

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

28/80

وزارة التعليم والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

lex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

(En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat)

SUJET

**Développement d'un programme
pour le calcul thermodynamique
d'un cycle à vapeur
à regeneration**

Proposé par :

M.A. AIT ALI

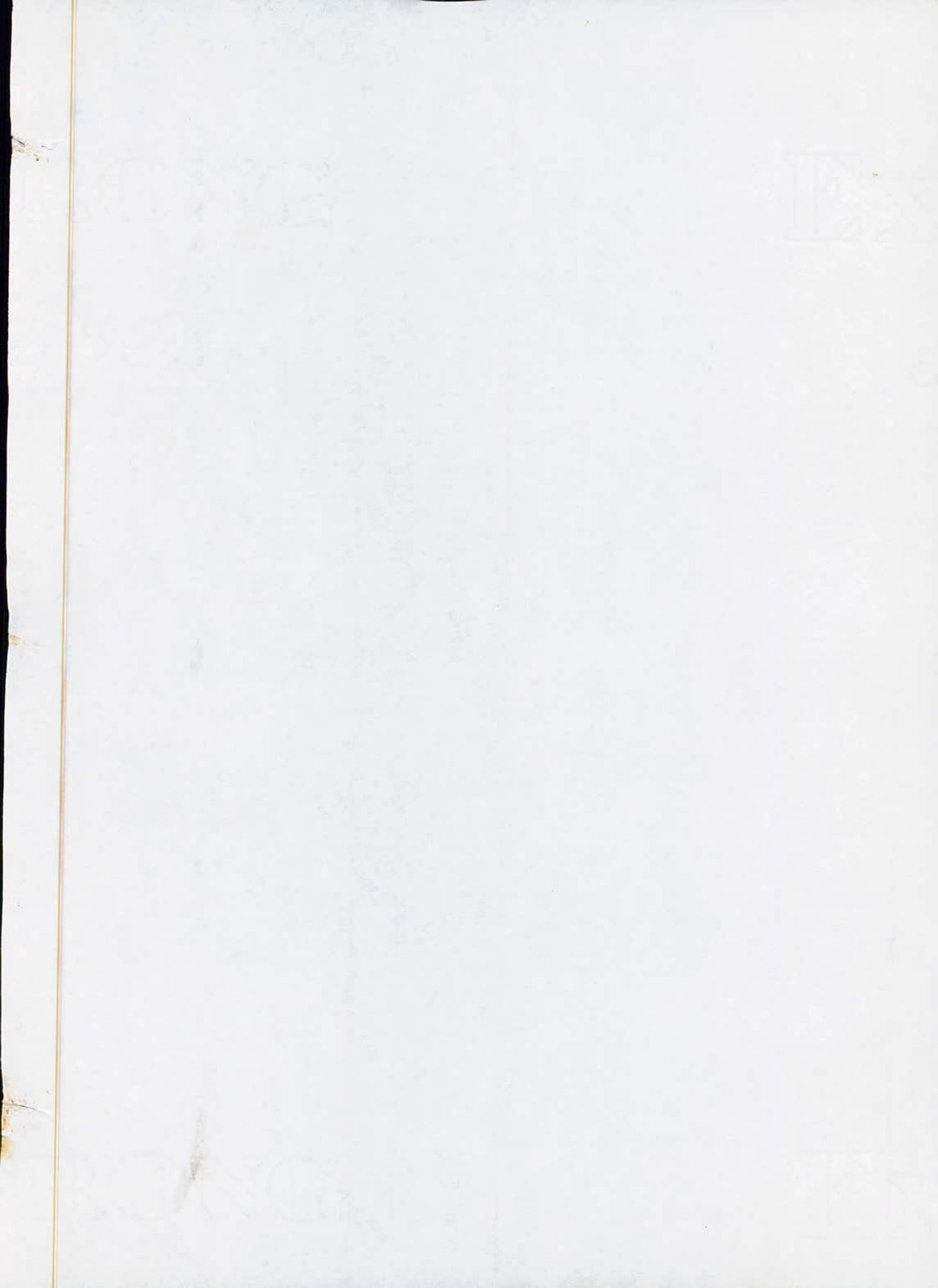
Etudié par :

BEROUAKEN Ali

Dirigé par :

M.A. AIT ALI

PROMOTION : JUIN 1986



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

(En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat)

SUJET

**Développement d'un programme
pour le calcul thermodynamique
d'un cycle à vapeur
à regeneration**

Proposé par :

M.A. AIT ALI

Etudié par :

BEROUAKEN Ali

Dirigé par :

M.A. AIT ALI

PROMOTION : JUIN 1986

Département : Mécanique
Promoteur : M.A.AIT ALI
Élève ingénieur: A.BEROUAKEN

المكتبة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
École Nationale Polytechnique

الدراسة الوطنية المتعددة التقنيات
دائرة: الهندسة الميكانيكية
الموجه: م. أ. أيت علي
الطالب: علي بروقن .

الموضوع: إعداد برنامج لحساب الخصائص الديناميكية الحرارية لدورة بخارية ذات سحب جزئي لإعادة التسخين .

الملخص: تتمثل هذه الدراسة في إعداد برنامج يعتمد على المعطيات الجدولية من أجل حساب الخصائص الديناميكية الحرارية لدورة بخارية تقع خلف مسخنة تستخدم الغازات الناتجة عن الاحتراق ضمن العنفة الغازية، ويسمح هذا البرنامج أيضاً بحساب العمل النوعي والمردود الحراري للدورة ومن أجل ذلك ينبغي أن نأخذ بعين الاعتبار المعطيات التالية: ضغط التكيف، درجة الحرارة والنسبة عند مدخل العنفة عدد مرات السحب الجزئي والنسبة الدورانية للمبازر عند مخرج العنفة ..

SUJET : Développement d'un programme pour le calcul thermodynamique d'un cycle à vapeur à regeneration

RESUME : Cette étude est une mise au point d'un programme informatique utilisant des données tabulaires pour le calcul thermodynamique d'un cycle à vapeur situé à l'aval d'une chaudière de récupération de chaleur des gaz d'échappement de turbine à gaz. Le programme développé permet de calculer le travail net spécifique et le rendement thermique pour lequel on spécifie la pression de condensation, la température et la pression d'admission à la turbine, le nombre de régénérations et le titre minimal à la sortie de la turbine.

SUBJECT : Development a computer program for a steam cycle with regeneration

ABSTRACT: This study deals with the development a computer program using a tabular equation of state for steam in order to evaluate the net work and the efficiency of a Rankine steam cycle with regeneration and reheat, which is coupled with a Brayton gaz turbine cycle and for which we specify the conditions at turbine inlet, the pump inlet, the number of regenerations and the steam quality at the turbine exit.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail je remercie vivement Mr M.A. AIT ALI, professeur a l'ENP pour son aide precieuse et ses conseils judicieux qu'il m'a prodigé tout au long de ce projet.

Que tous ceux qui ont contribué a ma formation trouvent ici l'expression de ma parfaite reconnaissance.

DEDICACES

Je dedie ce modeste travail:

- a mes chers parents
- a toute ma famille
- a tous mes collegues et amis

SOMMAIRE

INTRODUCTION

- Généralités 1
- Objet de l'étude

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CYCLES THERMODYNAMIQUES

- 1/ Cycles thermodynamiques à vapeur d'eau
 - 1.1. Cycle de RANKINE 3
 - 1.2. Cycle de HIRN 5
 - 1.3. Cycle à resurchauffe 7
 - 1.4. Cycle à régénération 8
- 2/ Cycles employant la turbine à gaz 12
 - 2.1. Description de l'installation
 - 2.2. Cycle de Brayton - Joule
 - 2.3. Cycle de Brayton à régénération 15
 - 2.4. Cycle combiné gaz - vapeur 17

CHAPITRE II : ETUDE DETAILLEE DU CYCLE VAPEUR

- 1/ Choix du cycle modèle 20
- 2/ Analyse des transformations 21
- 3/ Détermination des débits de soutirages 28
- 4/ Rendement du cycle 29

CHAPITRE III : ELABORATION DU PROGRAMME D'ORDINATEUR

- 1/ Description générale 33
- 2/ Tables thermodynamiques
- 3/ Notations et symboles utilisés dans le programme 36

4/ Organigramme	38
5/ Programme	48
6/ Résultats	66

APPENDICE : CALCUL THERMODYNAMIQUE D'UN CYCLE COMBINE GAZ-VAPEUR

1/ Calcul du cycle de Brayton-Joule	70
a- Choix du combustible	
b- la combustion stochiométrique	
c- la combustion réelle	
d- pouvoir comburivore	
2/ Calcul du cycle Brayton à régénération	
3/ Calcul du cycle vapeur (résultats du programme)	
a- rendement global du cycle combiné	
b- consommation spécifique	

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

BIBLIOGRAPHIE

NOTATIONS UTILISEES

Les principales notations utilisées dans ce projet se trouvent résumées dans le tableau suivant :

Symbole	Objet
h	enthalpie spécifique, kJ/kg
s	entropie spécifique, kJ/kg. °K
v	volume spécifique, m ³ /kg
u	energie interne spécifique, kJ/kg
\dot{m}	débit massique total, kg/s
\dot{m}_v	débit massique vapeur, kg/s
x	qualité de la vapeur, $\frac{\dot{m}_v}{\dot{m}}$
T	température, OK
P	pression, Mpa
ρ	masse volumique, kg/m ³
τ	taux de compression
C_p	chaleur spécifique à pression constante, kJ/kg. °K
ϵ	efficacité du récupérateur
Q	quantité de chaleur
P_{cl}	pouvoir calorifique du combustible kJ/kg
λ	excès d'air
A°	pouvoir comburivore du combustible
m	masse spécifique, kg
q	rapport de mélange, masse combustible/masse d'air
η_{th}	rendement thermique
w	travail spécifique, KJ/kg
η_c	rendement interne du compresseur
η_t	rendement interne de la turbine

GENERALITES:

IL est souvent nécessaire de faire plusieurs évaluations techniques afin d'élaborer de nombreuses solutions possibles et de retenir la meilleure comme Choix final.

Ces évaluations requièrent des calculs complexes qui nécessitent de plus en plus l'emploi de l'informatique et des Codes numériques; c'est notamment le cas de l'évaluation des cycles thermodynamiques utilisant les équations d'état tabulaires.

Le calcul énergétique d'une installation thermique motrice ayant pour fluide moteur la vapeur d'eau repose sur le choix du bon cycle thermodynamique. C'est le cycle qui répond le mieux aux exigences relatives de la puissance et du rendement, pour une utilisation rationnelle de l'énergie thermique disponible et sa transformation en énergie mécanique ou électrique.

OBJET DE L'ETUDE

Notre étude porte sur l'évaluation thermodynamique d'un cycle vapeur situé à l'aval d'une Chaudière de récupération de Chaleur des gaz d'échappement de turbine à gaz.

Celle-ci commence par des descriptions générales des Cycles thermodynamiques à vapeur d'eau, des cycles de la turbine à gaz et des cycles comportant une Chaudière de récupération.

L'élaboration du programme qui prend une grande partie de notre étude fait l'objet d'une analyse détaillée des différentes transformations thermodynamiques constituant le cycle décrit par le fluide.

Le programme développé utilise les tables de mollier pour calculer le travail net spécifique et le rendement thermique, pour lequel on Spécifié la pression de Condensation, la température et la pression d'admission à la turbine, le nombre de soutirages et le titre minimal de la vapeur à la sortie de la turbine.

Ce programme nous a permis d'étudier les variations du travail net et du rendement thermique en fonction du nombre de soutirages, de la température d'admission de la vapeur et de la pression au condenseur.

Dans la dernière partie nous poursuivons notre étude par un calcul du cycle de turbine à gaz en faisant intervenir la consommation de Chaleur et les propriétés des gaz d'échappement, ainsi que le calcul d'un cycle vapeur, pour évaluer en fin de compte le rendement thermique d'un cycle combiné gaz-vapeur.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES CYCLES THERMODYNAMIQUES

1. -1 Cycles thermodynamiques de vapeur d'eau

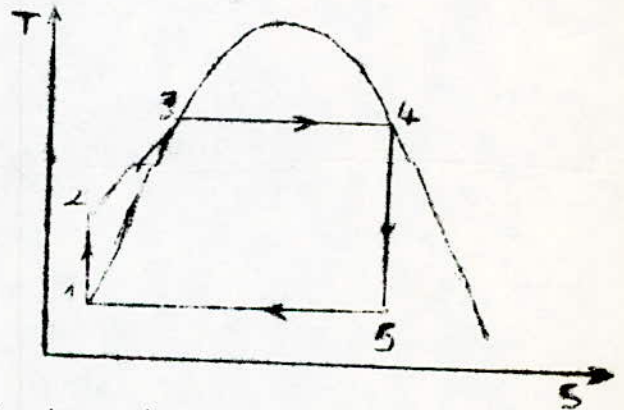
1.1 Cycle de Rankine

Le cycle de RANKINE dans sa forme la plus simple est constitué par quatre étapes:

- 1---2: pampage isentropique de l'eau condensée
- 2----3: Addition de chaleur à pression constante
- 3----4: Evaporation à pression constante
- 4----5: Détente isentropique
- 5----1- Condensation à pression constante.

La figure CI.1 a montre le cycle de Rankine dans le diagramme entropique (T-S)

Fig CI.10



L'eau liquide saturée (point 1) est pompée isentropiquement dans la chaudière (étape 1-2)

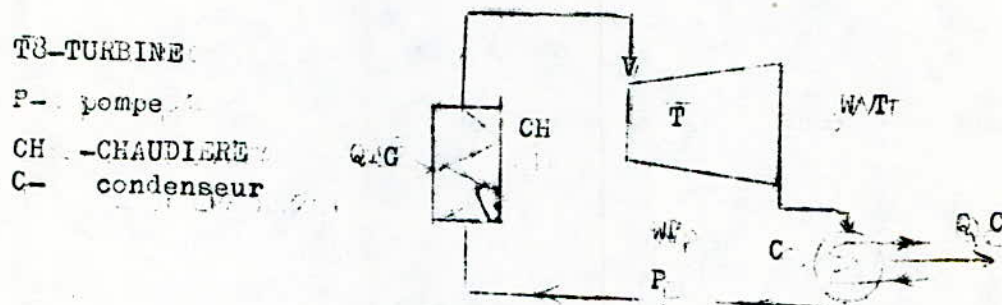
Dans la chaudière l'eau est réchauffée jusqu'au point de saturation (point 3) et ensuite elle est transformée complètement en vapeur (point 4). Le processus 2-3-4 est effectué à pression constante. La vapeur d'eau saturée

(point 4) entre dans la turbine, dans laquelle elle subit une expansion isentropique jusqu'au point 5.

Le fluide qui sort de la machine au point 5 est constitué par un mélange de vapeur d'eau liquide. Ce mélange entre dans le condenseur d'où l'eau sort en phase saturée liquide (Point 3). Ce processus de condensation est isothermique réversible.

Le cycle de Rankine, tel que décrit précédemment est appelé cycle de Rankine idéal: les étapes isothermiques et les étapes d'expansion et de compression adiabatiques sont réversibles.

Le diagramme énergétique du cycle de Rankine mentionné ci-dessus est le suivant (fig CI.1.b):



WT: Travail fourni par la turbine

WP: Travail pris par la pompe

QC: Chaleur cédée par la vapeur dans le condenseur

QG: Chaleur reçue par la vapeur dans la chaudière

En pratique les transformations d'une centrale thermique à vapeur sont le siège de différentes pertes inévitables.

.../...

Si on considère seulement les pertes thermodynamiques dans la turbine et la pompe, le cycle de Rankine sera modifié comme suit: (fig C.I.1.C)

4-5: détente réelle dans la turbine

1-2: compression réelle dans la pompe de refoulement
Le rendement thermique du cycle de Rankine s'écrit:

$$\frac{\text{NTH-TRAVAIL DE LA TURBINE-TRAVAIL DE LA POMPE}}{\text{Quantité de Chaleur fournie}}$$

$$\text{NTH: } \frac{(h_4 - h_5') - (h_2' - h_1)}{h_4 - h_2}$$

1.2 CYCLE DE HIRN:

En augmentant la température de la vapeur avant son introduction dans la turbine (Fig CI 1.3), on augmente la puissance spécifique fournie par Kg de vapeur et on obtiendra un rendement nettement supérieur à celui de Rankine.

La surchauffe de la vapeur se fait dans un organe spécial de la chaudière appelé sur chauffeur, où la vapeur est portée à une température supérieure à la température de saturation.

Les diagrammes (H,S) et (T,S) correspondants au cycle de Hirm sont représentés sur la figure (CI.12). L'étape 4-5 est une surchauffe isobare en phase vapeur.

Le rendement thermique réel du cycle de Hirm s'écrit.

$$\text{nth) = } \frac{(h_5 - h_5') - (h_1' - h_2)}{h_5 - h_2}$$

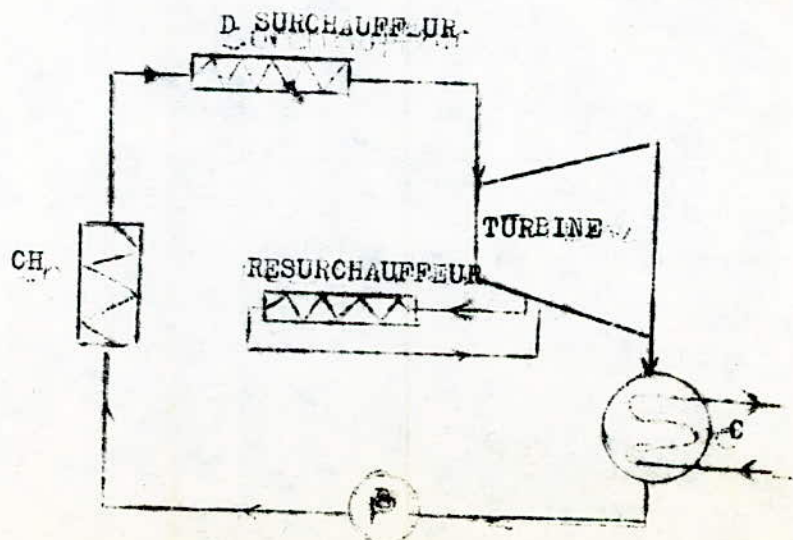
Lorsque la vapeur qui sort de la turbine est caractérisée par une forte teneur en eau liquide, elle exerce une influence néfaste sur la tenue des aubes et le rendement interne relatif de la turbine d'où un abaissement du rendement de toute l'installation.

Un procédé permettant d'augmenter le titre de la vapeur à la fin de la détente est la resurchauffe. Dès que la vapeur se détend jusqu'à une certaine pression elle est extraite de la turbine et dirigée dans un surchauffeur complémentaire où elle atteint une température généralement égale à celle de la sortie du premier surchauffeur, puis elle est réintroduite de nouveau dans la turbine pour continuer sa détente.

Les diagrammes (h,S) et (T,S) du cycle de resurchauffe sont représentés sur la figure (Cl.1.3)

La resurchauffe ne permet pas toujours d'augmenter le rendement mais elle permet d'augmenter la puissance spécifique fournie par KG de vapeur.

§ Schémas de l'installation:



- 5-6: première détente partielle isentropique dans la turbine
 5-6: " " " réelle " "
 6-7: Resurchauffe isobare en phase vapeur
 7-8: deuxième détente partielle isentropique
 7-8: " " " réelle
 8-1: Condensation isobare
 1-2: Refoulement adiabatique réel
 2-3: Echauffement isobare
 3-4: Evaporation isobare
 4-5: Surchauffe isobare en phase vapeur

Le rendement thermique réel du cycle à resurchauffe s'écrit :

$$\eta_{th} = \frac{(h_5 - h_6) + (h_7 - h_8) - (h_2 - h_1)}{h_5 - h_2}$$

1.4 Cycle à régénération

Les différents cycles cités précédemment peuvent tous être améliorés par des soutirages de vapeur qui ne sont autres que des extractions de vapeur à des pressions déterminées, pour réchauffer l'eau d'alimentation du générateur de vapeur.

Le réchauffage est obtenu au moyen de récupérateurs de type à surface ou à mélange qui sont des échangeurs de chaleur dans lesquels on dirige une partie du débit total de vapeur extrait aux étages intermédiaires de la turbine. La vapeur soutirée est condensée dans les récupérateurs à pression constante.

.../...

