
- Peut se fermer pour un débit nul.

Le catalogue Siemens permet ça avec un  $K_v = 3,8$ , et donne la possibilité d'une caractéristique linéaire ou d'égal pourcentage.

### 2.5.1 Choix de la caractéristique.

Elle sera choisie selon sa position de la caractéristique souhaitée, celle qui est la plus proche sera retenue.

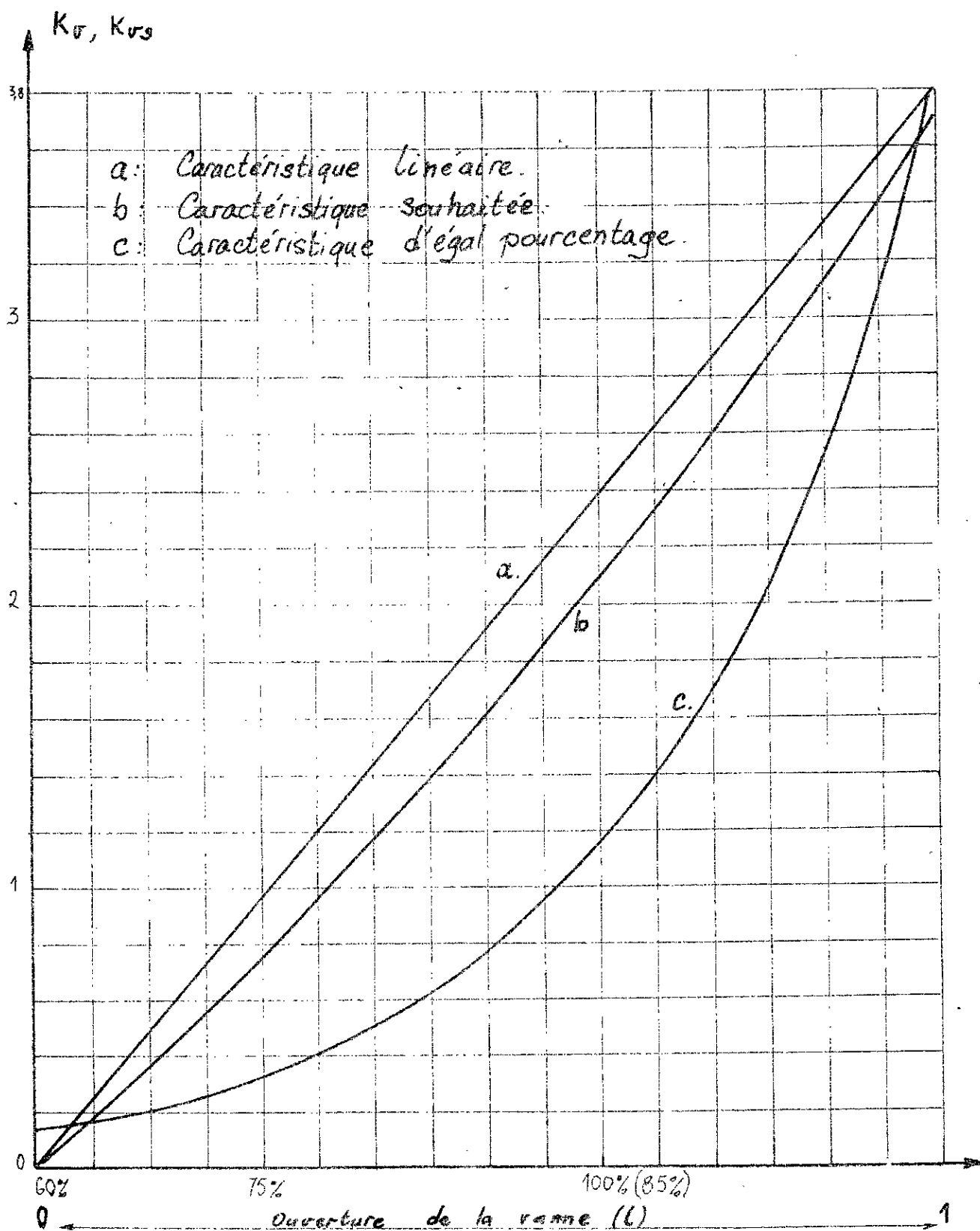
a) Courbe d'égal pourcentage

son équation est donnée par la formule :

$$K_v = K_{v100} \cdot \frac{1}{25} \cdot 25^\ell$$

$$K_{v100} = 3,8$$

$\ell$  : ouverture de la vanne.