Le cycle à régénération est représenté sur les diagrammes (T.S) et (H.S) (fig CI.4 .a). Rendement du cycle: **RENDEMENT DU CYCLE:**

La vapeur soutirée réchauffe l'eau destiné à l'alimentation de la chaudière et par conséquent elle augmente la température moyenne d'apport de chaleur de la source chaude.

par définition le rendement du cycle de CARNOT s'écrit:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

T_f: température moyenne d'enlèvement de chaleur de la source froide (condenseur).

T_c: température moyenne d'apport de chaleur de la source chaude (chaudière).

Le rendement du cycle de Hirn à régénération varie évidemment dans le même sens que celui de CARNOT. C'est à dire augmente en même temps qu'augmente l'écart entre les températures des sources chaude et froide.

Finalement, la régénération permet d'augmenter le rendement thermique en augmentant la température moyenne de la source chaude.

Le rendement thermique du cycle à régénérations représenté par la figure CI 1.4a s'écrit:

$$\eta = \frac{H_1 - H_2 - H_3}{H_1 - H_2} = \frac{m_1 (h_{s1} - h_c) - \sum_{i=1}^{n-1} w_{pi}}{H_1 - H_2}$$

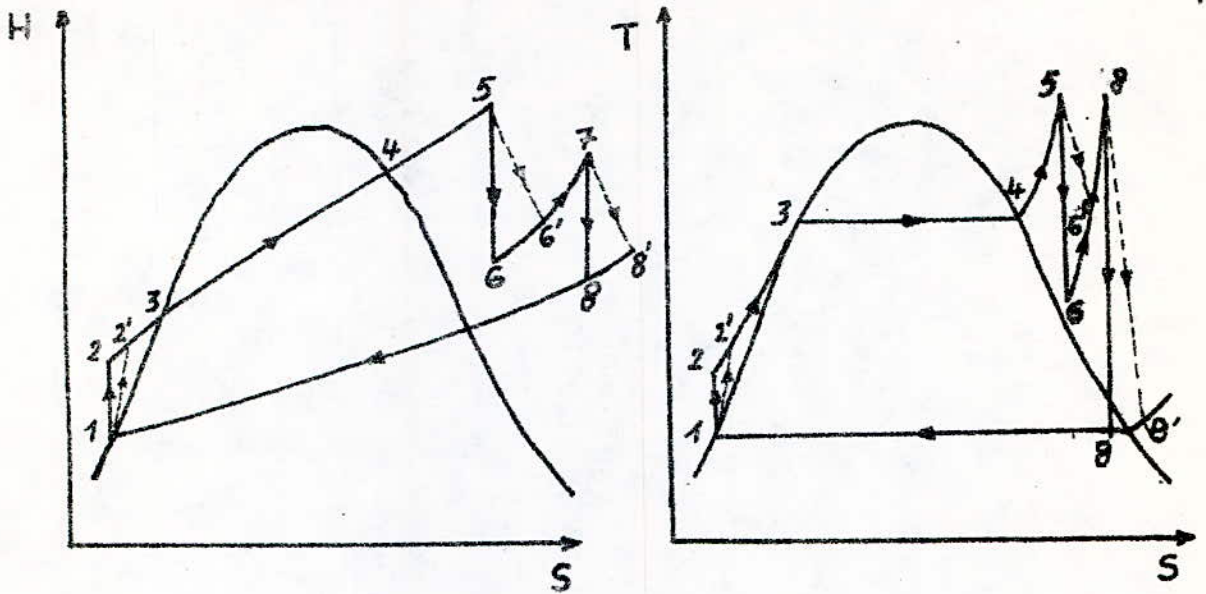


Fig CI.1.3

Diagrammes (H, s) et (T, s) du
cycle à resurchauffe

1.2. Cycle de la turbine à gaz

1.2.1. Description

La turbine à gaz a un fonctionnement analogue à celui d'une turbine à vapeur, mais le fluide moteur, au lieu d'être de la vapeur d'eau, est formé par les gaz provenant de la combustion avec de l'air atmosphérique, soit de gaz naturel, du gaz de haut fourneau ou d'un combustible dérivé de pétrole.

Le principe de la turbine à gaz consiste à soumettre un certain débit gazeux successivement à une compression et à une détente, ces deux opérations étant séparées par un chauffage à l'aide de la chaleur fournie par le combustible.

Dans la majorité des cas, l'aspiration du compresseur est directement reliée à l'atmosphère de même l'échappement est généralement reliée à l'atmosphère, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un récupérateur de chaleur dans le cas d'un cycle à régénération.

1.2.2. Cycle de Brayton-Joule

L'étude du cycle thermodynamique décrit réellement dans un cycle gaz devrait en toute rigueur tenir compte de toutes les imperfections des différentes parties de ces machines. Nous ferons intervenir dans l'étude de ce cycle les rendements du compresseur et de la turbine.

Nous adopterons pour le fluide traversant la turbine et le compresseur des hypothèses simplificatrices tels que égalité des débits subissant la compression et la détente.

Le cycle de Brayton-Joule est représenté sur le diagramme (T,S) dans la figure (C.1.2b)

- 1 - 2' compression isentropique de l'air
- 1 - 2 compression réelle de l'air
- 2 - 3 combustion adiabatique du mélange
- 3 - 4' détente isentropique des gaz de combustion
- 3 - 4 détente réelle des gaz de combustion

Désignons par W_c le travail nécessaire pour la compression de un kg d'air et par W_t

Le travail fourni par la détente de un kg de gaz de combustion

Le travail utile W_u produit par un kg de fluide décrivant le cycle est donné par la relation :

$$W_u = W_t - W_c \quad (2.1)$$

D'autre part, soit la quantité de chaleur dépensée pour porter la température de un kg d'air suivant l'isobare p_2 de T_2 à T_3 .

$$Q = h_3 - h_2 \quad (2.2)$$

$$\text{On a aussi } W_c = h_2 - h_1 \quad (2.3)$$

$$W_t = h_3 - h_4 \quad (2.4)$$

des relations (2.3) et (2.4) et (2.1) on a

$$W_u = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) \quad (2.5)$$

par définition le rendement thermique du cycle s'écrit :

$$\eta_{th} = \frac{W_u}{Q}$$

des relations (2.2) et (25), le rendement thermique du cycle sera exprimé par :

$$\eta_{th} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \quad (2.6)$$

Cette expression peut-être simplifiée avec les hypothèses des gaz parfaits et des chaleurs spécifiques constantes.

Les transformations 1 : 2' et 3 - 4' sont isentropiques alors :

$$\frac{T_{2'}}{T_1} = \frac{T_3}{T_{4'}} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \tau^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2.7)$$

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{le taux de compression}$$

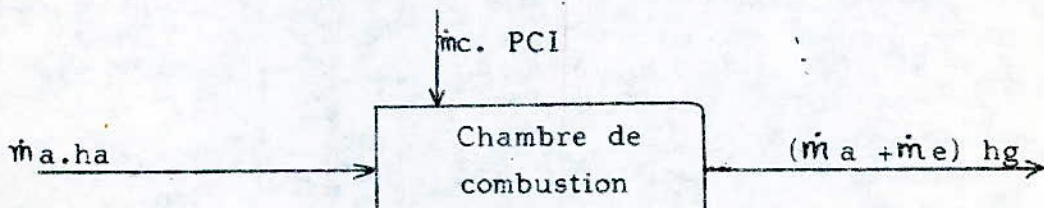
soit η_c le rendement du compresseur

$$\eta_c = \frac{h_1 - h_{2'}}{h_1 - h_2}$$

η_t le rendement de la turbine

$$\eta_t = \frac{h_4 - h_3}{h_{4'} - h_3}$$

bilan énergétique de la chambre de combustion :



\dot{m}_a = débit d'air arrivant du compresseur

\dot{m}_c = débit de combustible

PcI = pouvoir calorifique inférieur du combustible

η_{comb} = rendement de la combustion

On a :

$$\dot{m}_a \cdot h_a + \dot{m}_c \cdot \text{PcI} = (\dot{m}_a + \dot{m}_c) h_g$$

$$h_a + \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_a} \cdot \text{PcI} = 1 + \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_a} h_g$$

$$\text{On pose } q = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_a} \quad \text{rapport de mélange}$$

finalement on a :

$$h_a + q \cdot \text{PcI} = (1 + q) h_g \quad (2.8)$$

2.3. Cycle de Brayton à Régénération :

Une quantité importante d'énergie est déchargée à l'atmosphère avec les gaz d'échappement. Pour améliorer le rendement du cycle, on récupère une partie de cette énergie pour réchauffer l'air à la sortie du compresseur.

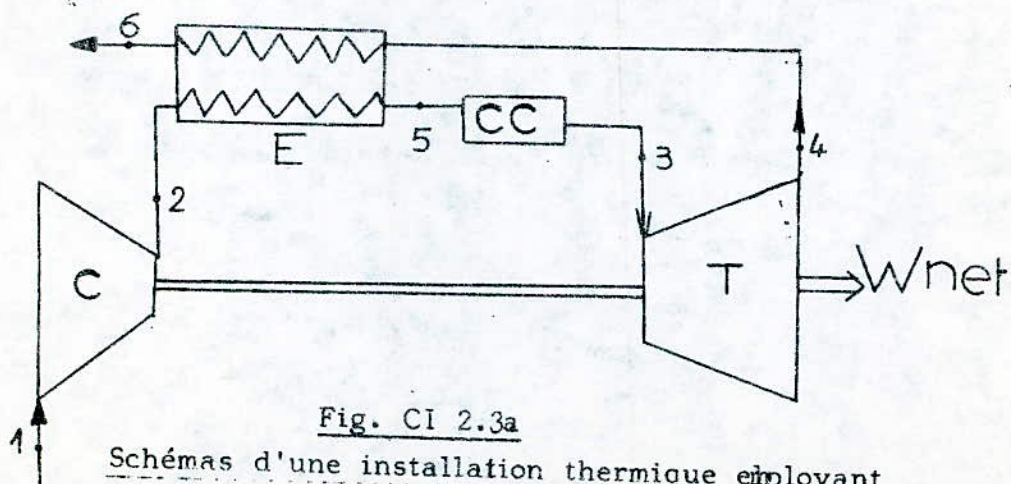
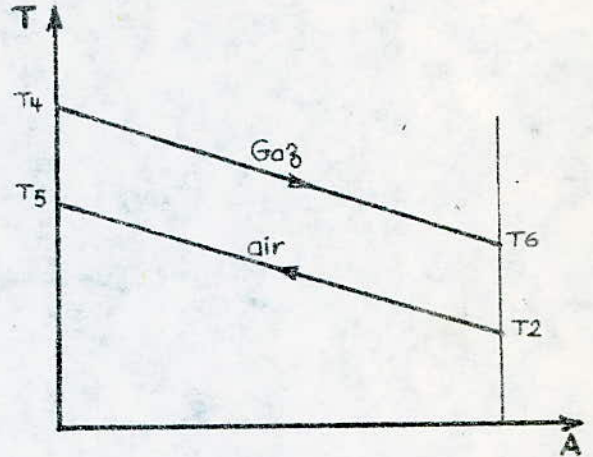


Fig. CI 2.3a

Schémas d'une installation thermique employant le cycle de Brayton à régénération

Efficacité du récupérateur :

Diagramme (température, surface d'échange) du récupérateur air/gaz d'échappement.



D'une manière générale l'efficacité du récupérateur est définie par :

$$\epsilon = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2}$$

Cette grandeur est le rapport de l'élévation d'enthalpie subie par le gaz chauffé à celle qui serait réalisée dans un échangeur ayant une surface de transmission infinie.

1.3. Cycles combinés GAZ - VAPEUR

Dans un cycle thermodynamique bien conçu, l'énergie doit-être fournie à la température la plus élevée que possible, par contre la chaleur rejetée doit avoir pratiquement la température ambiante .

Les calculs d'optimisation des rendements énergétiques, c'est-à-dire les efforts pour l'utilisation rationnelle de l'énergie thermique et sa transformation en énergie mécanique ont conduit à la conception d'un cycle thermodynamique combinant cycle de turbine à gaz au cycle à vapeur.

Ces deux cycles occupent des domaines de pression, de volume et de températures complémentaires laissant apparaître des potentialités importantes d'associations avantageuses et permettant une économie sensible de l'utilisation des combustibles.

Ils'agit de récupérer une partie de la chaleur contenue dans les gaz d'échappement et de prévenir ainsi leur dégradation gratuite dans l'atmosphère, en associant au cycle de turbine à gaz un cycle de vapeur composé d'une chaudière de récupération, d'une turbine à condensation et d'un circuit de condensation et prélèvement. (fig. CI.3).

Cette récupération permet d'augmenter de façon appréciable aussi bien la puissance développée que le rendement de la transformation énergétique globale.

RENDEMENT THERMIQUE DU CYCLE COMBINÉ GAZ+VAPEUR :

Par définition le rendement global du cycle combiné gaz-vapeur s'écrit :

$$\eta_{th} = \frac{\text{Energie électrique produite}}{\text{Energie du combustible consommé}}$$

L'énergie électrique totale produite est la somme des énergies électriques produites par la turbine à gaz et par la turbine à vapeur; l'énergie du combustible consommé est la chaleur fournie par la combustion de celui-ci avec de l'air atmosphérique dans la chambre de combustion de turbine à gaz.

d'où le rendement global s'écrit :

$$\eta_g = \frac{PeV + PeG}{PC}$$

PeG = puissance électrique produite par la turbine à gaz en kWh
 PeV = puissance électrique fournie par la turbine à vapeur en kWh
 PC = Energie fournie par le combustible en kWh

CONSOMMATION SPECIFIQUE DE CHAËUR

C'est la quantité de combustible qui produit une puissance globale unitaire.

$$CS = \frac{PC}{PeV + PeG} = \frac{1}{\eta_{th}} \text{ en kg de combustible / kWh}$$

CHAPITRE II : ETUDE DETAILLEE DU CYCLE DE VAPEUR

1/ Choix du cycle modèle

Dans l'étude générale des cycles thermodynamiques de vapeur d'eau, on s'est rendu compte qu'il y'a plusieurs formes de cycles qui diffèrent les uns des autres par l'état de la vapeur qui alimente la turbine, les conditions de pression et de température régnant à l'entrée et à la sortie de chaque appareil, le nombre de soutirages etc...

Pour cela, nous devons en toute rigueur généraliser notre étude en prenant un cycle ayant toutes les formes possibles.

Le cycle adopté (fig. CII.1) tient compte des conditions suivantes :

- la vapeur peut-être surchauffée ou saturée sèche à l'entrée de la turbine
- la détente et la compression sont réelles
- on néglige les pertes de charge et de chaleur qui se produisent dans tous les appareils autres que la turbine et la pompe.
- on limite le titre minimal à la sortie de la turbine
- possibilité de faire une deuxième resurchauffe si le titre minimal n'est pas atteint
- les régénérateurs sont à mélange.

11.2. Analyse des transformations

En décrivant le cycle, la vapeur d'eau subit plusieurs transformations. Ces transformations thermodynamiques diffèrent les unes des autres par l'état physique du fluide avant et après chaque étape et aussi par la nature du processus.

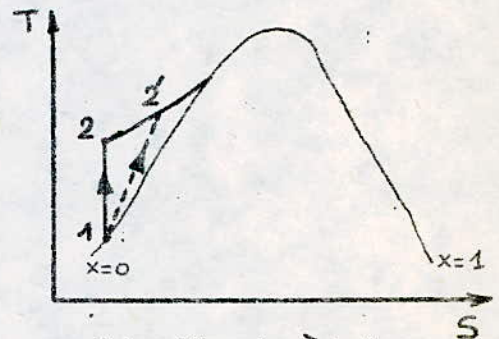
On devra en premier lieu faire une analyse exhaustive de toutes les transformations possibles et ensuite les réunir dans un cycle complet prenant toutes les formes possibles.

Dans cette partie on fait l'analyse de toutes les transformations que peut subir la vapeur d'eau pour décrire le cycle thermodynamique.

Ces transformations sont :

a) Compression adiabatique d'un liquide incompressible

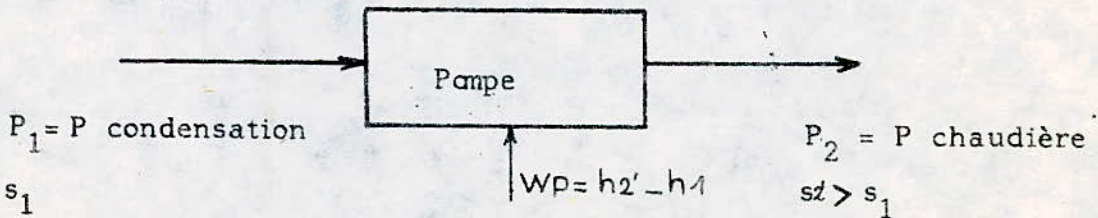
- 1 - 2 compression isentropique
- 1 - 2' compression réelle



Liquide saturé
($x = 0$)

Compression
adiabatique

Liquide comprimé



On considère au premier lieu la compression isentropique (1 — 2).

Le travail effectué par la pompe est $W_p = h_2 - h_1$ qui pour un fluide incompressible se traduit par :

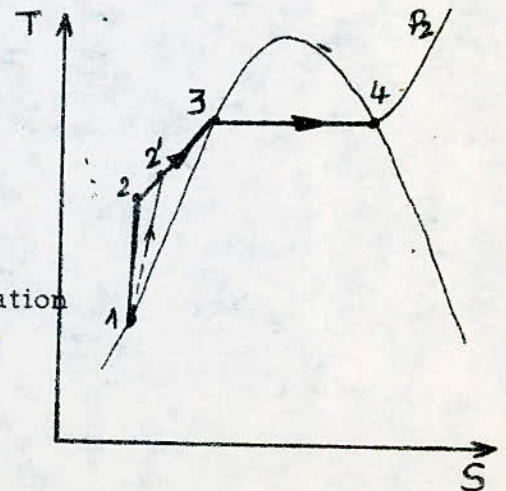
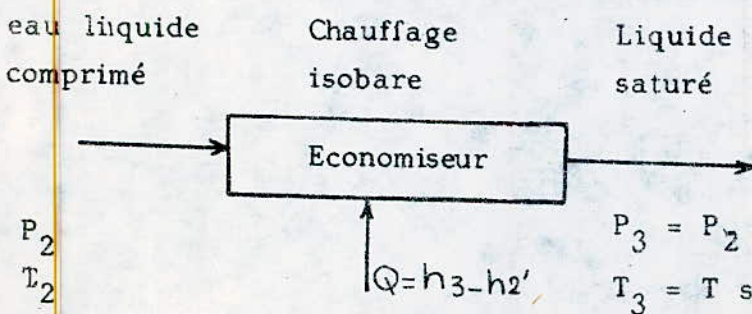
$$\begin{aligned} W_p &= V (P_2 - P_1) \\ &= h_2 - h_1 \end{aligned}$$

En réalité la compression dans la pompe est irréversible, le processus n'est plus isentropique et on définit le rendement interne de la pompe par :

$$\eta_{ip} = \frac{h_2 - h_1}{h_2' - h_1}$$

$$h_2' = h_1 + \frac{(h_2 - h_1)}{\eta_{ip}}$$

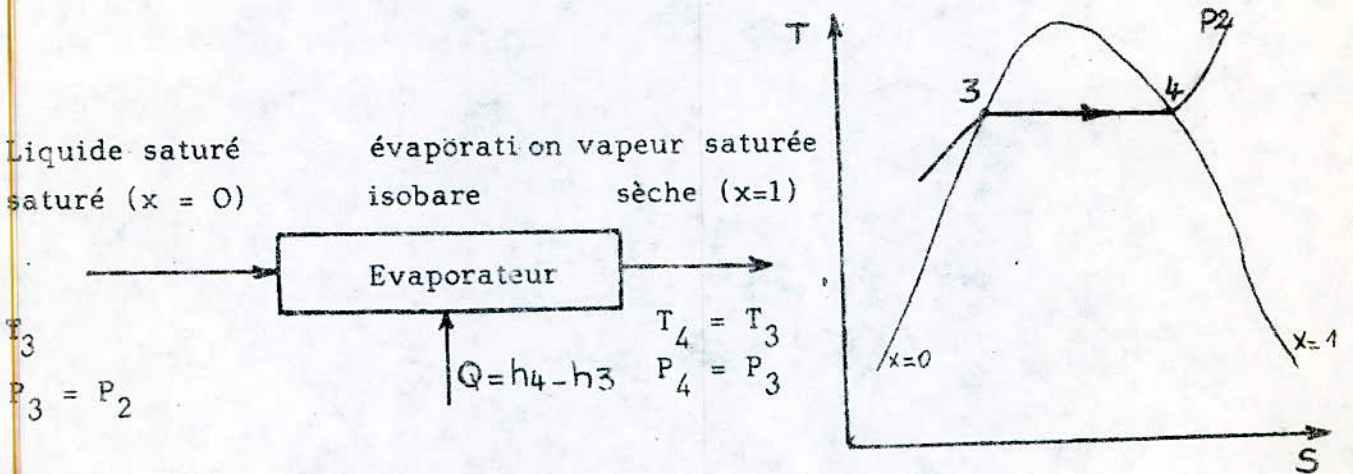
b) chauffage isobare dans la chaudière étape 2' — 3



L'eau liquide passe de la température t'_2 à la température de saturation t_3 .

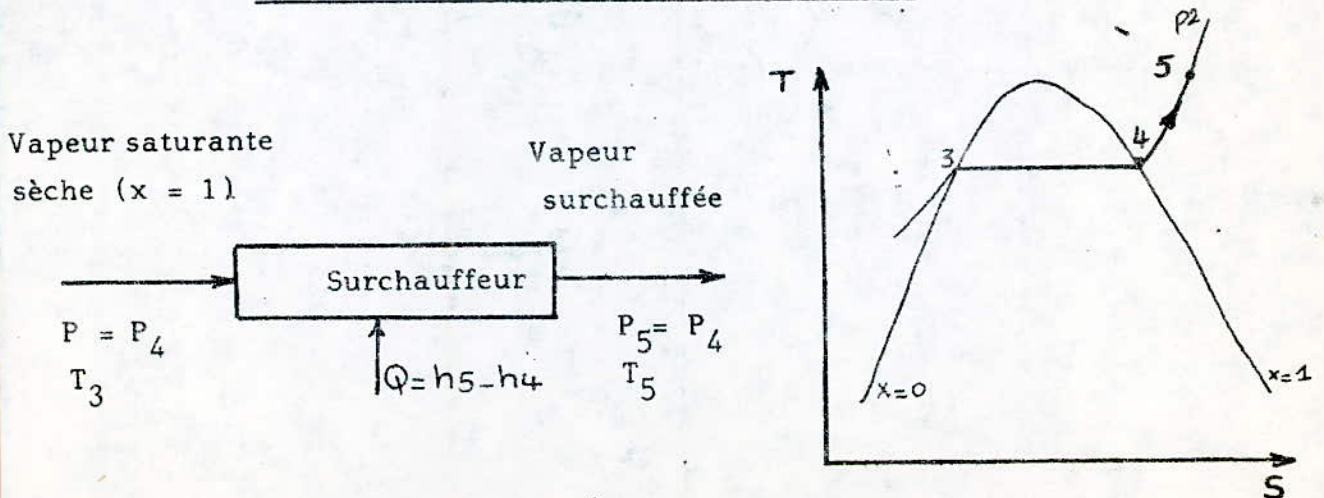
Le point 3 se trouve sur la ligne de saturation ($x = 0$) et les paramètres caractérisant cet état sont tirés de la table de vapeur saturée.

c) Evaporation isobare



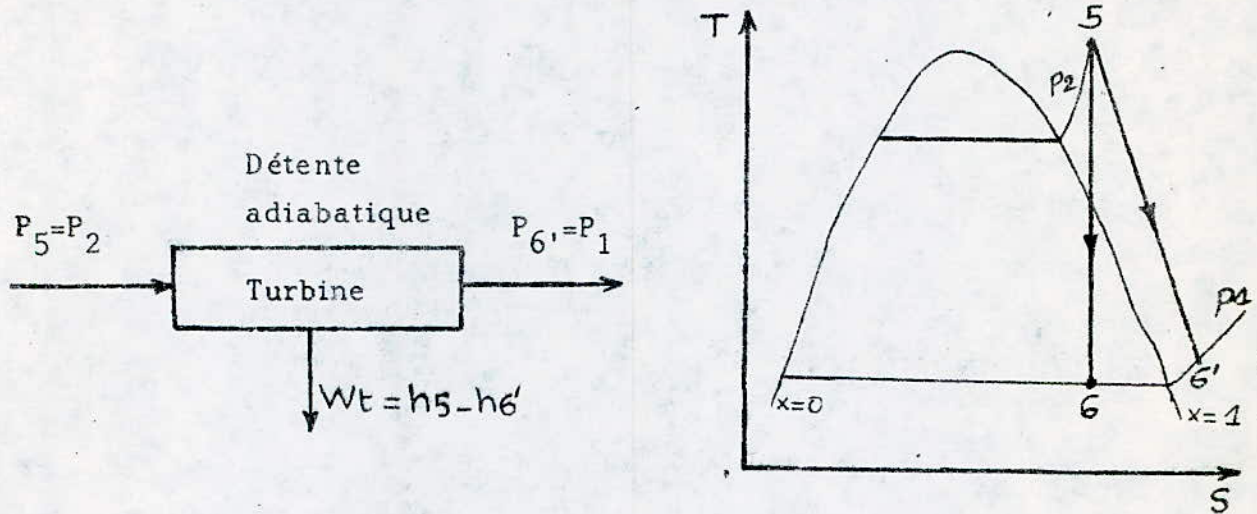
Cette transformation se fait à pression et température constantes. La fluide moteur passe de l'état liquide saturé (point 3) à la vapeur saturante sèche (point 4).

d) Surchauffe isobare dans le surchauffeur



De la table de vapeur surchauffée entrée par la pression et la température, on détermine h_5 , v_5 et s_5 .

e) Détente adiabatique dans la turbine



La vapeur est introduite à l'entrée de la turbine, puis en se détendant elle acquiert une énergie cinétique importante. Cette énergie se transforme en énergie mécanique dans l'aubage mobile.

Considérons la détente isentropique (5 — 6)

On a $s_5 = s_6$

de la table de vapeur saturée et à l'aide de la pression du condenseur on détermine h' , h'' , s' , s'' , v' , v'' .

A l'échappement de la turbine, la vapeur est humide et se compose de deux phases

On définit le titre de vapeur par :

$$x = \frac{s_5 - s'}{s'' - s'} = \frac{s_5 - s'}{s'' - s'}$$

L'enthalpie de la vapeur à la sortie de la turbine est :

$$h_6 = x \cdot (h'' - h') + h'$$

Les indices (') et (") désignent respectivement l'eau liquide saturée ($x = 0$) et la vapeur saturée ($x = 1$)

En réalité la détente dans la turbine n'est pas isentropique, et on définit son rendement interne par :

$$\eta_{it} = \frac{h_5 - h_{6'}}{h_5 - h_6}$$

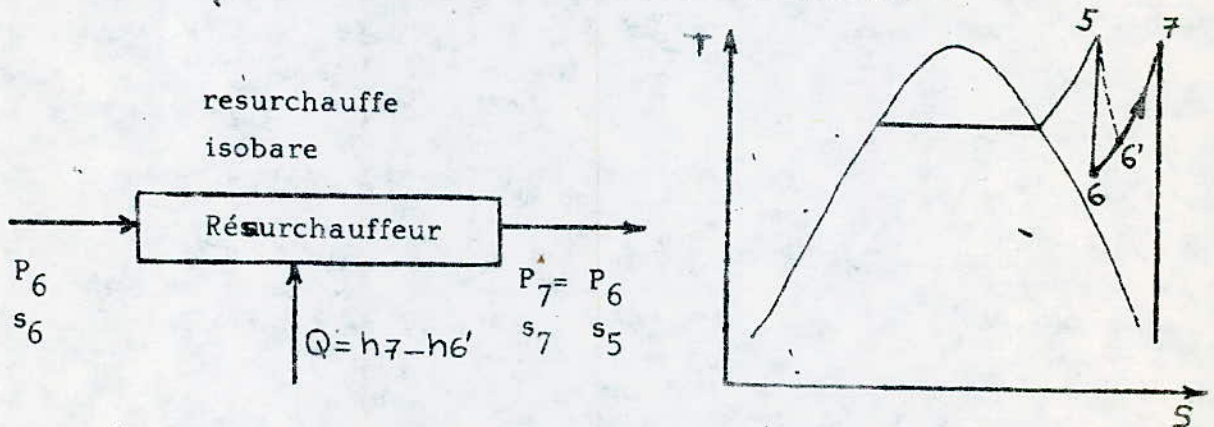
d'où $h_{6'} = h_5 - \eta_{it} \cdot (h_5 - h_6)$

Le titre de la vapeur devient : $x' = \frac{h_{6'} - h'}{h'' - h'}$

l'entropie $s_{6'}$ est supérieure à s_5 et elle est donnée par :

$$s_{6'} = x' \cdot (s'' - s') + s'$$

f) resurchauffe isobare de la vapeur étape 6' — 7

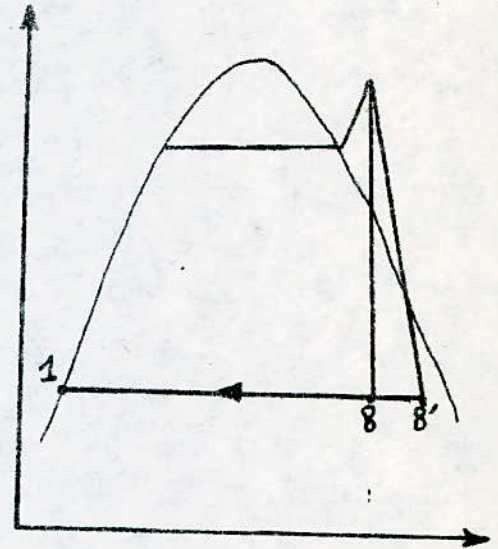
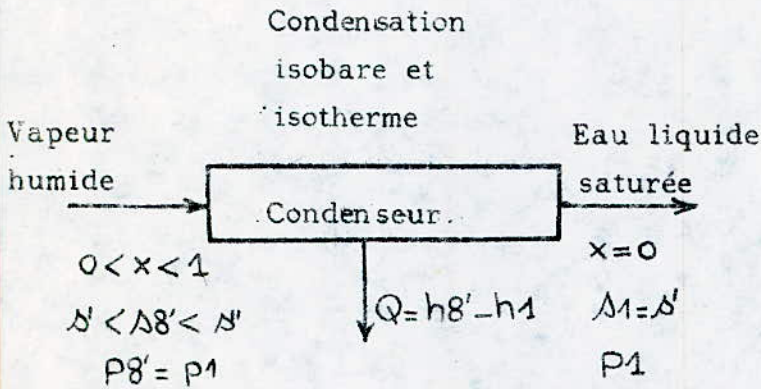


La vapeur est extraite de la turbine à une pression p_6 , puis elle est portée à une température T_7 à la même pression p_6

Au point 6 la vapeur peut être humide, saturée ou surchauffée. Donc pour calculer l'entropie h_6 il faut, comparer l'entropie de la vapeur saturée (s'').

si $s'' > s_6$ la vapeur est humide
 $s'' = s_6$ la vapeur est saturée
 $s'' < s_6$ la vapeur est surchauffée

g) Condensation isobare



Le fluide sortant de la turbine au point $8''$ est constitué d'un mélange de vapeur et d'eau liquide, puis se condense jusqu'au point de saturation (point 1).

h) Regénération

Supposons tout d'abord pour simplifier l'exposé que l'installation comporte un seul prélèvement (fig. C.II.2).

Une masse unité de vapeur surchauffée à la température T_1 arrive à la turbine et travaille dans les premiers étages. Quand au cours de sa détente, la pression de cette vapeur atteint une valeur P_{s_1} une fraction de vapeur de masse m_1 est soustrée et envoyée dans un mélangeur R.

Le reste de la vapeur, soit une masse $(1 - m_1)$ continue sa détente dans les étages inférieurs de la turbine puis passe dans le condenseur.

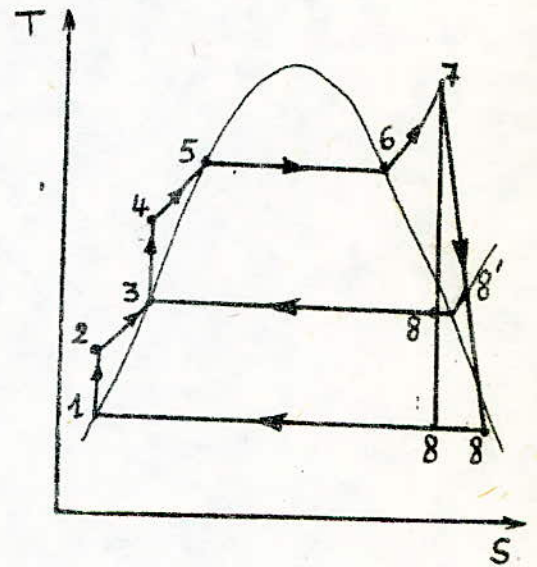
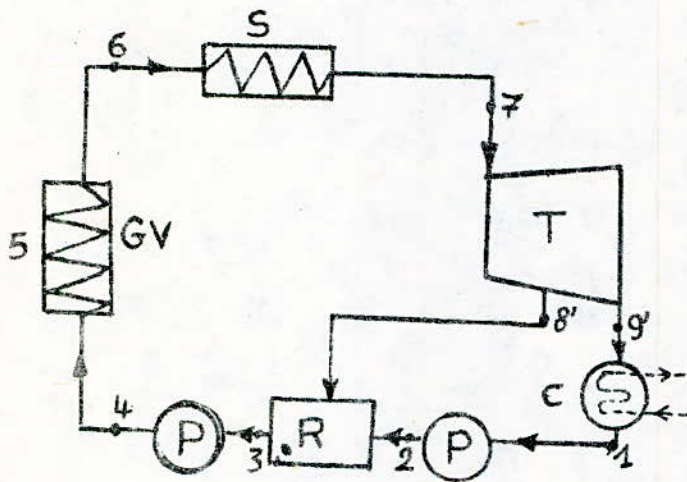
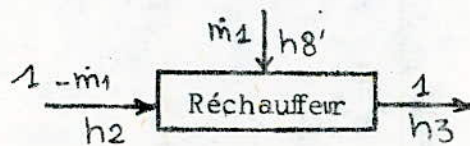


Fig. CII.2.: Schémas de l'installation et diagramme (T,S) d'un cycle à un soutirage.

Le bilan thermique fait sur le réchauffeur entraîne que l'énergie entrant est totalement récupérée à la sortie.



d'où:
$$m_1 \cdot h_{8'} + (1 - m_1) h_2 = 1 \cdot h_3$$

II.3. Détermination des débits de soutirages

Soit un cycle de vapeur comportant un nombre N de soutirages et prenons un débit unitaire de vapeur à l'entrée de la turbine;

Les \dot{m}_i sont les fractions de vapeur soutirée. Le schéma de l'installation et le diagramme (T - S) correspondants sont représentés par les figures C.II.3a et C.II.3b

Les notations utilisées sont explicitées dans la partie élaboration du programme).

Faisons le bilan thermique de chaque régénérateur:

Régénérateur R1 :

$$\dot{m}_1 \cdot HL(1) = \dot{m}_1 \cdot HS(1) + (1 - \dot{m}_1) H_{sp}(2)$$

$$\text{Le débit du premier soutirage : } \dot{m}_1 = \frac{HL(1) - H_{sp}(2)}{HS(1) - H_{sp}(2)}$$

Régénérateur R2 :

$$1 \cdot HL(1) = \dot{m}_2 \cdot HS(2) + (1 - \dot{m}_1 - \dot{m}_2) \cdot H_{sp}(3) \quad (3)$$

$$\dot{m}_2 = \frac{HL(2) - H_{sp}(3)}{HS(2) - H_{sp}(3)}$$

Régénérateur RK :

$$\dot{m}_{K-1} \cdot HL(K) = \dot{m}_K \cdot HS(K) + \left(1 - \sum_{i=1}^{K-1} \dot{m}_i\right) \cdot H_{sp}(K+1)$$

$$\dot{m}_K = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^{K-1} \dot{m}_i\right) \left(HL(K) - H_{sp}(K+1) \right)}{HS(K) - H_{sp}(K+1)}$$

11.4. Rendement du cycle

Le rendement thermique du cycle s'écrit :

$$\eta_{th} = \frac{\text{travail de la turbine} - \text{travail des pompes}}{\text{quantité de la chaleur fournie}}$$

On détermine le rendement du cycle de la figure CII.1, c'est le cycle à l'aide ^{duquel} on a développé le programme en gardant les mêmes notations.

a) Travail de la turbine

C'est le travail de un kilogramme de vapeur traversant toute la turbine duquel on retranche le travail de chaque fraction de débit soutirée.

$$WT = \left[HENT - HRRESI (1) \right] + \left[HRES(1) - HRRESI (2) \right] \\ + \left[HRES (2) - HRCOND \right] - \sum_{i=1}^N \dot{m}_i (HRS (i) - HCOND)$$

b) Travail des pompes :

Le nombre de pompes est d'une unité supérieur au nombre de soutirages.

$$Wp (1) = HSp (1) - HL (1)$$

$$Wp (K) = HSp (K) - HL (K)$$

$$Wp (N + 1) = HSp (N + 1) - HL (N + 1)$$

$$WP = \sum_{i=1}^{N+1} Wp (i)$$

c) Chaleur fournie

C'est la chaleur fournie dans les organes de chauffage de la vapeur (économiseur, surchauffeur, resurchauffeurs et évaporateur).

$$Q = \int_{\text{HENT}}^{\text{HSp (1)}} + \int_{\text{HRES (1)}}^{\text{HRRESI (1)}} + \int_{\text{HRES (2)}}^{\text{HRRES (2)}}$$

Le rendement thermique réel est :

$$\eta_{th} = \frac{WT - Wp}{Q}$$

Fig cII. 3a

Diagramme (T-s) d'un cycle de Hirn à n régénération

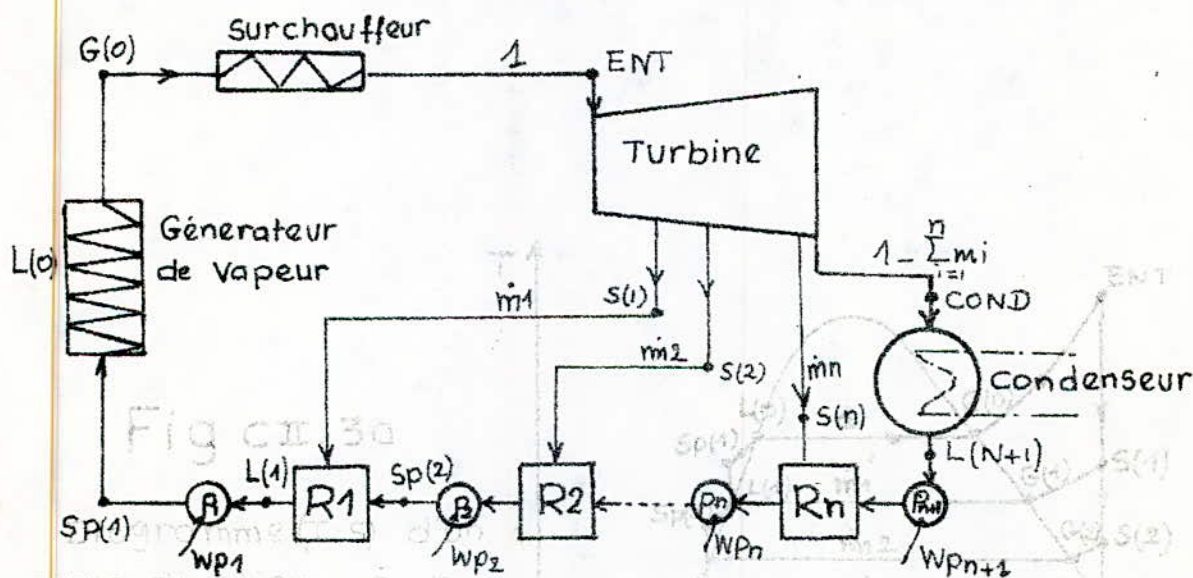
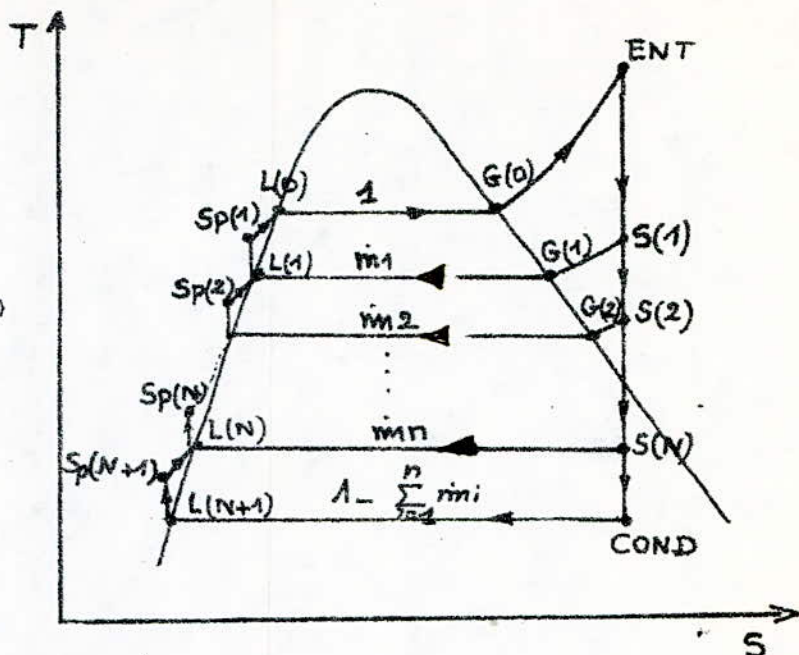