(fig. 19)



cette caractéristique démarre à partir de 4%.

b) Courbe linéaire :

son équation est :  $K_v = K_{v100} \cdot l$

La figure montre que la caractéristique linéaire est plus proche de la caractéristique souhaitée et c'est elle qui déterminera le type de notre vanne.

## 2.6 Spécifications de commande

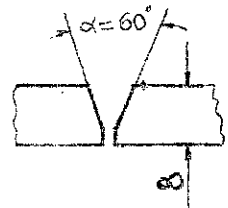
Vanne M77173

J7130 - J212

Z |  $d_a = 88,9$   
s = 8.

J71 : pression nominale 250 bars  
Diamètre nominal 80  
couple d'entraînement 50 N.m

30 : Forme 22 : forme de la soudure  
Si l'épaisseur  $s < 16$  mm.



J :  $K_{vs} = 3,8$   
course : 20 mm  
siège 20 mm pour DN : 80.

2 : Caractéristique linéaire

1 : fabrication des éléments de restriction, vanne à un seul étage permettant une chute  $\Delta p \leq 50$  bars

2 : Joint d'étanchéité : amiante + graphite

On exigera un diamètre ext. : 88,9 et une épaisseur  $s = 8$  mm

On a 4 tours de la tige pour une course de 20 mm et un couple de 50 N.m.

### 3. Choix de la tuyère.

#### 3.1 Calcul du $K_v$ .

Données pour la charge nominale.

$$\text{Débit : } w = 10 \text{ t/h} = 10 \cdot \frac{10^3}{814,5}$$

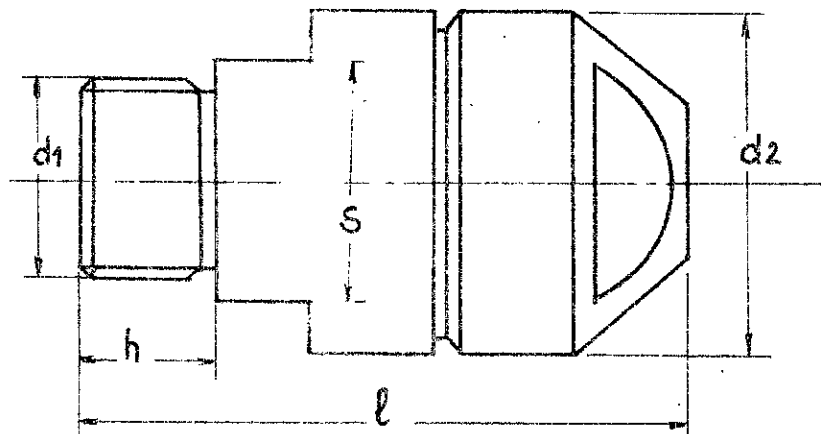
$$\Delta p = 6 \text{ bars}$$

$$g = 814,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{A.N. } K_v = 4,5$$

3.2. Le catalogue polonais NORMA ZAKŁADOWA donne une tuyère de  $K_v = 4,7$

norme : Zn-16 / 1314 - 1501



( fig. 20 )

$$h: 18 \text{ mm}$$

$$d_2: 45 \text{ ''}$$

$$l: 80 \text{ ''}$$

$$s: 32 \text{ ''}$$

$$d_1: G 3/4 \quad ( d_1 = 26,441 \text{ mm} )$$

### 3.3 Eau de désurchauffe.

L'eau de désurchauffe est prélevée au refoulement des pompes alimentaires à l'amont des vannes qui règlent l'admission de l'eau d'alimentation du générateur de vapeur, cette eau doit être distillée ou ayant subi une déminéralisation totale. Elle est chauffée à plus de  $100^{\circ}\text{C}$  pour éviter les chocs thermiques et permettre une vaporisation rapide.