Fig cII. 3b

Schémas d'une installation comportant n régénérateurs



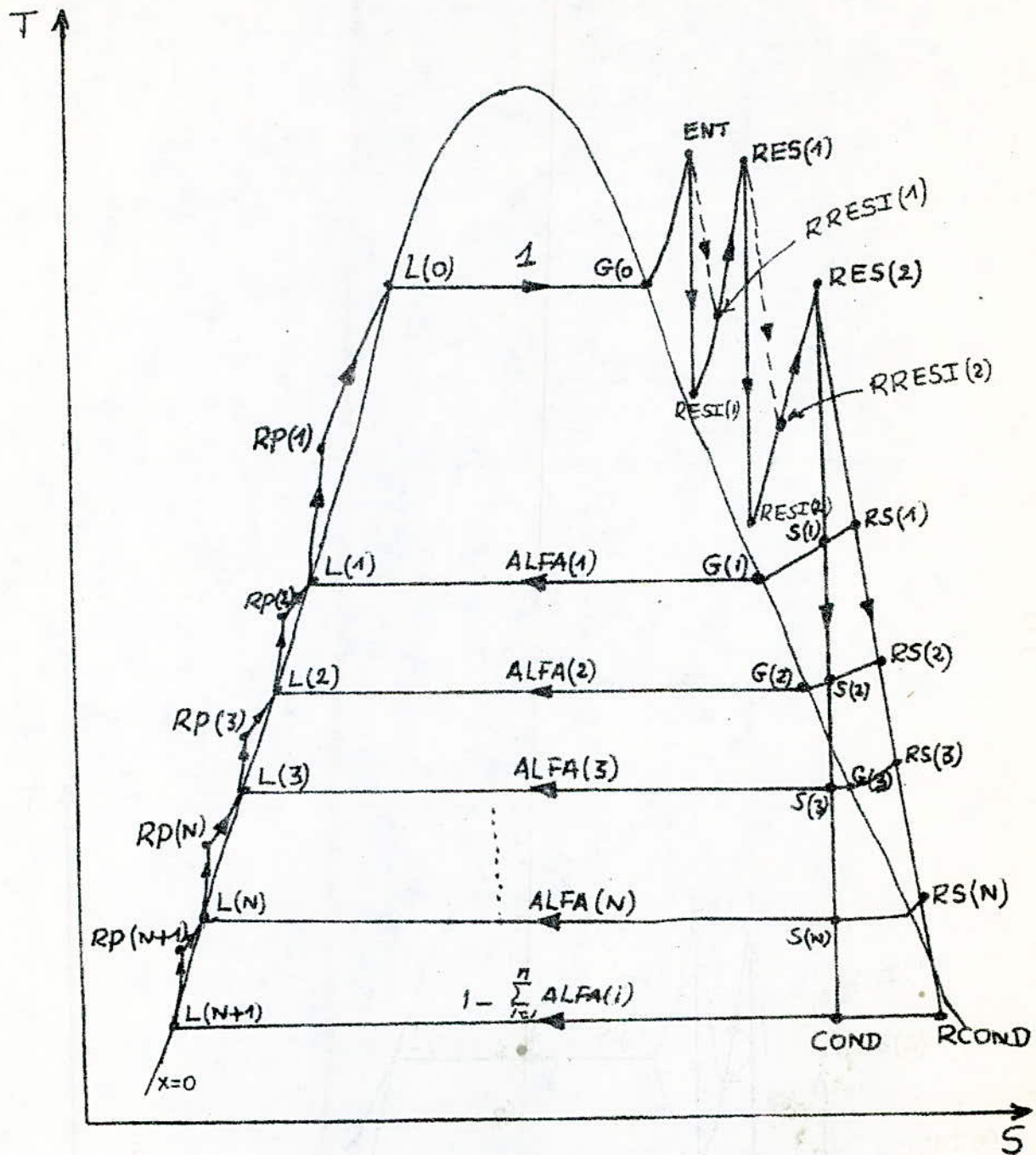


Fig CII.1
 Diagramme (T,s) d'un cycle de Hirn à n régénérations et deux resurchauffes

CHAPITRE IV : ELABORATION DU PROGRAMME D'ORDINATEUR

IV.1. Description Générale :

Le calcul thermodynamique d'un cycle de vapeur d'eau est la détermination en plusieurs points de cycle des paramètres caractérisant l'état de celle-ci (enthalpie, entropie, etc...)

Ces paramètres sont déterminés à l'aide des données de base (pression, température) et à l'aide des équations d'état tabulaires.

Dans notre programme, on a utilisé les tables thermodynamiques de vapeur d'eau en unités S.I. introduites sous forme de codes numériques.

L'ordre donné au programme est :

- Données tabulaires
- Programme principal
- Sous programmes d'interpolation.

Le calcul se fait étape par étape selon le cycle général de la figure C II.1. Le passage du fluide d'une phase à une autre est soit connu d'avance, soit par comparaison;

La comparaison est indispensable dans l'étape de détente de vapeur dans la turbine. Il s'agit de comparer l'entropie de la vapeur au point considéré (s) avec l'entropie de la vapeur saturée sèche (s'') prise à la même pression.

- Si $s > s''$ la vapeur est surchauffée
 $s < s''$ la vapeur est humide
 $s = s''$ la vapeur est saturante sèche.

IV.2. Tables thermodynamiques :

Elles sont au nombre de trois :

- table de vapeur surchauffée
- table de vapeur saturée
- table d'eau liquide comprimé

a) table de vapeur surchauffée

C'est un ensemble de 36 tables, chacune correspond à une pression. Celle-ci varie de 0,01 Mpa à 60 Mpa.

Une valeur numérique quelconque de la table est repérée à l'aide de trois indices (I, j et K)

b) table d'eau liquide :

Elle est composée de six tableaux, dont chacun est spécifique à une pression donnée .

c) table de vapeur saturée :

C'est une matrice de 72 lignes et 8 colonnes, chaque valeur numérique de la table est repérée par deux indices (I,J).

METHODE D'INTERPOLATION :

Les trois tables sont correctement placées dans le programme indépendamment l'une de l'autre à l'aide de variables indicées formant ainsi un code numérique bien précis.

Tous les calculs se rapportant aux tables sont fait par des sous programmes qui sont :

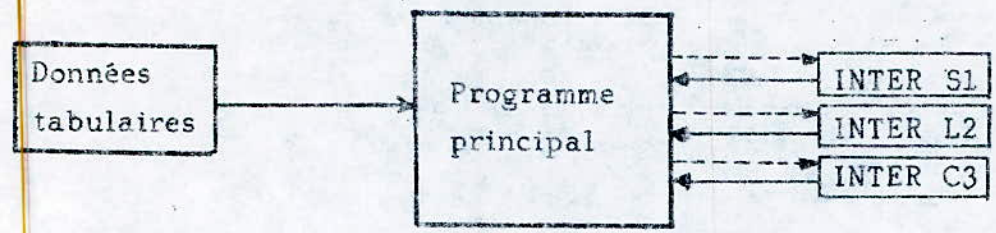
- sous programme INTER S1 — table de vapeur saturée
- sous programme INTER L2 — table d'eau liquide
- sous programme INTER C3 — table de vapeur surchauffée.

Du programme principal on spécifie les données de base nécessaires (une ou deux selon la table) et on fait appel au sous programme approprié.

le sous programme recherche la matrice puis la ligne correspondante aux données spécifiées et fait une interpolation linéaire qui peut être simple ou double entre deux lignes consécutives et transmet les résultats au programme principal.

Structure du Programme :

Le programme complet peut - être schématisé comme suit :



Sous programme INTER S1 :

Il détermine les paramètres d'état (t° , enthalpie, entropie et volume massique) des points du cycle situés sur la ligne de saturation et dans le domaine biphasique tout en faisant une interpolation linéaire simple.

Sous programme INTER L2 :

Il est spécifique à la table d'eau liquide sa fonction est de déterminer la température de l'eau d'alimentation de la chaudière tout en lui spécifiant la pression et l'enthalpie correspondantes.

Sous programme INTER C3 :

Il est spécifique à la table de vapeur surchauffée. Il détermine les paramètres caractérisant l'état de la vapeur dans la zone surchauffée, en lui spécifiant la pression de la vapeur et une autre donnée qui peut être soit l'enthalpie, l'entropie ou la température.

REMARQUE:

Le programme est fait en langage BASIC sur MINI ORDINATEUR de type **VAX 11/750**

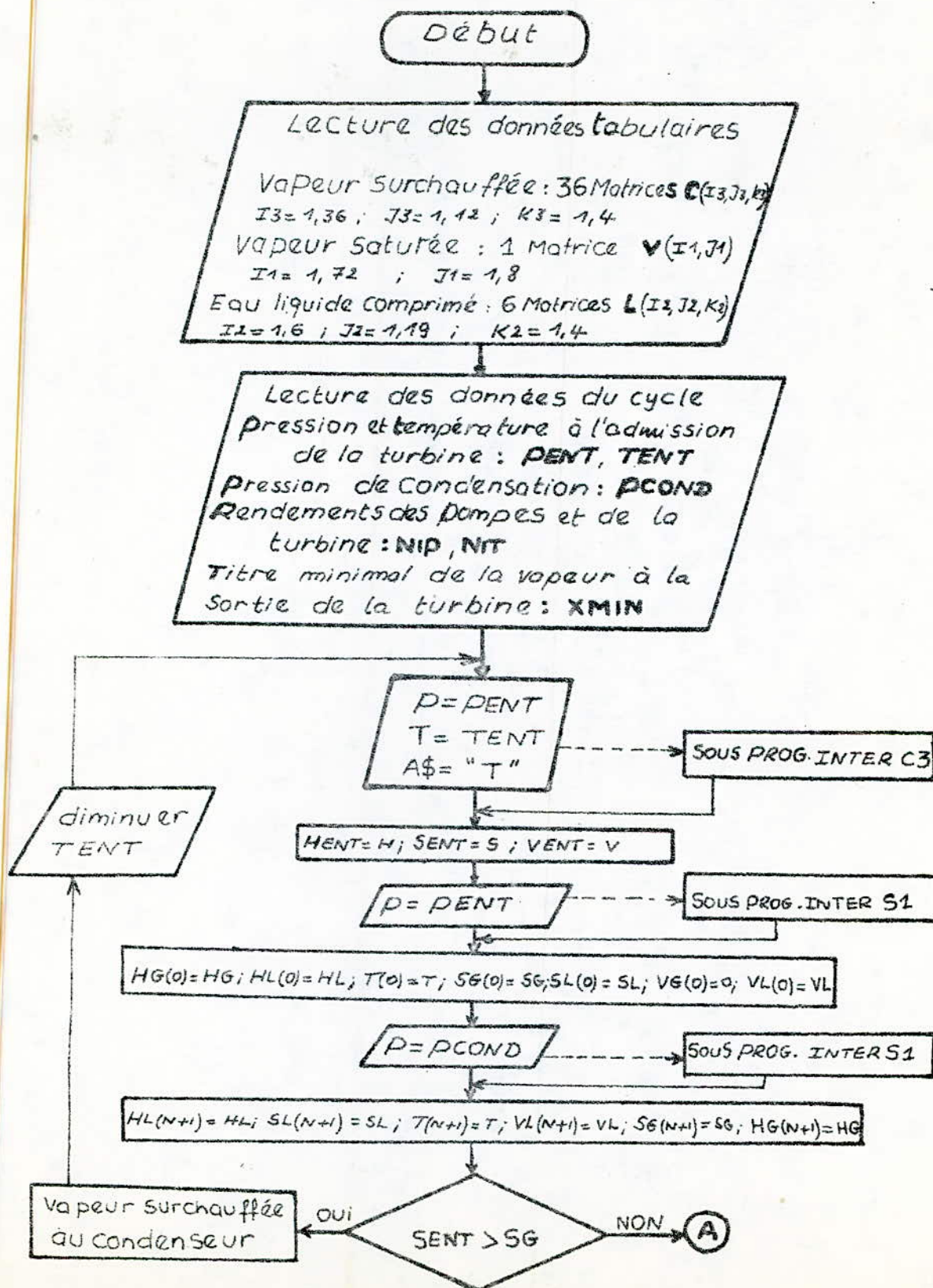
Notations et symboles utilisés dans le programme

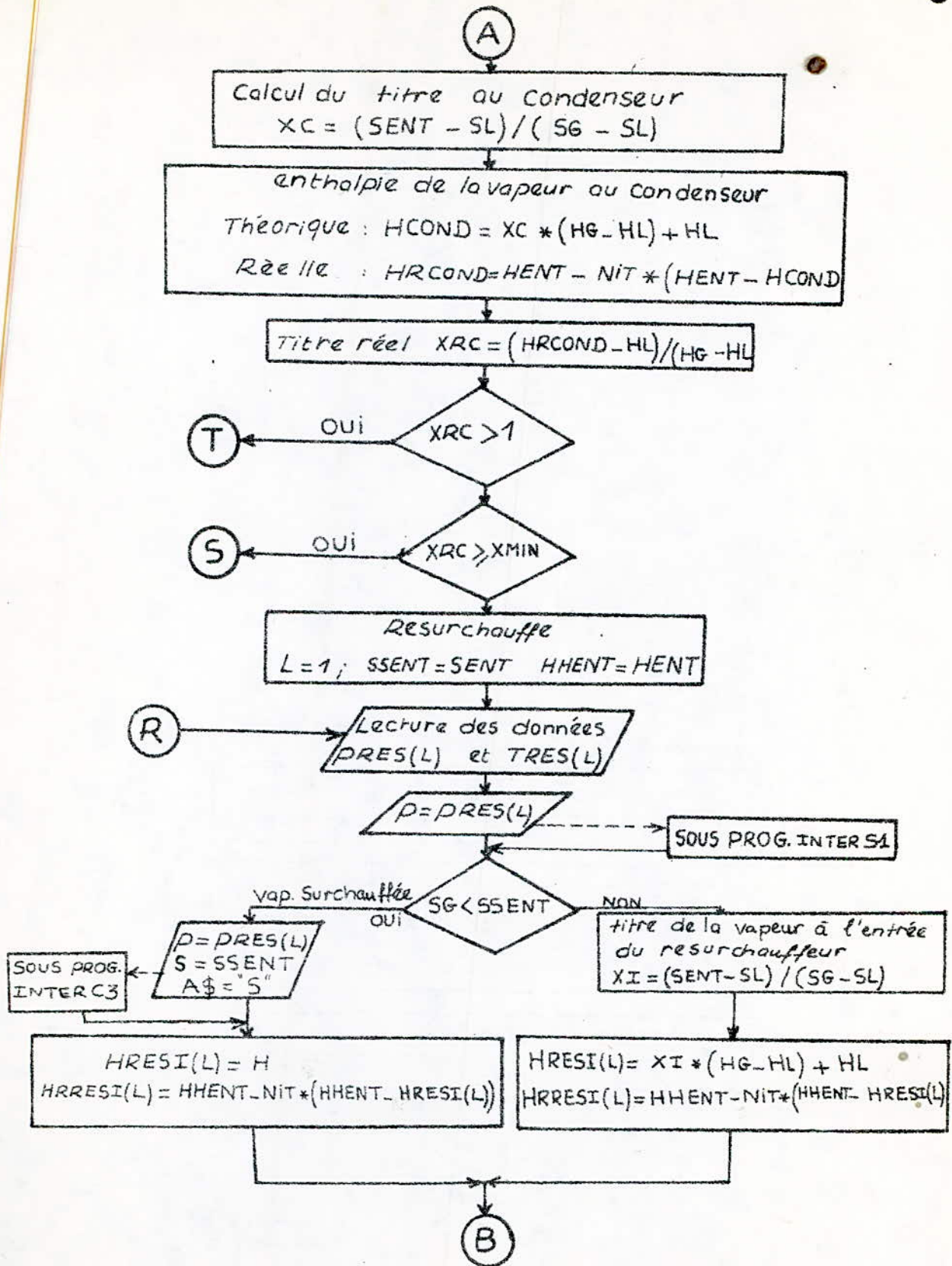
Les différents symboles qui ont été utilisés dans le programme sont choisis de telle façon à permettre une impression de tous les paramètres calculés et aussi de rendre l'exposé le plus clair que possible.

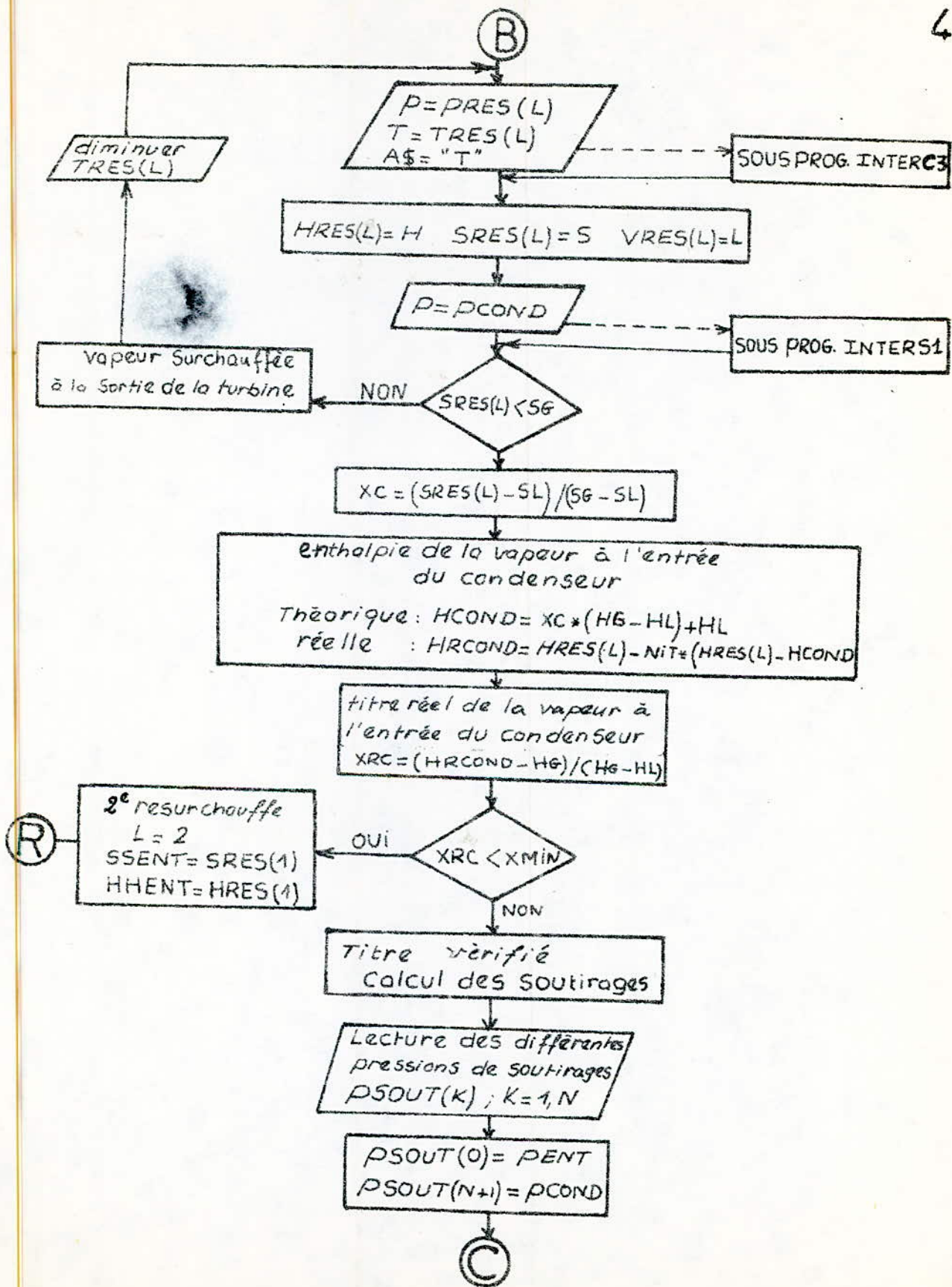
<u>Symbole</u>	<u>Objet</u>
ENT	entrée de la turbine PENT = pression; HENT = enthalpie; SENT = entropie TENT = température; VENT = volume massique
G (K)	points situés sur la ligne de saturation (vapeur sèche)
L (K)	HG (K) = ENTHALPIE de vapeur saturée à la même pression points situés sur la ligne de saturation (eau liquide)
COND	SL (K)) ENTROPIE de l'eau liquide saturé à une pression de saturation PS (K) Entrée du condenseur. PCond = pression au condenseur.
RESI (1)	Entrée du resurchauffeur n°1 (théorique)
RRESI (1)	Entrée du resurchauffeur n°1 (réelle).
S (K)	Soutirage n° K
PSout (K)	Pression de soutirage n°K
HS (K)	Enthalpie de vapeur soustrée au point de soutirage n°K (théorique)
HRS (K)	Enthalpie réelle de vapeur soustrée
SP (K)	Sortie de la pompe n°K
HSP (K)	Enthalpie de l'eau refoulée par la pompe n°K (théorique)
HRP (K)	Enthalpie réelle l'eau refoulée par la pompe n°K.