Afin d'obtenir les meilleurs résultats, l'eau injectée doit être pulvérisée. La paroi interne de la conduite du désurchauffeur doit être protégée par un écran (chemise de protection) pour la soustraire aux chocs thermiques résultant de l'injection d'eau.

La chemise de protection a été choisie d'une longueur de trois (mètres), elle est soudée au tube du refroidisseur par des cales.

## 4. Servomoteur.

4.1. Le servomoteur est branché au régulateur, son rôle est de commander l'ouverture de la vanne automatique.

On distingue trois types de servomoteurs :

Électriques, pneumatiques et hydrauliques.

4.2. choix du type : Comme on était limité par la documentation, on s'est contenté d'une petite comparaison favorisant les servomoteurs électriques de par leur robustesse, leur entretien réduit, l'auto-freinage et leur prix économique relativement aux autres types.

Le choix de la vanne nous impose d'avoir un servomoteur qui a un déclenchement d'après le couple d'entraînement ceci dans le sens de la fermeture et dans la direction d'ouverture un déclenchement par la translation, ainsi qu'une sortie à rotation.

### 4.3 SPECIFICATIONS DE COMMANDE

on choisira un servomoteur :

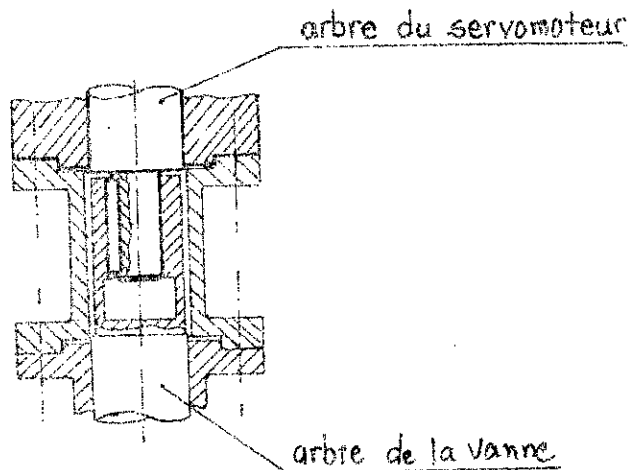
M76342

ES147 - E909.

ES1 : pour un couple de 50 N.m on a une vitesse de l'arbre de sortie égale à 2,5 tr/mn.

4 : Extension de l'arbre selon le dessin D

(fig. 21)



7 : avec frein electro-mécanique 220/380 V ; 50 Hz .

E : 5 tours par course

9 : 32 terminaux pour les connections

09 : 2 déclencheurs de torsion et 4 déclencheurs en translation.

Il possède un potentiomètre comme capteur de déplacement.

## 5 Capteurs de température.

5.1 Un dispositif de mesure de température se compose essentiellement d'un capteur de température et éventuellement d'autres éléments.

comme capteurs on distingue :

- Thermomètres à résistance (-30 ÷ 570°C).
- Thermocouples (-100 ÷ 1600°C).
- Pyromètre à radiations (-40 ÷ 3100°C).

### 5.2 Choix du capteur.

Le catalogue MP11 Siemens donne un éventail d'appareils de mesure de température duquel on a retenu les thermocouples haute pression à souder qui vérifient les conditions suivantes :

- . Résistant à la pression de 138 bars.
- . Mesurant des températures voisines de 560°C.
- . Donnant un faible temps de réponse.
- . Permettant une longueur d'immersion favorable.

De dimensions réduites et possédant une bille de contact en or au fond de la gaine, le thermocouple choisi assure une transmission thermique rapide, permet une longueur d'immersion de 65 mm.

### 5.3 SPECIFICATIONS DE COMMANDE.

a - Thermocouple haute pression à souder.

1. Couple thermo-électrique NiCr-Ni, mesurant des températures jusqu'à 570°C.
2. Matériau de la gaine 10CrMo910 n° mat. 1.7380
3. Longueur d'immersion utile : 65 mm.
4. Longueur de la gaine 140 mm
5. Longueur totale sans tête : 305 mm.

6. nous prendrons 2 couples thermo-électriques pour la fiabilité (cas d'arrêt d'un couple).