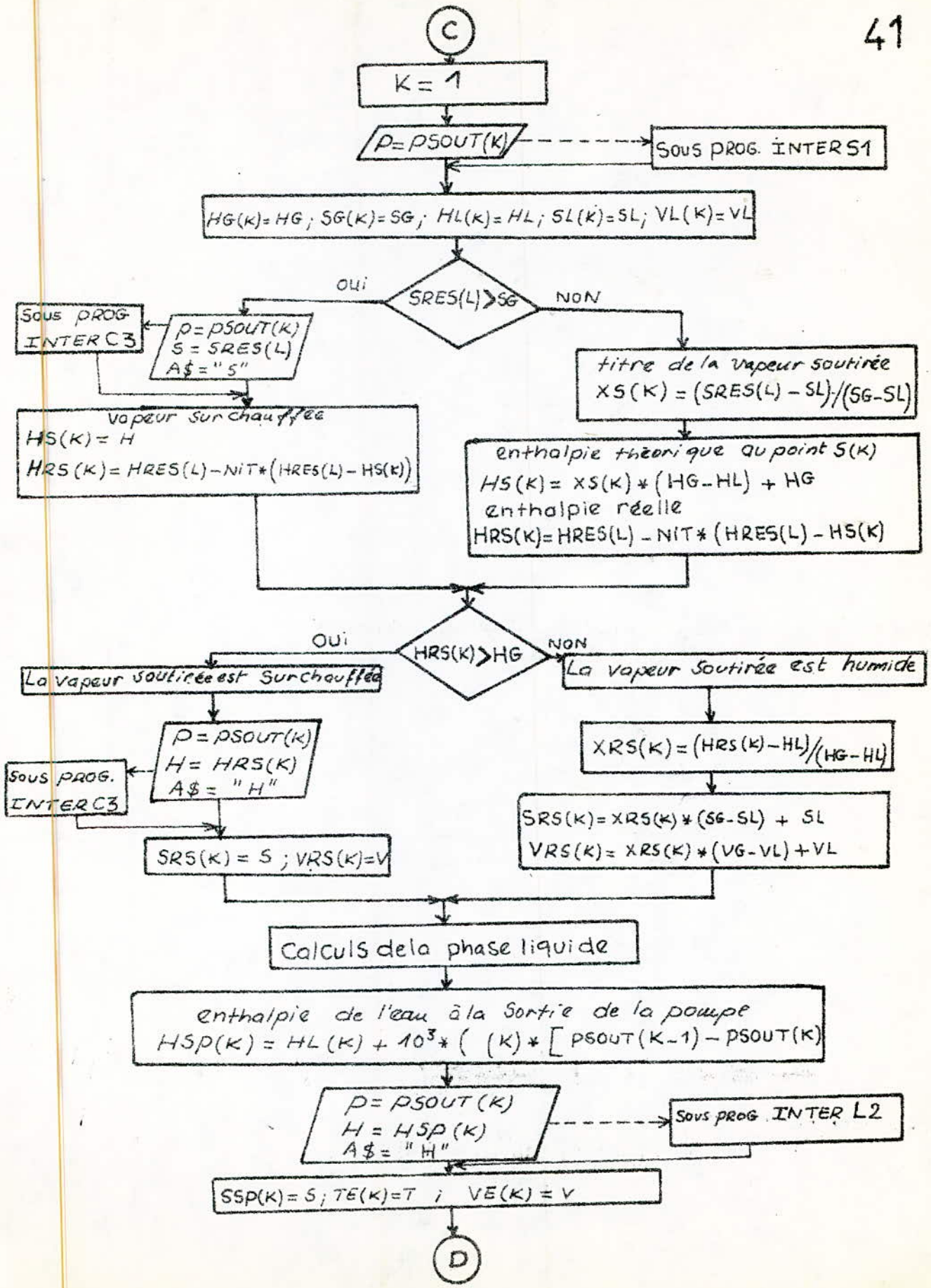
<u>Symbole</u>	<u>Objet</u>
NIT	Rendement interne de la turbine
NIP	Rendement interne de la pompe (même rendement)
XC	Titre théorique de la vapeur à l'entrée du condenseur
XRC	Titre réel vapeur à l'entrée du condenseur
ALFA (K)	Débit de vapeur soutiré au soutirage n°K
N	Nombre de soutirages
REND	Rendement thermique du cycle réel
WNET	Travail net spécifique
Q ECON	Quantité de chaleur fournie à la vapeur dans l'économiseur
Q SUR	Quantité de chaleur fournie à la vapeur dans le surchauffeur
Q EVAP	Quantité de chaleur fournie à la vapeur dans l'évaporateur
Q RES	Quantité de chaleur fournie à la vapeur dans le resurchauffeur
WP (K)	Travail de la pompe n° K.

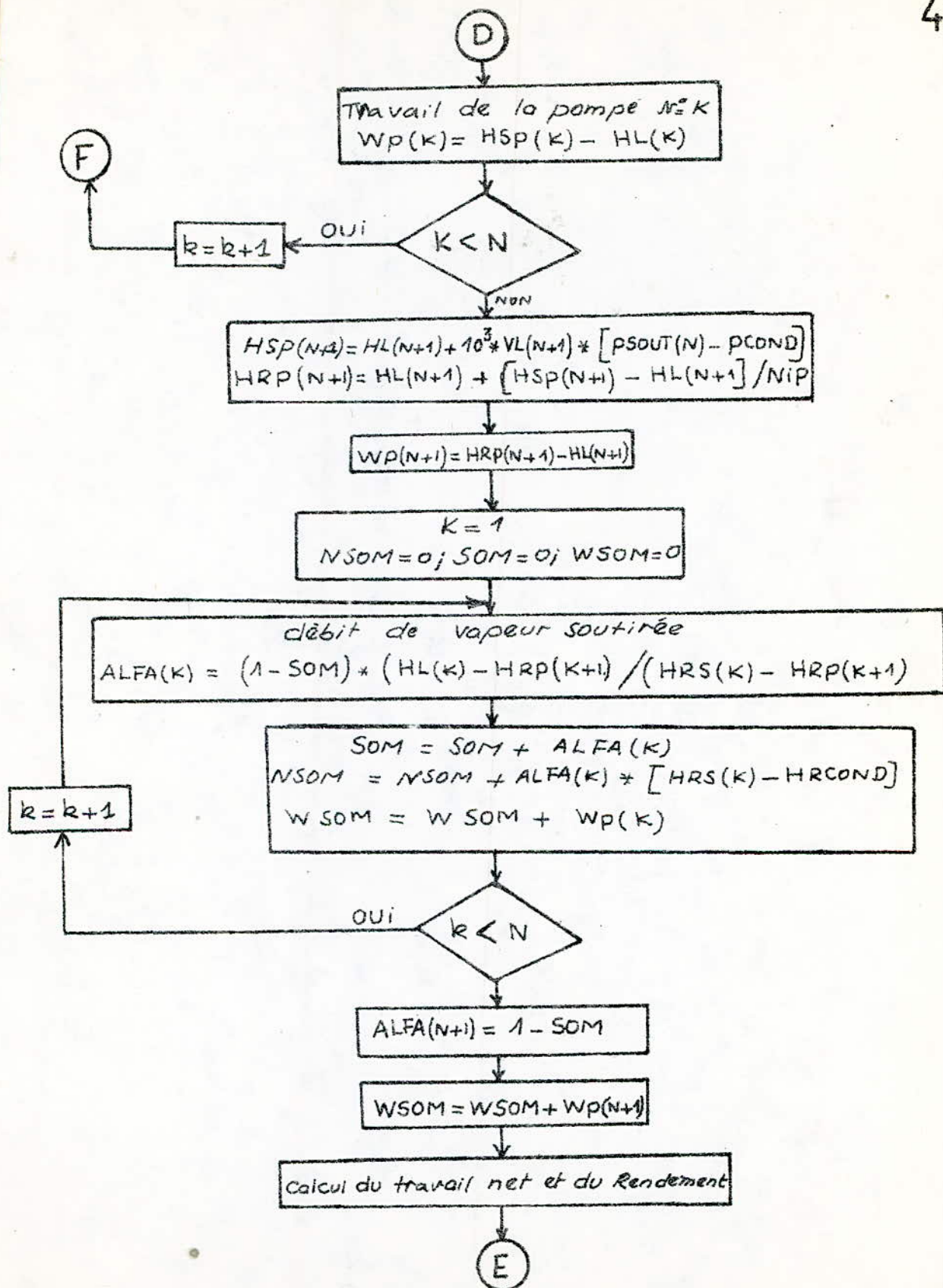
ORGANIGRAMME

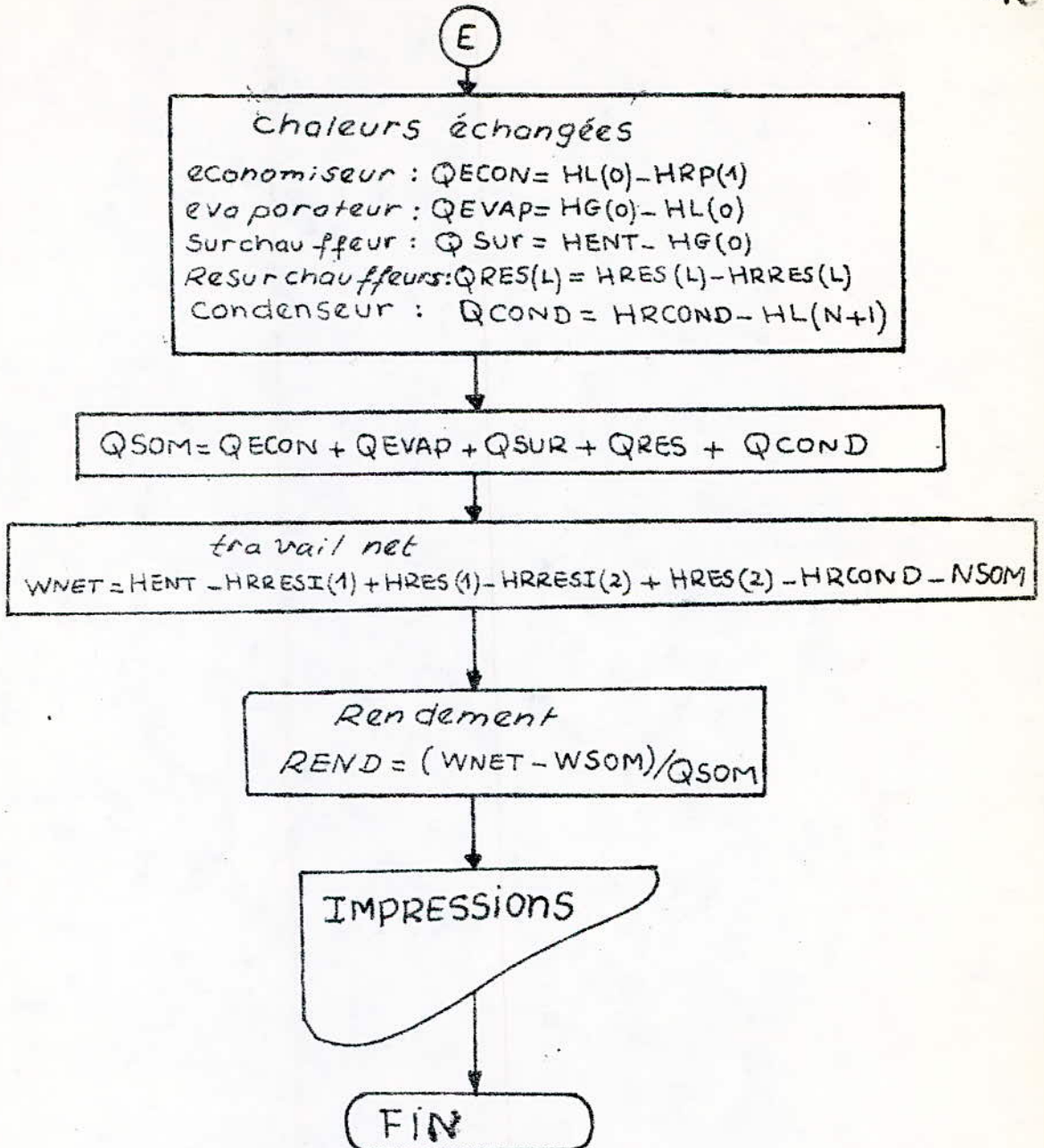




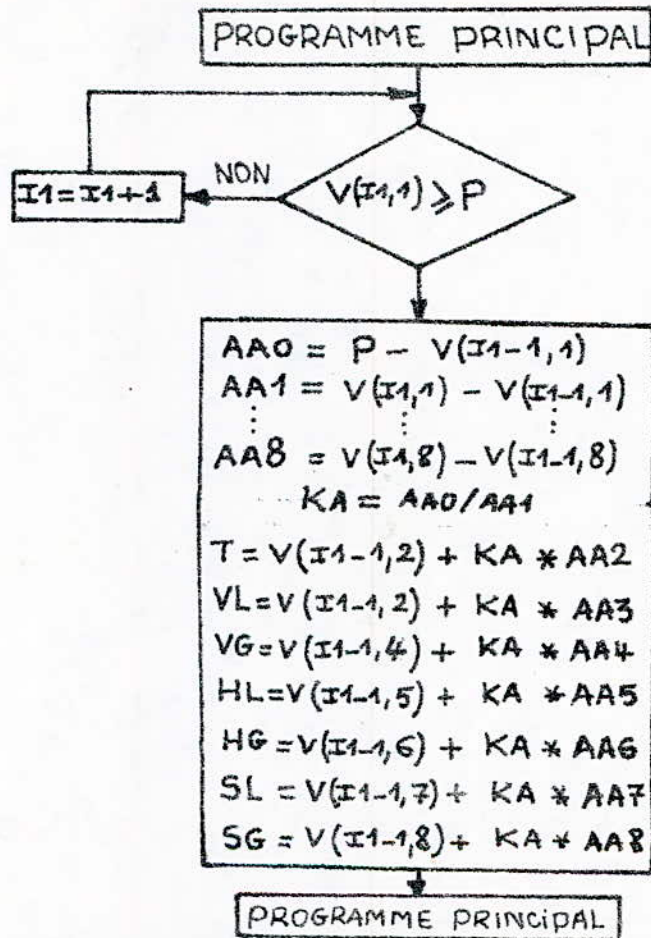




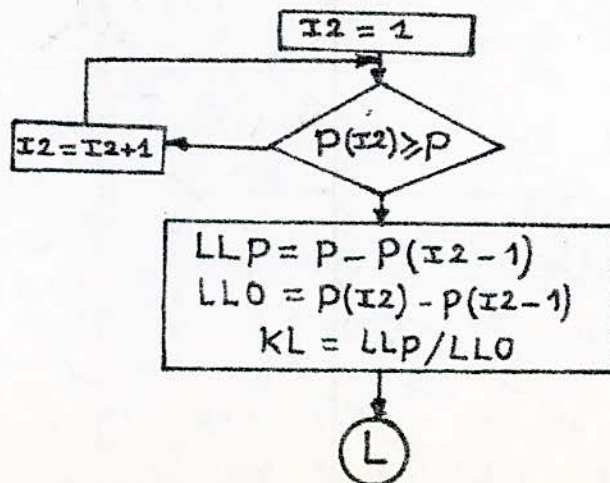


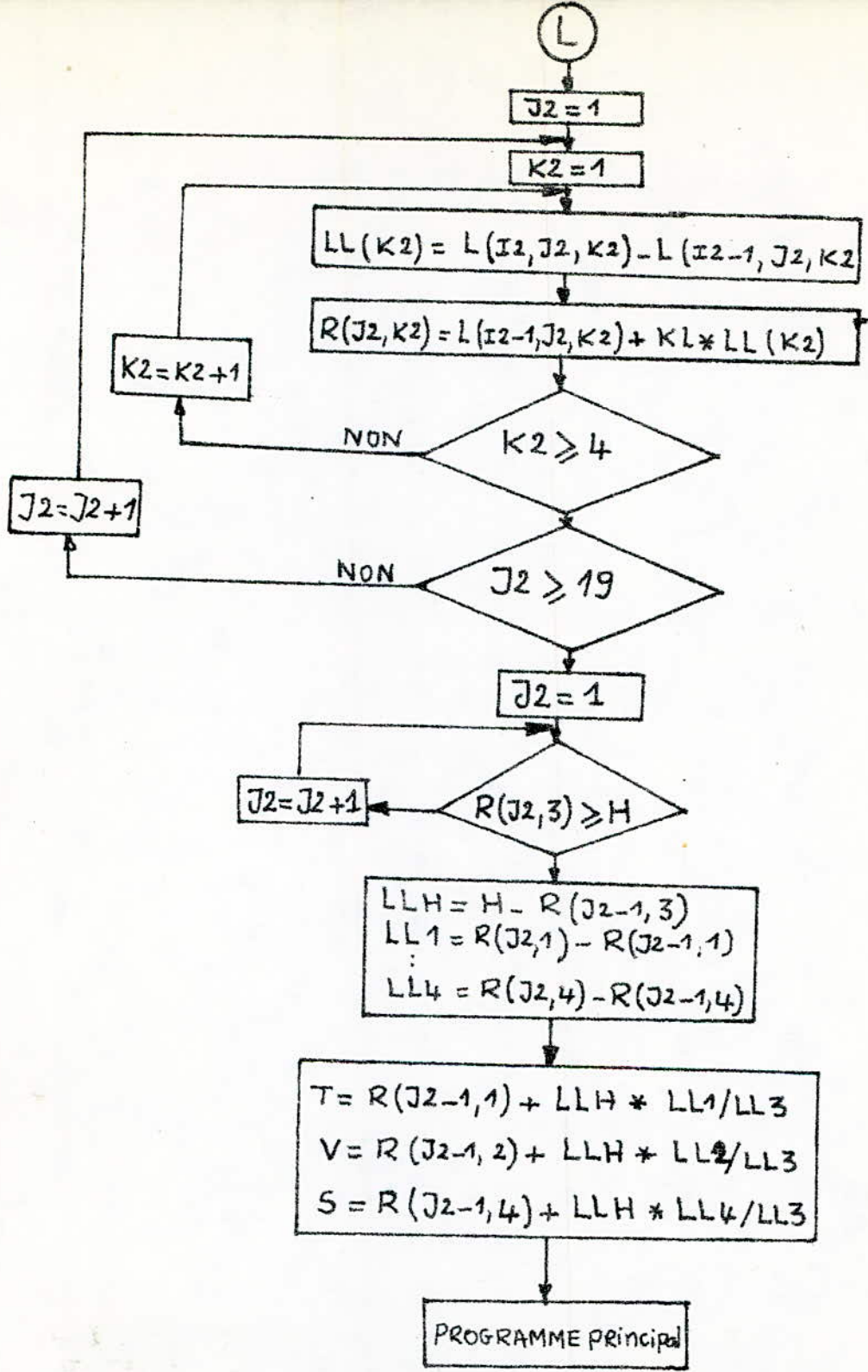


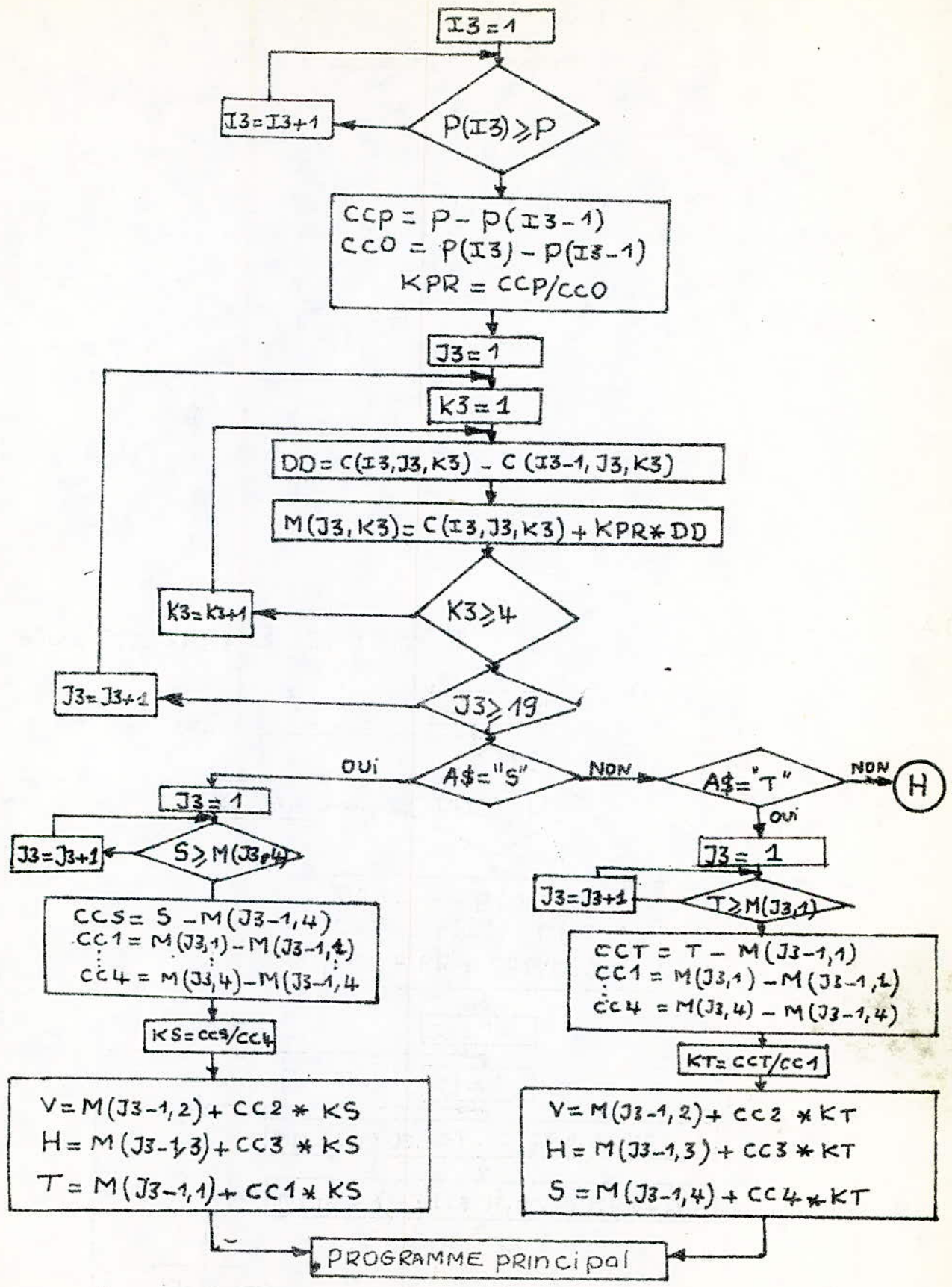
SOUS PROGRAMME INTERS1 (une seule interpolation)

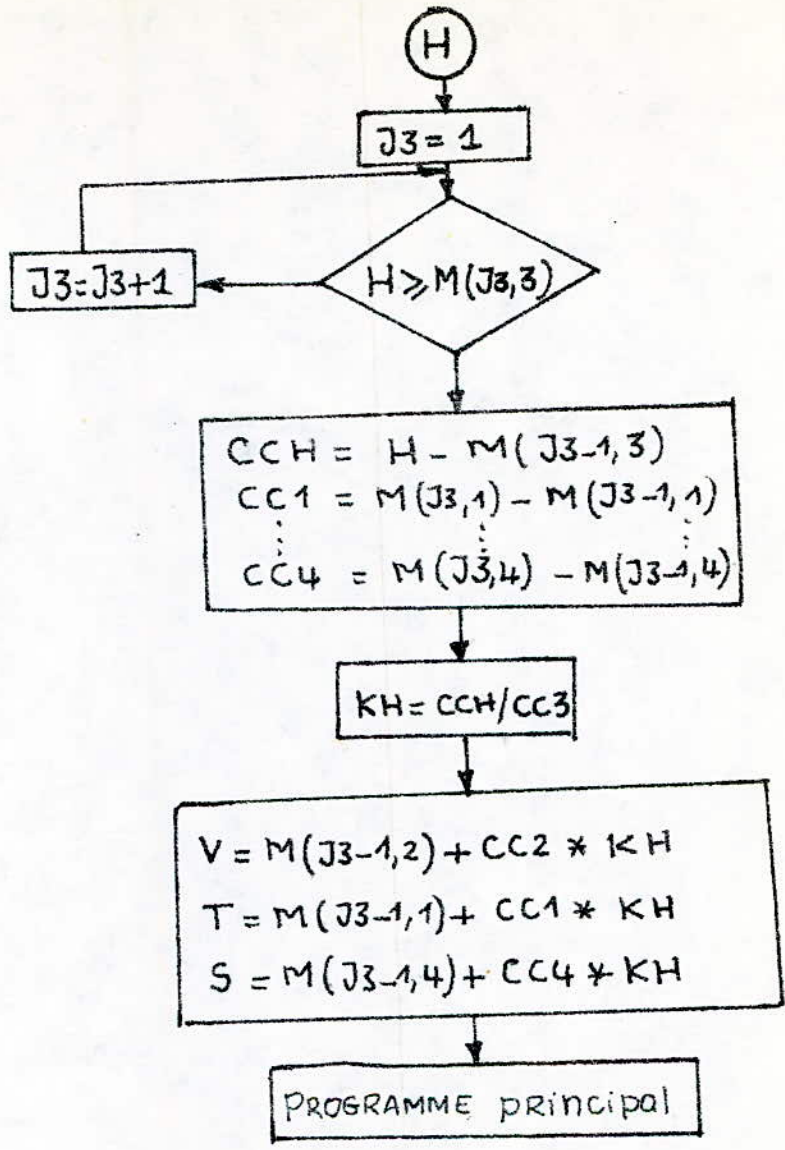


SOUS PROGRAMME INTER L2 (double interpolation)









130 DIM R(19,4) \ DIM M(12,4)

140 !

150 !

#####

160 !

PROGRAMME DE CALCUL THERMODYNAMIQUE

170 !

D'UN CYCLE a VAPEUR A REGENERATION

180 !

UTILISANT LES DONNEES TABULAIRES,

190 !

#####

200 !

210 !

220 !

230 !

DONNEES TABULAIRES

240 !

250 !

TABLE DE VAPEUR SURCHAUFFEE

260 !

#####

270 !

280 !

*****MATRICE C(I3,J3,K3) *****

290 !

ENTREE DES PRESSIONS EN MPA

310 DIM PC(36)

320 DIM C(36,12,4)

330 FOR I3=1 TO 36

340 READ PC(I3)

350 NEXT I3

360 DATA .010,.05,.1,.2,.3,.4,.5,.6,.8,1.1,2.1,4.1,6.1,8.2,2.5

370 DATA 3.3,5.4,4.5,5.6,7.8,9.10,12.5,15.17.5,20,25,30,35,40

380 DATA 50,60

390 !

entree des differents tableaux

400 FOR I3=1 TO 36

410 FOR J3=1 TO 12

420 FOR K3=1 TO 4

430 READ C(I3,J3,K3)

440 NEXT K3

450 NEXT J3

460 NEXT I3

470 REM

UNITES enthalpie [kj/kg]
entropie [kj/kg.ok]
pression [mpa]
temp [oC]
vol.mass [m3/kg]

480 !

490 !

500 !

510 !

520 !

530 REM

TEMP VOL ENTHAL ENTROP ! TEMP VOL ENTHAL ENTROP

540 !

550 REM P=0.01 MPA

560 DATA 45.81,14.674,2584.7,8.1502,50,14.869,2592.6, 8.1502,&

100, 17.196, 2687.5, 8.4479, 150,19.512,2783.0, 8.6882,&

200, 21.825, 2879.5, 8.9038, 250,24.136,2977.3, 9.1002,&

300, 26.445, 3076.5, 9.2813, 400,31.063,3279.6, 9.6077,&

500, 35.679, 3489.1, 9.8978, 600,40.295,3705.4,10.1608,&

700, 44.911, 3928.7, 10.4028, 800,49.526,4159.0, 10.6281

570 REM P=0.05 MPA

580 DATA 81.33,3.240,2645.9,7.5939,100, 3.418,2682.5, 7.6947,&

150, 3.889, 2780.1, 7.9401, 200,4.356, 2877.7, 8.1580,&

250, 4.820, 2976.0, 8.3556, 300,5.284, 3075.5, 8.5373,&

400, 6.209, 3278.9, 8.8642, 500,7.134, 3488.7, 9.1546,&

600, 8.057, 3705.1, 9.4178, 700,8.981, 3928.5, 9.6599,&

800, 9.904, 4158.9, 9.8852, 900,10.828,4396.3, 10.0967

590 REM P=.10 MPA

600 DATA 99.63,1.6940,2675.5,7.3594,100,1.6958,2676.2, 7.3614,&

150.	1.9364,	2776.4,	7.6134,	200.	2.172,	2875.3,	7.8343,&
250.	2.406,	2974.3,	8.0333,	300.	2.639,	3074.3,	8.2158,&
400.	3.103,	3278.2,	8.5435,	500.	3.565,	3488.1,	8.8342,&
600.	4.028,	3704.7,	9.0976,	700.	4.490,	3928.2,	9.3398,&
800.	4.952,	4158.6,	9.5652,	900.	5.414,	4396.1,	9.7767

610 REM P=0.20 MPA

620 DATA	120.23,	.8857,	2706.7,	7.1272,	150.,	.9596,	2768.8,	7.2795,&
	200.	1.0803,	2870.5,	7.5066,	250.	1.1988,	2971.0,	7.7086,&
	300.	1.3162,	3071.8,	7.8926,	400.	1.5493,	3276.6,	8.2218,&
	500.	1.7814,	3487.1,	8.5133,	600.	2.013,	3704.0,	8.7770,&
	700.	2.244,	3927.6,	9.0194,	800.	2.475,	4158.2,	9.2449,&
	900.	2.706,	4395.8,	9.4566,	1000.	2.937,	4640.0,	9.6563

630 REM P=0.30 MPA

640 DATA	133.55,	.6058,	2725.3,	6.9919,	150.,	.6339,	2761.0,	7.0778,&
	200.	.7163,	2865.6,	7.3115,	250.	.7964,	2967.6,	7.5166,&
	300.	.8753,	3069.3,	7.7022,	400.	1.0315,	3275.0,	8.0330,&
	500.	1.1867,	3486.0,	8.3251,	600.	1.3414,	3703.2,	8.5892,&
	700.	1.4957,	3927.1,	8.8319,	800.	1.6499,	4157.8,	9.0570,&
	900.	1.8041,	4395.4,	9.2692,	1000.	1.9581,	4639.7,	9.4690

650 REM P=0.40 MPA

660 DATA	143.63,	.4625,	2738.6,	6.8959,	150.	.4708,	2752.8,	6.9299,&
	200.	.5342,	2860.5,	7.1706,	250.	.5951,	2964.2,	7.3789,&
	300.	.6548,	3066.8,	7.5662,	400.	.7726,	3273.4,	7.8985,&
	500.	.8893,	3484.9,	8.1913,	600.	1.0055,	3702.4,	8.4558,&
	700.	1.1215,	3926.5,	8.6987,	800.	1.2372,	4157.3,	8.9244,&
	900.	1.3529,	4395.1,	9.1362,	1000.	1.4685,	4639.4,	9.3360

670 REM P=0.50 MPA

680 DATA	151.86,	.3749,	2748.7,	6.8213,	200.	.4249,	2855.4,	7.0592,&
	250.	.4744,	2960.7,	7.2709,	300.	.5226,	3064.2,	7.4599,&
	350.	.5701,	3167.7,	7.6329,	400.	.6173,	3271.9,	7.7938,&
	500.	.7109,	3483.9,	8.0873,	600.	.8041,	3701.7,	8.3522,&
	700.	.8969,	3925.9,	8.5952,	800.	.9896,	4156.9,	8.8211,&
	900.	1.0822,	4394.7,	9.0329,	1000.	1.1747,	4639.1,	9.2328

690 REM P=0.60

700 DATA	158.85,	.3157,	2756.8,	6.7600,	200.	.3520,	2850.1,	6.9665,&
	250.	.3938,	2957.2,	7.1816,	300.	.4344,	3061.6,	7.3724,&
	350.	.4742,	3165.7,	7.5467,	400.	.5137,	3270.3,	7.7079,&
	500.	.5920,	3482.8,	8.0021,	600.	.6697,	3700.9,	8.2674,&
	700.	.7472,	3925.3,	8.5107,	800.	.8245,	4156.5,	8.7367,&
	900.	.9017,	4394.4,	8.9486,	1000.	.9788,	4638.8,	9.1485

710 REM P=0.80 MPA

720 DATA	170.43,	.2404,	2769.1,	6.6628,	200.	.2608,	2839.3,	6.8158,&
	250.	.2931,	2950.0,	7.0384,	300.	.3241,	3056.5,	7.2328,&
	350.	.3544,	3161.7,	7.4089,	400.	.3843,	3267.1,	7.5716,&
	500.	.4433,	3126.0,	7.8673,	600.	.5018,	3699.4,	8.1333,&
	700.	.5601,	3924.2,	8.3770,	800.	.6181,	4155.6,	8.6033,&
	900.	.6761,	4393.7,	8.8153,	1000.	.7340,	4638.2,	9.0153

730 REM P=1.00 MPA

740 DATA	179.91,	.19444,	2778.1,	6.5865,	200.	.2060,	2827.9,	6.6040,&
	250.	.2327,	2942.6,	6.9247,	300.	.2579,	3051.2,	7.1229,&
	350.	.2825,	3157.7,	7.3011,	400.	.3066,	3263.9,	7.4651,&
	500.	.3541,	3478.5,	7.7622,	600.	.4011,	3697.9,	8.0290,&
	700.	.4478,	3923.1,	8.2731,	800.	.4943,	4154.7,	8.4996,&
	900.	.5407,	4392.9,	8.7118,	1000.	.5871,	4637.6,	8.9119

750 REM P=1.20 MPA

760 DATA	187.99,	.16333,	2784.8,	6.5233,	200.	.16930,	2815.9,	6.5898,&
	250.	.19234,	2935.0,	6.8294,	300.	.2138,	3045.8,	7.0317,&
	350.	.2345,	3153.6,	7.2121,	400.	.2548,	3260.7,	7.3774,&
	500.	.2946,	3476.3,	7.6759,	600.	.3339,	3696.3,	7.9435,&
	700.	.3729,	3922.0,	8.1881,	800.	.4118,	4153.8,	8.4148,&

770 REM P=1.40 MPA -----
 780 DATA 195.07, .14084, 2790.0, 6.4693, 200, .14302, 2803.3, 6.4975, &
 250, .16350, 2927.2, 6.7467, 300, .18228, 3040.3, 6.9534, &
 350, .2003, 3149.5, 7.1360, 400, .2178, 3257.5, 7.3026, &
 500, .2521, 3474.1, 7.6027, 600, .2860, 3694.8, 7.8710, &
 700, .3195, 3920.8, 8.1160, 800, .3528, 4153.0, 8.3431, &
 900, .3661, 4391.5, 8.5556, 1000, .4192, 4636.4, 8.7559

790 REM P=1.60 MPA -----
 800 DATA 201.41, .12380, 2794.0, 6.4218, 225, .13287, 2857.3, 6.5518, &
 250, .14184, 2919.2, 6.6732, 300, .15862, 3034.8, 6.8844, &
 350, .17456, 3145.4, 7.0694, 400, .19005, 3254.2, 7.2374, &
 500, .2203, 3472.0, 7.5390, 600, .2500, 3693.2, 7.8080, &
 700, .2794, 3919.7, 8.0535, 800, .3086, 4152.1, 8.2808, &
 900, .3377, 4390.8, 8.4935, 1000, .3668, 4635.8, 8.6338

810 REM P=1.80 MPA -----
 820 DATA 207.15, .11042, 2797.1, 6.3794, 225, .11673, 2846.7, 6.4808, &
 250, .12497, 2911.0, 6.6066, 300, .14021, 3029.2, 6.8226, &
 350, .15457, 3141.2, 7.0100, 400, .16847, 3250.9, 7.1794, &
 500, .19550, 3469.8, 7.4825, 600, .2220, 3691.7, 7.7523, &
 700, .2482, 3918.5, 7.9983, 800, .2742, 4151.2, 8.2258, &
 900, .3001, 4390.1, 8.4386, 1000, .3260, 4635.2, 8.6391

830 REM P=2.0 MPA -----
 840 DATA 212.42, .09963, 2799.5, 6.3409, 225, .10377, 2835.8, 6.4147, &
 250, .11144, 2902.5, 6.5453, 300, .12547, 3023.5, 6.7664, &
 350, .13857, 3137.0, 6.9563, 400, .15120, 3247.6, 7.1271, &
 500, .17568, 3467.6, 7.4317, 600, .19960, 3690.1, 7.7024, &
 700, .2232, 3917.4, 7.9487, 800, .2467, 4150.3, 8.1765, &
 900, .2700, 4389.4, 8.3895, 1000, .2933, 4634.6, 8.5901

850 REM P=2.5 MPA -----
 860 DATA 223.99, .07998, 2803.1, 6.2575, 225, .08027, 2806.3, 6.2639, &
 250, .08700, 2880.1, 6.4085, 300, .09890, 3008.8, 6.6438, &
 350, .10976, 3126.3, 6.8403, 400, .12010, 3239.3, 6.8403, &
 450, .13014, 3350.8, 7.0148, 500, .13998, 3462.1, 7.1746, &
 600, .15930, 3686.3, 7.3234, 700, .17832, 3914.5, 7.5960, &
 800, .19716, 4148.2, 7.8435, 900, .21590, 4387.6, 8.0720

870 REM P=3.0 MPA -----
 880 DATA 233.9, .06668, 2804.2, 6.1869, 250, .07058, 2885.8, 6.2872, &
 300, .08114, 2993.5, 6.5390, 350, .09053, 3115.3, 6.7428, &
 400, .09936, 3230.9, 6.9212, 450, .10787, 3344.0, 7.0834, &
 500, .11619, 3456.5, 7.2338, 600, .13243, 3682.3, 7.5085, &
 700, .14838, 3911.7, 7.7571, 800, .16414, 4145.9, 7.9862, &
 900, .17980, 4385.9, 8.1999, 1000, .19541, 4631.6, 8.4009

890 REM P=3.5 MPA -----
 900 DATA 242.6, .05707, 2803.4, 6.1253, 250, .05872, 2829.2, 6.1749, &
 300, .06842, 2977.5, 6.4461, 350, .07678, 3104.0, 6.6579, &
 400, .08453, 3222.3, 6.8405, 450, .09196, 3337.2, 7.0052, &
 500, .09918, 3450.9, 7.1572, 600, .11324, 3678.4, 7.4339, &
 700, .12699, 3908.8, 7.6837, 800, .14056, 4143.7, 7.9134, &
 900, .15402, 4384.1, 8.1276, 1000, .16743, 4630.1, 8.3288

910 REM P=4.0 MPA -----
 920 DATA 250.4, .04978, 2801.4, 6.0701, 275, .05457, 2886.2, 6.2285, &
 300, .05884, 2960.7, 6.3615, 350, .06654, 3092.5, 6.5821, &
 400, .07341, 3213.6, 6.7690, 450, .08002, 3330.3, 6.9363, &
 500, .08643, 3445.3, 7.0901, 600, .09885, 3674.4, 7.3688, &
 700, .11095, 3905.9, 7.6198, 800, .12287, 4141.5, 7.8502, &
 900, .13469, 4382.3, 8.0647, 1000, .14645, 4042.9, 8.2662