7. Poids du thermocouple : 0,78 kg

ainsi nous obtenons le numéro de référence :

7MC2014 - 2100 ☒

☒ : tête de raccordement forme B en fonte grise, 1 entrée de câble.

b. Gaine de protection

1. longueur d'immersion : 65 mm

2. sa longueur : 140 mm

3. diamètre : 3,2 mm

n° de référence :

7MC2914 - 21A

c. Éléments de mesure avec thermocouple chemisé.

longueur de l'élément : 315 mm.

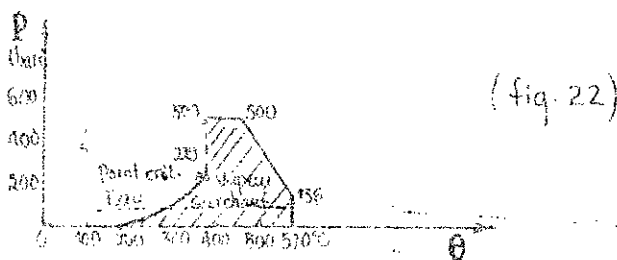
Poids approximatif : 0,11 kg.

n° de référence :

7MC2915 - 4 DA.

Nous prendrons 2 thermocouples pour les températures d'entrée et de sortie du surchauffeur

Charge admissible de la gaine de protection pour la longueur d'immersion de 65 mm.



## 5.4 Thermostat de soudures froides.

5.4.1 Le thermostat sert à maintenir constante la température des soudures froides en cas de mesure de température par thermocouples.

La différence entre la tension du couple thermo-électrique de mesure et du couple thermo-électrique de comparaison représente la température du point de mesure lorsque la température de la soudure froide (point de comparaison) est constante.

### 5.4.2 SPECIFICATIONS DE COMMANDE.

Thermostat de soudures froides.

n° de référence:

M 55 233

B 2 1 1 1 1

B: température de référence 50°C

2: couple NiCr-Ni.

1: nombre de soudures froides égal à 6.

1: Energie 220v.

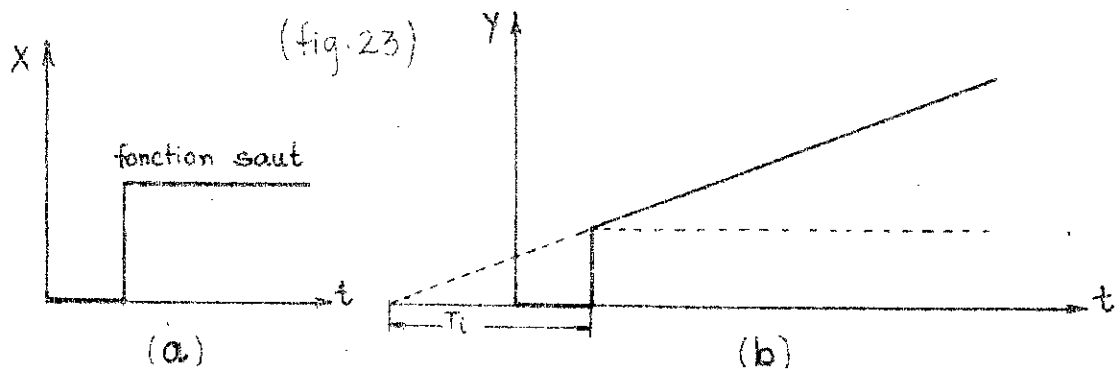
1: Exécution sans thermomètre à résistance ou interrupteur bimétallique.

## 6. Régulateurs.

6.1 Définition : le régulateur automatique, comprenant ses organes de mesure, détermine la valeur de la grandeur réglée, compare sa grandeur effective à la valeur prescrite (consigne), détermine l'écart et produit l'action opposée nécessaire pour maintenir le plus petit écart possible.

La méthode par laquelle le régulateur engendre cette action contraire est appelée mode de régulation ou action de régulation.

6.2 Si on applique une fonction saut à l'entrée du régulateur à comportement PI (a) on obtient la réponse indicielle (b)



## 6.3. Choix des régulateurs

### 6.3.1 Régulateur secondaire

Les catalogues Siemens donnent la possibilité, pour notre cas, d'un régulateur TELEPERM 30.