940 DATA 257.49, .04406, 2798.3, 6.0198, 275, .04730, 2863.2, 6.1401, &
 300, .05135, 2943.1, 6.2828, 350, .05840, 3080.6, 6.5131, &
 400, .06475, 3204.7, 6.7047, 450, .07074, 3323.3, 6.8746, &
 500, .07651, 3439.6, 7.0301, 600, .08765, 3670.5, 7.3110, &

700, .09847, 3903.0, 7.5631, 800, .10911, 4139.3, 7.7942, &
 900, .11965, 4380.6, 8.0091, 1000, .13013, 4627.2, 8.2108

950 REM P=5.0 MPA -----

960 DATA 262.99, .03344, 2794.3, 5.9734, 275, .04141, 2838.3, 6.0544, &
 300, .04532, 2924.5, 6.2034, 350, .05194, 3068.4, 6.4493, &
 400, .05781, 3195.7, 6.6459, 450, .06330, 3316.2, 6.8186, &
 500, .06857, 3433.9, 6.9759, 600, .07869, 3666.5, 7.2589, &
 700, .08849, 3900.1, 7.5122, 800, .09811, 4137.1, 7.7440, &
 900, .10762, 4378.8, 7.9593, 1000, .11707, 4625.7, 8.1612

970 REM P=6.0 MPA -----

980 DATA 275.64, .03244, 2784.3, 5.9892, 300, .03616, 2884.2, 6.0674, &
 350, .04223, 3043.0, 6.3335, 400, .04739, 3177.2, 6.5408, &
 450, .05214, 3301.8, 6.7193, 500, .05665, 3422.2, 6.8803, &
 550, .06101, 3540.6, 7.0288, 600, .06525, 3658.4, 7.1677, &
 700, .07352, 3894.2, 7.4234, 800, .08160, 4132.7, 7.6566, &
 900, .08958, 4375.3, 7.8727, 1000, .09749, 4622.7, 8.0751

990 REM P=7.0 MPA -----

1000 DATA 285.88, .02737, 2772.1, 5.8133, 300, .02947, 2838.4, 5.9305, &
 350, .03524, 3016.0, 6.2283, 400, .03993, 3158.1, 6.4478, &
 450, .04416, 3287.1, 6.6327, 500, .04814, 3410.3, 6.7975, &
 550, .05195, 3530.9, 6.9486, 600, .05565, 3650.3, 7.0894, &
 700, .06283, 3888.3, 7.3476, 800, .06981, 4128.2, 7.5822, &
 900, .07669, 4371.8, 7.7991, 1000, .08350, 4619.8, 8.0020

1010 REM P=8.0 MPA -----

1020 DATA 295.06, .02352, 2758.0, 5.7432, 300, .02426, 2785.0, 5.7906, &
 350, .02995, 2987.3, 6.1301, 400, .03432, 3138.3, 6.3634, &
 450, .03817, 3272.0, 6.5551, 500, .04175, 3398.3, 6.7240, &
 550, .04516, 3521.0, 6.8778, 600, .04845, 3642.0, 7.0206, &
 700, .05481, 3882.4, 7.2812, 800, .06097, 4123.8, 7.5173, &
 900, .06702, 4368.3, 7.7351, 1000, .07301, 4616.9, 7.9384

1030 REM P=9.0 MPA -----

1040 DATA 303.4, .02048, 2742.1, 5.6772, 325, .02327, 2856.0, 5.8712, &
 350, .02580, 2956.6, 6.0361, 400, .02993, 3117.8, 6.2854, &
 450, .03350, 3256.6, 6.4844, 500, .03677, 3386.1, 6.6576, &
 550, .03987, 3511.0, 6.8142, 600, .04285, 3633.7, 6.9589, &
 650, .04574, 3755.3, 7.0943, 700, .04857, 3876.5, 7.2221, &
 800, .05409, 4119.3, 7.4536, 900, .05950, 4364.8, 7.6783

1050 REM P=10 MPA -----

1060 DATA 311.06, .01803, 2724.7, 5.6141, 325, .019861, 2809.1, 5.7568, &
 350, .02242, 2923.4, 5.9443, 400, .02641, 3096.5, 6.2120, &
 450, .02975, 3240.9, 6.4190, 500, .03279, 3373.7, 6.5966, &
 550, .03564, 3500.9, 6.7561, 600, .03837, 3625.3, 6.9029, &
 650, .04101, 3748.2, 7.0398, 700, .04358, 3870.5, 7.1687, &
 800, .04859, 4114.8, 7.4077, 900, .05349, 4361.2, 7.6272

1070 REM P=12.5 MPA -----

1080 DATA 327.89, .013495, 2673.8, 5.4624, 350, .016126, 2826.2, 5.7118, &
 400, .0200, 3039.3, 6.0417, 450, .02299, 3199.8, 6.2719, &
 500, .02560, 3341.8, 6.4618, 550, .02801, 3475.2, 6.6290, &
 600, .03029, 3604.0, 6.7810, 650, .03248, 3730.4, 6.9218, &
 700, .03460, 3855.3, 7.0536, 800, .03869, 4103.6, 7.2965, &
 900, .04267, 4352.5, 7.5182, 1000, .04658, 4603.8, 7.7237

1090 REM P=15 MPA -----

1100 DATA 342.24, .010337, 2610.5, 5.3098, 350, .011470, 2692.4, 5.4421, &
 400, .015649, 2975.5, 5.8811, 450, .018445, 3156.2, 6.1404, &
 500, .02080, 3308.6, 6.3443, 550, .02293, 3448.6, 6.5199, &
 600, .02491, 3582.3, 6.6776, 650, .02680, 3712.3, 6.8224, &
 700, .02861, 3840.1, 6.9572, 800, .03210, 4092.4, 7.2040, &
 900, .03546, 4343.8, 7.4279, 1000, .03875, 4596.6, 7.6348

1110 REM P=17.5 MPA

1120 DATA 354.75, .00792, 2528.8, 5.1419, 400, .012447, 2902.9, 5.7213, &
 450, .015174, 3109.7, 6.0184, 500, .017358, 3274.1, 6.2393, &
 550, .019288, 3421.4, 6.4230, 600, .02106, 3560.1, 6.5866, &
 650, .02274, 3693.9, 6.7357, 700, .02434, 3824.6, 6.8736, &
 800, .02738, 4081.1, 7.1244, 900, .03031, 4335.1, 7.3507, &
 1000, .03316, 4589.5, 7.5589, 1100, .03597, 4589.5, 7.7531

1130 REM P=20 MPA

1140 DATA 355.81, .005834, 2409.7, 4.9269, 400, .009942, 2828.1, 5.5540, &
 450, .012695, 3060.1, 5.9017, 500, .014768, 3238.2, 6.1401, &
 550, .016555, 3393.5, 6.3348, 600, .018178, 3537.6, 6.5048, &
 650, .019693, 3675.3, 6.6582, 700, .02113, 3809.0, 6.7993, &
 800, .02335, 4069.7, 7.0544, 900, .02645, 4326.4, 7.2830, &
 1000, .02897, 4582.5, 7.4925, 1100, .03145, 4840.2, 7.6874

1150 REM P=25 MPA

1160 DATA 375, .0019731, 1848.0, 4.0320, 400, .006004, 2580.2, 5.1419, &
 425, .007881, 2806.3, 5.4723, 450, .009162, 2949.7, 5.6744, &
 500, .011133, 3162.4, 5.9592, 550, .012724, 3335.6, 6.1765, &
 600, .014137, 3491.4, 6.3602, 650, .015433, 3637.4, 6.5229, &
 700, .016646, 3777.5, 6.6707, 800, .018912, 4047.1, 6.9345, &
 900, .021045, 4309.1, 7.1680, 1000, .02310, 4568.5, 7.3802

1170 REM P=30 MPA

1180 DATA 375, .0017892, 1791.5, 3.9305, 400, .002790, 2151.1, 4.4728, &
 425, .005303, 2614.2, 5.1504, 450, .006735, 2821.4, 5.4424, &
 500, .008678, 3081.1, 5.7905, 550, .010168, 3275.4, 6.0342, &
 600, .011446, 3443.9, 6.2331, 650, .012596, 3598.9, 6.4058, &
 700, .013661, 3745.6, 6.5606, 800, .015623, 4024.2, 6.8332, &
 900, .017448, 4251.9, 7.0718, 1000, .019196, 4554.7, 7.2867

1190 REM P=35 MPA

1200 DATA 375, .0017003, 1762.4, 3.8722, 400, .002100, 1967.6, 4.2126, &
 425, .003428, 2373.4, 4.7747, 450, .004961, 2672.4, 5.1962, &
 500, .006927, 2994.4, 5.6282, 550, .008345, 3213.0, 5.9026, &
 600, .009527, 3395.5, 6.1179, 650, .010575, 3559.9, 6.3010, &
 700, .011538, 3713.5, 6.4631, 800, .013278, 4001.5, 6.7450, &
 900, .014982, 4274.9, 6.9886, 1000, .016410, 4541.1, 7.2064

1210 REM P=40 MPA

1220 DATA 375, .0016407, 1742.8, 3.8290, 400, .0019077, 1930.9, 4.1135, &
 425, .002532, 2198.1, 4.5029, 450, .003693, 2512.8, 4.9459, &
 500, .005622, 2903.3, 5.4700, 550, .006984, 3149.1, 5.7785, &
 600, .008094, 3346.4, 6.0114, 650, .009063, 3520.6, 6.2054, &
 700, .009941, 3681.2, 6.3750, 800, .011523, 3978.7, 6.6662, &
 900, .012962, 4257.9, 6.9150, 1000, .014384, 4527.6, 7.1356

53


```

1230 REM P=50 MPA -----
1240 DATA 375,.0015594,1716.6, 3.7639, 400, .0017309, 1874.6, 4.0031,&
      425, .002007 ,2060.0, 4.2734, 450, .002496, 2284.0, 4.5884,&
      500, .003892, 2720.1, 5.1726, 550, .005118, 3019.5, 5.5485,&
      600, .006112, 3247.6, 5.8178, 650, .006966, 3441.8, 6.0342,&
      700, .007727, 3616.8, 6.2189, 800, .009076, 3933.6, 6.5290,&
      900, .010288, 4224.4, 6.7882, 1000,.011411, 4501.1, 7.0146

```

```

1250 REM P=60 MPA -----
1260 DATA 375,.0015028,1699.5, 3.7141, 400, .0016335, 1843.4, 3.9318,&
      425, .0018165, 2001.7, 4.1626, 450, .002065, 2179.0, 4.4121,&
      500, .002956, 2567.9, 4.9321, 550, .003956, 2896.2, 5.3441,&
      600, .004834, 3151.2, 5.6452, 650, .005595, 3364.5, 5.8829,&
      700, .006272, 3553.5, 6.0824, 800, .007459, 3889.1, 6.4109,&
      900, .008508, 4191.5, 6.6805, 1000,.009480, 4475.2, 6.9127

```

```

1270 REM =====
1280 |

```

```
1290 PRINT
```

```
1300 REM TABLE DE VAPEUR SATUREE
```

```
1310 | =====
```

```
1320 REM***(INTRODUCTION DES DONNEES **MATRICE (I1,J1)***
```

```
1330 DIM U(72,8)
```

```
1340 FOR I1=1 TO 72
```

```
1350 FOR J1=1 TO 8
```

```
1360 READ U(I1,J1)
```

```
1370 NEXT J1
```

```
1380 NEXT I1
```

```
1390 | =====
```

```
1400 REM PRESS TEMP VOLUME ENTHALPIE ENTROPIE
```

```
1410 | =====
```

```

1420 DATA 0.000613, 0.01,0.001000,206.14,0.01, 2501.4,0.0000,9.15626,&
      0.0010, 6.98, 0.001, 129.21, 29.30, 2514.2, .1059, 8.9756,&
      0.0015, 13.03, 0.001001, 87.98, 54.71, 2525.3, 0.1957,8.8279,&
      0.0020, 17.50, 0.001001, 67.00, 73.48, 2533.5, 0.2607,8.7237,&

```

```

      0.0025, 21.08, 0.001002, 54.25, 88.48, 2540.0, 0.3120,8.6432,&
      0.0030, 24.08, 0.001003, 45.67, 101.05, 2545.5,0.3545,8.5776,&
      0.0040, 28.96, 0.001004, 34.80, 121.46, 2554.4,0.4226,8.4746,&
      0.0050, 32.88, 0.001005, 28.19, 137.82, 2561.5,0.4764,8.3951,&
      0.0075, 40.29, 0.001008, 19.24, 168.79, 2574.8,0.5764,8.2515

```

```
1430 | -----
```

```

1440 DATA 0.0100,45.91,0.001010, 14.67, 191.83, 2584.7,0.6493,8.1502,&
      0.0150, 53.97, 0.001014, 10.02, 225.94, 2599.1,0.7549,8.0085,&
      0.0200, 60.06, 0.001017, 7.649, 251.40, 2609.7,0.8320,7.9085,&
      0.0250, 64.97, 0.001020, 6.204, 271.93, 2618.2,0.8931,7.8314,&
      0.0300, 69.10, 0.001022, 5.229, 289.23, 2625.3,0.9439,7.7696,&
      0.0400, 75.87, 0.001027, 3.993, 317.58, 2636.8,1.0259,7.6700,&
      0.0500, 81.33, 0.001030, 3.240, 340.49, 2645.9,1.0910,7.5939,&
      0.0750, 91.78, 0.001037, 2.217, 384.39, 2663.0,1.2130,7.4564,&
      0.1000, 99.63, 0.001043, 1.6940, 417.46, 2675.5,1.3026,7.3594

```

```
1450 | -----
```

1460	DATA	0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.32	2685.4	1.3740	7.2844	6
		0.150	111.37	0.001053	1.1593	467.11	2693.6	1.4336	7.2233	6
		0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.99	2700.6	1.4849	7.1717	6
		0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.70	2706.7	1.5301	7.1271	6
		0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.72	2712.1	1.5706	7.0878	6
		0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.37	2716.9	1.6072	7.0527	6
		0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.89	2721.3	1.6408	7.0209	6
		0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.47	2725.3	1.6718	6.9919	6
		0.325	136.30	0.001076	0.5620	573.25	2729.0	1.7008	6.9652	6
1470	!									
1480	DATA	0.35	138.88	0.001079	0.5243	584.33	2732.4	1.7275	6.9405	6
		0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.81	2735.6	1.7528	6.9175	6
		0.400	143.63	0.001084	0.4625	604.74	2738.6	1.7766	6.8959	6
		0.450	147.92	0.001088	0.4140	623.25	2743.9	1.8207	6.8585	6
		0.500	151.96	0.001093	0.3749	640.23	2748.7	1.8607	6.8213	6
		0.550	155.48	0.001097	0.3427	655.93	2753.0	1.8973	6.7893	6
		0.600	158.95	0.001101	0.3157	670.56	2756.8	1.9312	6.7600	6
		0.650	162.01	0.001104	0.2927	684.28	2760.3	1.9627	6.7331	6
1490	!									
1500	DATA	0.7	164.97	0.001108	0.2729	697.22	2763.5	1.9922	6.7080	6
		0.750	167.76	0.001112	0.2556	709.47	2766.4	2.0200	6.6847	6
		0.800	170.43	0.001115	0.2404	721.11	2769.1	2.0462	6.6628	6
		0.850	172.96	0.001118	0.2270	732.22	2771.6	2.0710	6.6421	6
		0.900	175.38	0.001121	0.2150	742.43	2773.9	2.0946	6.6226	6
		0.950	177.69	0.001124	0.2042	753.02	2776.1	2.1172	6.6041	6
		1.00	179.91	0.001127	0.19444	762.81	2778.1	2.1387	6.5865	6
		1.10	184.09	0.001133	0.17753	791.34	2781.7	2.1792	6.5596	6
1510	!									
1520	DATA	1.2	187.99	0.001139	0.16333	798.65	2784.6	2.2166	6.5293	6
		1.30	191.64	0.001144	0.15125	814.93	2787.6	2.2515	6.4953	6
		1.40	195.07	0.001154	0.14094	830.30	2790.0	2.2842	6.4693	6
		1.50	198.32	0.001154	0.13177	844.89	2792.2	2.3150	6.4448	6
		1.75	205.76	0.001166	0.11349	878.50	2796.4	2.3851	6.3896	6
		2.00	212.42	0.001177	0.09963	908.79	2799.5	2.4474	6.3409	6
		2.25	218.45	0.001187	0.08875	936.46	2801.7	2.5035	6.2972	6
		2.50	223.99	0.001197	0.07998	962.11	2803.1	2.5547	6.2575	6
		3.0	233.90	0.001217	0.06668	1008.42	2804.2	2.6457	6.1869	6
1530	REM									
1540	DATA	3.5	242.60	0.001235	0.05707	1049.75	2803.4	2.7253	6.1253	6
		4	250.40	0.001252	0.04978	1087.31	2801.4	2.7964	6.0701	6
		5	263.99	0.001296	0.03944	1154.23	2794.3	2.9202	5.9734	6
		6	275.64	0.001319	0.03244	1213.35	2784.3	3.0267	5.8892	6
		7	285.88	0.001351	0.02737	1267.00	2772.1	3.1211	5.8133	6
		8	295.06	0.001384	0.02352	1316.64	2758.0	3.2063	5.7432	6
		9	303.40	0.001418	0.02048	1363.26	2742.1	3.2858	5.6772	6
		10	311.06	0.001452	0.018026	1407.6	2724.7	3.3596	5.6141	6
		11	318.15	0.001489	0.015987	1450.1	2705.6	3.4295	5.5527	6
		12	324.75	0.001527	0.014263	1491.3	2684.9	3.4962	5.4924	6
1550	!									
1560	DATA	13	330.93	0.001567	0.012780	1531.5	2662.2	3.5606	5.4323	6
		14	336.75	0.001611	0.011485	1571.1	2637.6	3.6232	5.3717	6
		15	342.34	0.001658	0.010337	1610.5	2610.5	3.6848	5.3098	6
		16	347.44	0.001711	0.009306	1650.1	2580.6	3.7461	5.2485	6

17	, 352.37,	0.001770,	0.008364,	1690.3,	2547.2,	3.8079,	5.1777,&
18	, 357.06,	0.001840,	0.007489,	1732.0,	2509.1,	3.8715,	5.1044,&
19	, 361.54,	0.001924,	0.006657,	1776.5,	2464.5,	3.9388,	5.0228,&
20	, 365.81,	0.002036,	0.005834,	1826.3,	2409.7,	4.0139,	4.9269,&
21	, 369.89,	0.002207,	0.004952,	1886.4,	2334.6,	4.1075,	4.8013,&
22	, 373.80,	0.002742,	0.003568,	2022.2,	2165.6,	4.3210,	4.5327

1000 PRINT
 1000 ===== TABLE LIQUIDE COMPRI ME =====
 1010 -----

1020 REM *****MATRICE I2,J2,K2 *****
 1030 DIM L(6,15,4)

1040
 1050 : ENTREE DES PRESSIONS ==PL(I2)===
 1060 FOR I2=1 TO 6
 1070 READ PL(I2)
 1080 NEXT I2
 1090 DATA 5,10,15,20,30,50

1100 FOR I2=1 TO 6
 1110 FOR J2=1 TO 15
 1120 FOR K2=1 TO 4
 1130 READ L(I2,J2,K2)
 1140 NEXT K2
 1150 NEXT J2
 1160 NEXT I2

1170
 1180
 1190
 1200 REM

1210 READ vol mass entalp entrop*** t@ vol mass entalp entrop
 1220 : P=5 MPA

	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
1230 DATA	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
1240	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
1250	0.0003977,	5.04,	.0001,	20,	0.0009995,	89.65,	.2956,&	
1260	0.0010056,	171.97,	.5705,	60,	0.0010149,	255.30,	.8285,&	
1270	0.0010268,	338.85,	1.0720,	100,	0.0010410,	422.72,	1.3030,&	
1280	0.0010576,	507.09,	1.5233,	140,	0.0010768,	592.15,	1.7343,&	
1290	0.0010988,	678.12,	1.9375,	180,	0.0011240,	765.25,	2.1341,&	
1300	0.0011538,	853.90,	2.3255,	220,	0.0011866,	944.40,	2.5128,&	
1310	0.0012264,	1037.50,	2.6979,	260,	0.0012749,	1134.30,	2.8830,&	
1320	0.0012859,	1154.2,	2.9202					