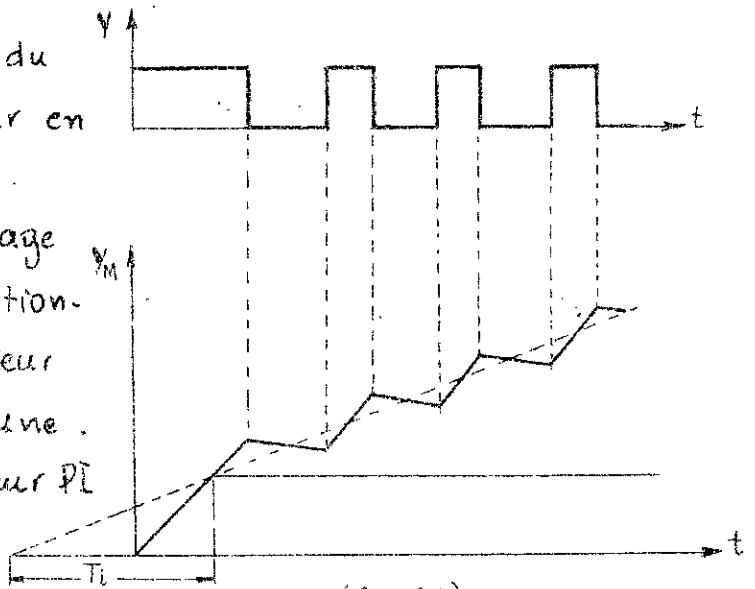
C'est un régulateur électrique pas à pas à sortie discontinue (S) imposée par le fait que le servomoteur commandé est électrique.

L'ensemble régulateur et servomoteur donne l'action intégrale c.a.d que l'action intégrale n'est formulée qu'après sortie du servomoteur (fig. ).



Ci-contre les réponses du régulateur (S) et du moteur en schéma impulsif.

Y : grandeur de réglage  
 $Y_M$  : Grandeur de positionnement du servomoteur  
 elle est identique à une réponse d'un régulateur PI continu (K) qui est représentée en discontinu.



(fig. 24)

### 6.3.2 SPECIFICATIONS DE COMMANDE.

M 74913

C3100 - B110

Z | D99  
 F03  
 G03

Régulateur pas à pas Téléperm 303 avec asservissement PI.

C : contrôle en cascade. Pilotage de consigne par signal fixe.

3 : Longueur du boîtier 600 mm.

100 : Énergie auxiliaire 220 v, 50 Hz.

B1 : Régulation à consigne fixe.

Entrée pour grandeur réglée : 0 à 20 mA.

1 : sortie par relais.

0 : régulation à consigne fixe.

Z : D99 : le capteur est un thermocouple NiCr-Ni  
 plage de mesure 450°C ÷ 500°C

F03 : Signalisation de rupture du thermocouple  
 température simulée trop haute

G03 : Echelle spéciale pour thermocouple 450°C ÷ 500°C.

## 6.4 Régulateur principal.

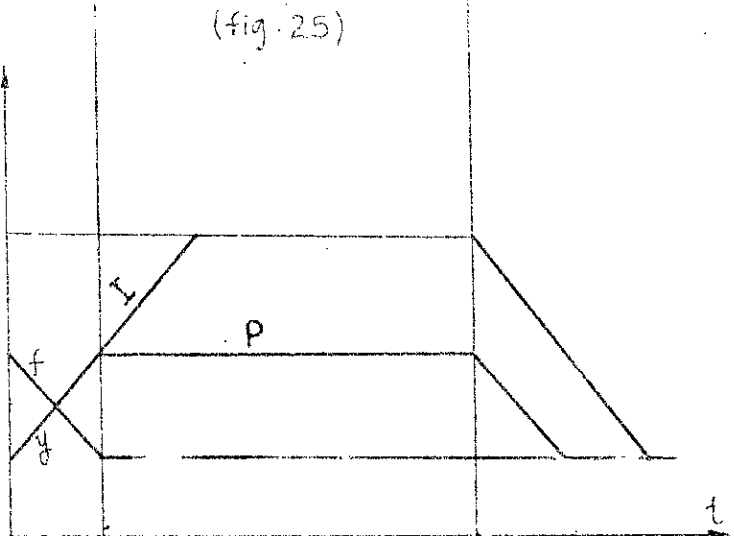
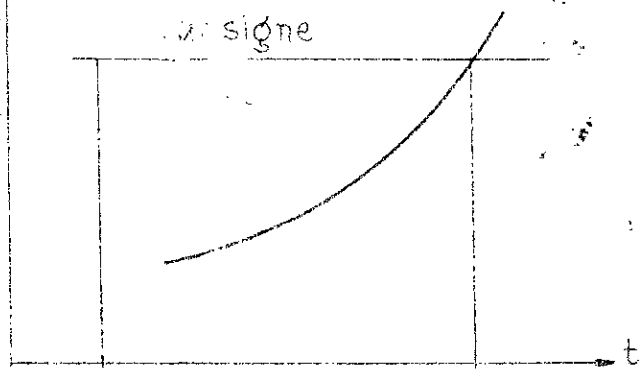
6.4.1 Le régulateur principal est un régulateur PI pouvant être transformé automatiquement en P dans le cas de la saturation de l'action intégrale, il possède une sortie continue.

### 6.4.2 Problème de la saturation de l'action intégrale

Lorsqu'on utilise un régulateur PI dans une installation de grande inertie, on observe à chaque démarrage, à chaque perturbation importante ou lors d'un changement de régime, un dépassement notable du point de consigne (fig. 25).

le dispositif anti-saturation supprime le chargement du condensateur. Il arrête l'action intégrale quand la vanne est aux positions extrêmes. (fig. 26)

Ces exigences nous sont permises par un Téléperm. 300 K. possédant un dispositif anti-saturation ramenant l'action PI en action P avec augmentation du gain du régulateur.



6.5 SPECIFICATIONS DE COMMANDE.

Poste de régulation indicateur universel TELEPERM300K.  
pour un pilotage de consigne.

M 74621

DO140 - J111

Z | D99  
F03  
G03

D: Régulation à consigne fixe (Régulateur pilote en cascade)

0: sans mémoire et sans relais.

1: Energie auxiliaire : 220v alternatif.

4: action PI/P

0: sans élément D

J1: grandeur réglée thermocouple.

11: sortie 0 à 20 mA.

Z: D99: capteur : thermocouple NiCr-Ni.

Etendue de mesure : 500 ÷ 570 °C

F03: Signalisation de rupture du thermocouple  
température simulée trop haute.

G03: Echelle spéciale pour thermocouple 500 ÷ 570 °C.

## CONCLUSION

Tout au long de ce projet j'ai appris beaucoup de choses que je souhaite appliquer dans des secteurs de l'industrie Algérienne. J'ai pu concrétiser partiellement la théorie en un projet. C'est alors que sur la base de la simulation numérique, j'ai compris le comportement dynamique de l'objet de régulation adoptant ainsi le système de réglage en cascade ; cependant il fallait passer au côté pratique où j'ai conçu un schéma de refroidisseur et choisi quelques éléments (tubes) après dimensionnement.

Aussi j'ai fait connaissance avec le matériel d'automatisme en l'étudiant et choisissant certains éléments.

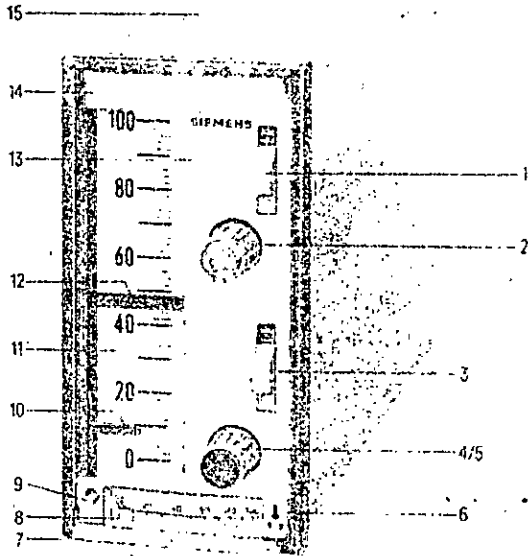
Le dérangement du simulateur pneumatique du Génie-Chimique ne m'a pas permis le réglage des régulateurs ceci par le choix d'un modèle simplifié.

La participation à une visite d'une centrale thermique m'aurait beaucoup aidée à enrichir ce projet ...

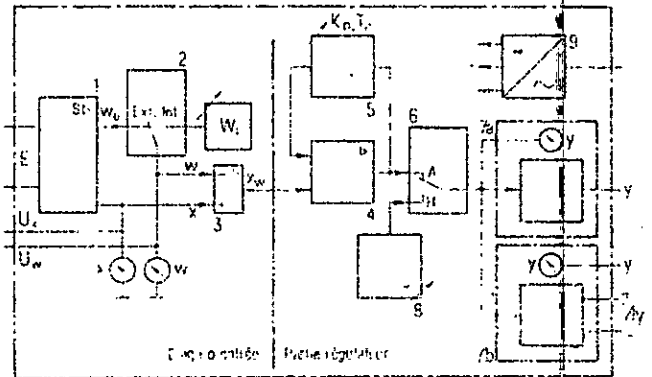
Je dirais aussi que le calcul effectué m'a permis de solliciter et de me familiariser avec l'ordinateur de l'école qui n'attend qu'à être utilisé ; mais pour un projet plus détaillé et pour plus de précision dans le calcul on devrait utiliser un ordinateur plus sophistiqué.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Revue générale de thermique n° 100 Avril 1970.  
Etude des modèles math. d'échangeurs de chaleur en vue de la régulation.
  2. Technique de la régulation industrielle. Daniel Dindeleux. Eyrolles 1978.
  3. Mesure et régulation en automatique industrielle - Robert Fardin.
  4. La régulation dans les centrales thermiques. Gunther Klefenz.
  5. Régulation automatique des processus. Eckmann.
  6. Fortran IV M. Dreyfus.
  7. Thermodynamics tables in SI units - R.W. Haywood 2<sup>e</sup> Edition USA.
  8. Calcul différentiel et intégral - Piskounov.
  9. Thermique - cours de M<sup>l</sup> Stoyanov.
  10. Automatismes - Tome XVI (Journées d'études de Bruxelles) n°2 Fev. 1971.  
Problème de la saturation de l'action intégrale.
- TECHNIQUE DE L'INGENIEUR.
11. Généralités.
  12. Mécanique et chaleur.
  13. " des fluides.
  14. Production de la vapeur auxiliaire et d'eau surchauffée.
  15. Générateur de vapeur - Projet de fin d'études -
  16. Norme Française A49-213 - tubes en acier -
  17. Norme polonaise ZN-76 / 1314 - 1501.
  18. Régulateurs teleperm pour la technique de la régulation des processus.  
catalogue M34 Siemens 1977.
  19. Appareils d'analyse industriels et appareils de mesure de température. Catalogue MP11 Siemens 1978.
  20. Pneumatische und hydraulische stellantriebliche stellventile und stellklappen. Katalog. MP34 1976.
  21. Teleperm and solperm electric controllers for process engineering catalog. MP31 1980.
  22. Electric actuators catalogue MP35 1976

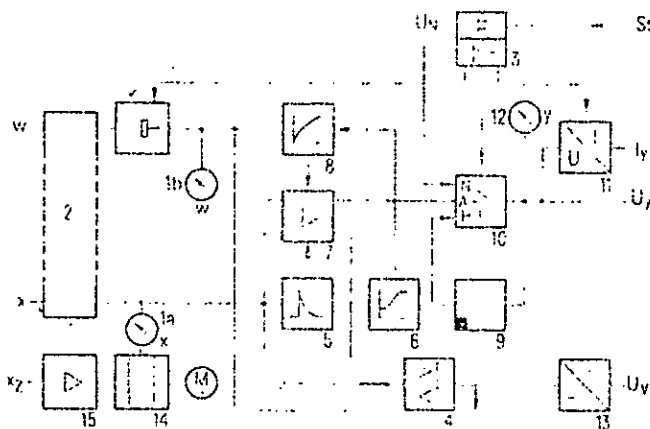


- |   |  |
|---|--|
| 1 Commutateur de grandeur: plate  | 9 Bouton-poussoir d'équilibrage (régulateur continu) |
| 2 Indexeur de consigne (vert)   | 10 Aiguille de mesure (rouge)                        |
| 3 Commutateur de mode de fonctionnement                                     | 11 Echelle   |
| 4 Poussoir rotatif (noir) pour fonctionnement manuel (régulateur pas à pas) | 12 Aiguille de consigne (verte)                      |
| 5 Indexeur de courant de réglage manuel (noir) (régulateur continu)         | 13 Plaque frontale                                   |
| 6 Symbole de vanne  | 14 Plaque signalétique des points de mesure          |
| 7 Langue de d'extraction  | 15 Boîtier   |
| 8 Indicateur de position  |  |



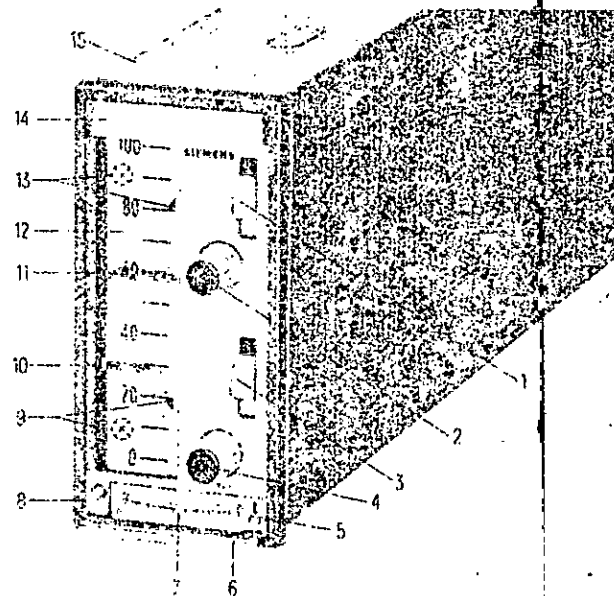
- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1 Convertisseur de signaux         | 6 Commutateur de mode de fonctionnement |
| 2 Adaptation W                     | 7a Etage de sortie K                    |
| 3 Amplificateur d'écart de réglage | 7b Etage de sortie S                    |
| 4 Amplificateur de régulation      | 8 Réglage manuel Y                      |
| 5 Asservissement                   | 9 Adaptation secteur                    |

Fig. 3/3 Régulateur TELEPERM 30, schéma fonctionnel



- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 1a Equipage de mesure de valeur réelle                          | 9 Mémoire Y                           |
| 1b Equipage de mesure de valeur de consigne avec réglage manuel | 10 Commutateur Y                      |
| 2 Convertisseur de signaux                                      | 11 Convertisseur U/I                  |
| 3 Carte logique   | 12 Indicateur Y                       |
| 4 Relais à seuils   | 13 Bloc d'alimentation                |
| 5 Limiteur Y  | 14 Enregistreur avec moteur synchrone |
| 6 Amplificateur de régulation                                   | 15 Equipage de mesure additionnel     |
| 7 Asservissement  |                                       |
- \* Uniquement pour poste de régulation enregistreur

Fig. 2/16 Schéma fonctionnel du poste de régulation universel TELEPERM 300



- |   |   |
|---|---|
| 1 Commutateur de consigne (vert/gris ou vert/jaune)       | 9 Index et voyant (derrière le cadran) pour le seuil minimal  |
| 2 Indexeur de consigne (vert)                             | 10 Aiguille de mesure (rouge)                                 |
| 3 Commutateur de mode de fonctionnement (noir/gris/jaune) | 11 Aiguille de consigne (verte)                               |
| 4 Indexeur de grandeur de sortie                          | 12 Echelle  |
| 5 Symbole de position de vanne                            | 13 Index et voyant (derrière le cadran) pour le seuil maximal |
| 6 Langue de d'extraction                                  | 14 Plaque signalétique  |
| 7 Indicateur de grandeur de sortie                        | 15 Rail de fixation   |
| 8 Bouton-poussoir d'équilibrage de course de sortie       |   |

Fig. 2/14 Poste de régulation indicateur universel TELEPERM 300