1330 :
 1340 :----- P=10 MPA -----

	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
1350 DATA	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
1360	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
1370	.0009352,	10.04,	0.0002,	20,	.0009972,	93.33,	0.2945,&	
1380	.0010034,	176.38,	0.5686,	60,	.0010127,	259.49,	0.8258,&	
1390	.0010245,	342.83,	1.0688,	100,	.0010385,	426.50,	1.2992,&	
1400	.0010549,	510.64,	1.5139,	140,	.0010737,	595.42,	1.7292,&	
1410	.0010953,	681.08,	1.9317,	180,	.0011199,	767.84,	2.1275,&	
1420	.0011480,	856.00,	2.3178,	220,	.0011805,	945.90,	2.5039,&	
1430	.0012167,	1038.10,	2.6872,	260,	.0012645,	1133.70,	2.8699,&	
1440	.0013216,	1234.10,	3.0548,	300,	.0013972,	1342.30,	3.2469,&	
1450	.0014524,	1407.6,	3.3596					

80.	.0010222	346.81	1.0656	100.	.0010361	430.28	1.2955
120.	.0010522	514.19	1.5145	140.	.0010707	598.72	1.7242
160.	.0010918	684.09	1.9260	180.	.0011159	770.50	2.1210
200.	.0011433	858.2	2.3104	220.	.0011748	947.5	2.4953
240.	.0012114	1039.0	2.6771	260.	.0012550	1139.4	2.8576
280.	.0013084	1232.1	3.0393	300.	.0013770	1337.3	3.2260
320.	.0014724	1453.2	3.4247	340.	.0015311	1591.9	3.6546
342.24.	.0016561	1610.5	3.6848				

1890 REM P=20 MPA

1900 DATA 0.	0.	0.	0.	0.	.0009904	20.1	.0004
20.	.0009928	102.62	.2923	40.	.0009992	185.16	.5646
60.	.0010084	267.85	.8206	60.	.0010139	350.80	1.0624
100.	.0010337	434.06	1.2917	120.	.0010436	517.76	1.5102
140.	.0010678	602.04	1.7193	160.	.0010885	687.12	1.9204
180.	.0011120	773.20	2.1147	200.	.0011388	860.5	2.3031
220.	.0011693	949.3	2.4870	240.	.0012046	1040.0	2.6674
260.	.0012462	1133.5	2.8459	280.	.0012965	1230.6	3.0248
300.	.0013596	1333.3	3.2071	320.	.0014437	1444.6	3.3979
365.21.	.002036	1826.3	4.0139				

1910 REM P=30 MPA

1920 DATA 0.	.0009856	29.82	0.001	20.	.0009886	111.84	0.2899
40.	.0009951	193.89	0.5607	60.	.0010042	276.19	0.8154
80.	.0010156	358.77	1.0561	100.	.0010299	441.66	1.2844
120.	.0010445	524.93	1.5018	140.	.0010621	608.75	1.7098
160.	.0010821	693.28	1.9096	180.	.0011047	778.73	2.1024
200.	.0011302	865.3	2.2893	220.	.0011590	953.1	2.4711
240.	.0011920	1042.6	2.6490	260.	.0012303	1134.3	2.8243
280.	.0012755	1229.0	2.9986	300.	.0013304	1327.8	3.1741
320.	.0013937	1432.7	3.3539	340.	.0014920	1546.5	3.5426
360.	.0016265	1675.4	3.7494				

1930 REM P=50 MPA

1940 DATA 0.	.0009766	49.03	0.0014	20.	.0009804	130.02	0.2848
40.	.0009872	211.21	0.5527	60.	.0009962	292.79	0.8052
80.	.0010073	374.70	1.0440	100.	.0010201	456.29	1.2703
120.	.0010348	539.39	1.485	140.	.0010515	622.35	1.6915
160.	.0010703	705.92	1.8891	180.	.0010912	790.25	2.0794
200.	.0011146	875.5	2.2634	220.	.0011408	961.7	2.4419
240.	.0011702	1049.2	2.6258	260.	.0012034	1138.2	2.7860
280.	.0012415	1229.3	2.9537	300.	.0012860	1323.0	3.1200
320.	.0013339	1420.2	3.2668	340.	.0014032	1522.1	3.4557
360.	.0014838	1630.2	3.6291				

1950 | ##### FIN DE TABLES #####

1960 |

1970 |

1980 |

1990 |

2000 | * CALCUL THERMODYNAMIQUE *

2010 | * DU CYCLE *

2020 | *****

2025 | initialisations

2030 PRES(1)=0 \ PRES(2)=0

2040 HRRESI(1)=0 \ HRRESI(2)=0

2050 HPRES(1)=0 \ HPRES(2)=0

2060 PRINT \ PRINT \ PRINT \ PRINT

```

-----
170 PRINT CHR$(27)+"#6"+"      INTRODUCTION DES DONNEES"
180 PRINT
190 INPUT " la pression et la t° a l'entree de la turbine";PENT;TENT
200 INPUT " la pression au condenseur";PCOND
210 INPUT " le rendement interne de la turbine ";NIT
220 INPUT " le rendement interne de la pompe";NIP
230 INPUT " le nombre de soutirages";N
240 INPUT " le titre minimal a la sortie de la turbine";XMIN
-----
250
260      le calcul du cycle commence par le point ENT (entree de la
270      turbine)
280 POINT N 44="T" \ T=TENT
290 Appel du sous prog. d'interpolation (vapeur surchauffee)INTER C3
300 GO TO 5450
310 Resultats donnees par le sous programme
320 POINT N 45="S" \ S=SENT \ U=VENT=U
330 Calculs pour les points situes sur les lignes de saturation
340 POINT N 60 SUB 4830
350 POINT N 61="HG" \ SG(0)=SG \ HL(0)=HL \ SL(0)=SL \ T(0)=T \ VL(0)=VL
360 GO TO 4840
370
380 POINT N 62="G" \ G0 SUB 4830
390
400 POINT N 63="HL" \ SL(N+1)=SL \ TCOND=T \ VL(N+1)=VL
410 la valeur de SG est calculee par le sous prog. INTER S1
420 IF SENT<SG THEN 2350
430 PRINT CHR$(27)+"#6"+" la vapeur est surchauffee au condenseur"
440 PRINT CHR$(27)+"#6"+"      changez les donnees"
450 GO TO 2050
460 Calcul du titre de la vapeur au condenseur XRC
470 XRC=(SENT-SL)/(SG-SL)
480 HCOND=XRC*(HG-HL)+HL
490 HENT=NENT-NIT*(HENT-HCOND)
500 XRC=(HCOND-HL)/(HG-HL)
510 SCOND=XRC*(SG-SL)+SL
520
530 IF XRC<1 THEN 2460
540 PRINT
550 PRINT " le titre est superieur a 1 "
560 PRINT
570 GO TO 2050
580 IF XRC<XMIN THEN 3010
590 PRINT " XRC=";XRC
600 PRINT "      le titre est inferieur a XMIN"
610 PRINT
620
630 INPUT " voulez vous faire une resurchauffe OUI/NON";O#
640 IF O#="OUI" THEN 2580
650 S1=HENT \ ENTROP=SENT
660 HRES(2)=0 \ SRES(2)=0 \ HRRESI(2)=0 \ HRES(1)=0 \ SRES(1)=0
670 HRRESI(1)=0

```

```

2550 GO TO 3120
2570 |-----
2580 | prévoir une resurchauffe
2590 |-----
2600 PRINT
2610 L=1
2620 SSENT=SENT \ HHENT=HENT
2630 |
2640 INPUT " la pression de la resurchauffe";PRES(L)
2650 |
2660 P=PRES(L) \ S=SSENT \ A$="S" \ GO SUB 5450
2670 PRINT "T=";T
2680 INPUT " DONNEZ UNE T@ de resurchauffe superieur a T";TRES(L)
2690 P=PRES(L) \ GO SUB 4830
2700 R$="RES"
2710 IF SSENT>SG THEN 2760
2720 XI=(SSENT-SL)/(SG-SL)
2730 HRRESI(L)=XI*(HG-HL)+HL
2740 HRRESI(L)=HHENT-NIT*(HHENT-HRESI(L))

2750 GO TO 2790
2760 P=PRES(L) \ S=SSENT \ A$="S" \ GO SUB 5450
2770 HRRESI(L)=H
2780 HRRESI(L)=HHENT-NIT*(HHENT-HRESI(L))
2790 P=HRRESI(L) \ A$="H" \ GO SUB 5450
2800 SRRESI(L)=S \ TRRESI(L)=T
2810 |-----
2820 P=PRES(L) \ T=TRES(L) \ A$="T" \ GO SUB 5450
2830 HRRES(L)=H \ SRRES(L)=S \ VRES(L)=V
2840 |-----
2850 | calcul du titre au condenseur
2860 P=PCOND \ GO SUB 4830
2870 IF SRRES(L)<SG THEN 2900
2880 PRINT CHR$(27)+"#6"+" diminuez la t@ de resurchauffe"
2890 GO TO 2640
2900 XC=(SRRES(L)-SL)/(SG-SL)
2910 HCOND=XC*(HG-HL)+HL
2920 HRCOND=HRES(L)-NIT*(HRES(L)-HCOND)
2930 XRC=(HRCOND-HL)/(HG-HL)
2940 TCOND=T
2950 PRINT " XRC=";XRC
2960 |
2970 IF XRC<XMIN THEN 3060
2980 IF XRC>1 THEN 3040
2990 PRINT " le titre est superieur a XMIN"
3000 ENTHALP=HRES(L) \ ENTROP=SRRES(L) \ GO TO 3120
3010 |
3020 ENTHALP=HENT \ ENTROP=SENT
3030 IF XRC<1 THEN 3120
3040 PRINT " LE TITRE AU CONDENSEUR EST SUPERIEUR A 1"
3050 GO TO 2640
3060 SSENT=SRRES(1) \ HHENT=HRES(1)
3070 L=2
3080 |

```

```

3090 PRINT " LE TITRE EST <XMJN      2eme RESURCHAUFFE"
3100 GO TO 2640
3110 |          #####
3120 |          CALCUL DES SOUTIRAGES
3130 |          #####
3140 |
3145 FOR K=0 TO N+1
3150 HL(K)=0 \ HG(K)=0 \ HRP(K)=0 \ HRS(K)=0 \ HS(K)=0
3155 SL(K)=0 \ SG(K)=0 \ SSP(K)=0 \ SRS(K)=0 \ SS(K)=0
3157 NEXT K
3158 IF N=0 THEN GO SUB 7000
3160 FOR K=1 TO N
3170 IF K<10 THEN 3200
3180 PRINT " LE NOMBRE DE SOUTIRAGE EST SUPERIRUR A 10"
3190 GO TO 4760
3200 PRINT " quel est la pression du soutirage No":K
3210 INPUT "PSOUT=";PSOUT(K)
3220 NEXT K
3230 PSOUT(0)=PENT \ PSOUT(N+1)=PCOND
3240 |
3250 FOR K=1 TO N
3260 |
3270 P=PSOUT(K) \ GO SUB 4830
3280 HG(K)=HG \ HL(K)=HL \ SG(K)=SG \ TC(K)=T \ SL(K)=SL \ VL(K)=VL
3290 IF ENTROP>SG THEN 3420
3300 XS(K)=(ENTROP-SL)/(SG-SL)
3310 HS(K)=XS(K)*(HG-HL)+HL
3320 HRS(K)=ENTHALP-NIT*(ENTHALP-HS(K))
3330 |-----|

3340 IF HRS(K)>HG THEN 3480
3350 X#(K)="U,H"
3360 XRS(K)=(HRS(K)-HL)/(HG-HL)
3370 SRS(K)=XRS(K)*(SG-SL)+SL
3380 URS(K)=XRS(K)*(VG-VL)+VL
3390 TS(K)=T
3400 GO TO 3510
3410 |-----|
3420 | CAS ou la vapeur est surchauffee
3430 X#(K)="U,S"
3440 P=PSOUT(K) \ S=ENTROP \ A#="S" \ GO SUB 5450
3450 |
3460 HS(K)=H
3470 HRS(K)=ENTHALP-NIT*(ENTHALP-HS(K))
3480 P=PSOUT(K) \ H=HRS(K) \ A#="H" \ GO SUB 5450
3490 SRS(K)=S \ URS(K)=U \ TS(K)=T
3500 |-----|
3510 |point situes dans la zone d'eau liquide
3520 HSP(K)=HL(K)+1000*VL(K)*(PSOUT(K-1)-PSOUT(K))
3530 HRP(K)=HL(K)+(HSP(K)-HL(K))/NIP
3540 IF PSOUT(K-1)<5 THEN 3580
3550 P=PSOUT(K-1) \ H=HRP(K) \ GO SUB 5040
3560 SSP(K)=S \ VSP(K)=U \ TE(K)=T
3570 GO TO 3590

```

```

4040 PRINT TAB(20);"PENT=";PENT;TAB(35);"TENT=";TENT
4050 PRINT TAB(20);"NIP=";NIP;"          NIT=";NIT;"          N=";N;"soutirages"
4060 PRINT TAB(20);"PRES(1)=";PRES(1);TAB(35);"TRES(1)=";TRES(1)
4070 PRINT TAB(20);"PRES(2)=";PRES(2);TAB(35);"TRES(2)=";TRES(2)
4080 PRINT TAB(20);"PCOND=";PCOND
4090 PRINT CHR$(27)+"#6"+"          RESULTATS"
4100 PRINT "
4110 PRINT "          entree de la turbine"
4120 PRINT "
4130 PRINT TAB(10);"HENT=";HENT;"  kj/kg";TAB(31);"SENT=";SENT;TAB(46);&
"  kj/kg.ok";TAB(53);"VENT=";VENT;"  m3/kg"
4140 PRINT "
4150 PRINT "
4160 PRINT CHR$(27)+"#6"+"          CONDENSEUR"
4170 PRINT TAB(28);"TITRE=";XRC
4180 PRINT TAB(28);"enthalpie=";HRCOND;"  kj/kg"
4190 PRINT TAB(28);"ENTROPIE =";SRCOND;"  kj/kg.ok"
4200 PRINT TAB(28);"temperature=";TCOND;"  oC"
4210 PRINT TAB(28);"debit=";ALFA(N+1);"  kg/kg"
4220 PRINT "
4225 PRINT " TRAVAIL DE LA POMPE (N+1)eme =";WP(N+1)
4230 PRINT "
4240 IF R#="RES" THEN PRINT " la vapeur a ete resurchauffee"
4250 IF R#="RES" THEN PRINT "HRES=";HRES(1);"HRRESI=";HRRESI(1)
4260 IF R#="RES" THEN PRINT "HRES=";HRES(2);"HRRESI=";HRRESI(2)
4270 "
4280 FOR K=1 TO N
4290 PRINT "
4300 PRINT "          -----"
4310 PRINT "          SOUTIRAGE          No";K
4320 PRINT "          -----"
4330 PRINT "
4340 PRINT TAB(9);"PRESSION DE SOUTIRAGE =";PSOUT(K);"  MPA"
4350 PRINT "
4360 PRINT TAB(10);"HRS=";HRS(K);TAB(30);"SRG=";SRG(K);TAB(46);"T=";TS(K)
4370 PRINT TAB(10);"HG=";HG(K);TAB(30);"HL=";HL(K);TAB(46);"TC=";TC(K)
4380 PRINT TAB(10);"SG=";SG(K);TAB(30);"SL=";SL(K)
4390 PRINT TAB(10);"HRP=";HRP(K);TAB(30);"SSP=";SSP(K);TAB(46);"TE=";TE(K)
4400 PRINT TAB(10);"TITRE =";XS(K);TAB(30);X$(K)
4410 PRINT TAB(10);"TRAVAIL DE POMPE=";WP(K);"  KJ/KG"
4420 PRINT TAB(10);"DEBIT=";ALFA(K);"  m3/kg"
4430 NEXT K
4440 PRINT "*****"
4450 PRINT "
4460 PRINT CHR$(27)+"#6"+"RENDEMENT THERMIQUE=";REND
4470 PRINT "
4480 PRINT CHR$(27)+"#6"+"TRAVAIL NET";WNET;"  KJ/KG"
4490 PRINT "
4500 PRINT TAB(20);"Quantite de chaleur fournie par le"
4510 PRINT TAB(25);"RECUPERATEUR=";OSOM;"  KJ/KG"
4520 PRINT "

```



```

4530 PRINT CHR$(27)+"#6"+TAB(8)+"EVAPORATEUR"
4540 PRINT TAB(10);"ENTREE H=";HL(0);TAB(35);"SORTIE H=";HG(0);&
      TAB(50);"Q=";QEVAP
4550 PRINT TAB(19);"S=";SL(0);TAB(43);"S=";SG(0)
4560 PRINT TAB(19);"V=";VL(0);TAB(43);"V=";VG(0)
4570 PRINT
4580 |
4590 PRINT CHR$(27)+"#6"+TAB(8)+"ECONOMISEUR"
4600 PRINT TAB(10);"ENTREE H=";HSP(1);TAB(40);"SORTIE H=";HG(0);&
      " Q=";QECON
4610 PRINT TAB(21);"S=";SSP(1);TAB(47);"S=";SL(0)
4620 PRINT TAB(21);"V=";VSP(1);TAB(47);"V=";VL(0)
4630 PRINT
4640 PRINT CHR$(27)+"#6"+TAB(8)+"RESURCHAUFFEUR"
4650 PRINT TAB(10);"ENTREE H=";HRRESI(1);TAB(40);"SORTIE H=";HRES(1);&
      " Q=";QRES1
4660 PRINT TAB(19);"S=";SRRESI;TAB(47);"S=";SRES
4670 PRINT TAB(19);"V=";VRRESI;TAB(47);"V=";URES
4680 PRINT
4690 PRINT CHR$(27)+"#6"+TAB(8)+"SURCHAUFFEUR"
4700 PRINT TAB(10);"ENTREE H=";HG(0);TAB(40);"SORTIE H=";HENT;&
      " Q=";QSUR
4710 PRINT TAB(19);"S=";SG(0);TAB(48);"S=";SENT
4720 PRINT TAB(19);"V=";VG(0);TAB(48);"V=";VENT
4730 PRINT
4740 PRINT CHR$(27)+"#6"+" FIN"
4750 PRINT
4760 INPUT " voulez vous changer les donnees OUI/NON";Q#
4770 IF Q#="OUI" THEN GO SUB 6090
4780 GO TO 6260
4790 |
4800 |
4810 | SOUS PROG INTER S1
4820 |#####
4830 REM SOUS PROGRAMME D'INTERPOLATION TABLE DE VAPEUR SATUREE
4840 |#####
4850 FOR I1=1 TO 72
4860 IF U(I1,1)>=P THEN 4900
4870 NEXT I1
4880 |
4890 GO TO 5020
4900 AA0=P-U(I1-1,1)
4910 FOR J1=1 TO 8
4920 AA(J1)=U(I1,J1)-U(I1-1,J1)
4930 NEXT J1
4940 KA=AA0/AA(1)
4950 T=U(I1-1,2)+KA*AA(2)
4960 UL=U(I1-1,3)+KA*AA(3)
4970 VG=U(I1-1,4)+KA*AA(4)
4980 HL=U(I1-1,5)+KA*AA(5)
4990 HG=U(I1-1,6)+KA*AA(6)
5000 SL=U(I1-1,7)+KA*AA(7)
5010 SG=U(I1-1,8)+KA*AA(8)
5020 RETURN

```

```

5030 'SOUS PROG INTER L2
5040 '
5050 REM      SOUS PROG      D'INTERPOLATION EAU LIQUIDE
5060 '
5070 IF P>=5 THEN 5110
5080 '
5090 GO TO 5420
5100 '
5110 FOR I2=1 TO 6
5120 '
5130 IF #L(I2)>=P THEN 5140
5130 NEXT I2
5140 '-----Iere interpolation-----
5150 '
5160 FF1=P-PL(I2-1)
5170 FF2=PL(I2)-PL(I2-1)
5180 KF=FF1/FF2
5190 FOR J2=1 TO 19
5200 FOR K2=1 TO 4
5210 NN=L(I2,J2,K2)-L(I2-1,J2,K2)
5220 R(J2,K2)=L(I2-1,J2,K2)+NN*KF
5230 NEXT K2
5240 NEXT J2
5250 '
5260 '----- 2eme interpolation-----
5270 FOR J2=1 TO 19
5280 IF R(J2,3)>=H THEN 5330
5290 NEXT J2
5300 '
5310 GO TO 5420
5320 LH=H-R(J2-1,3)
5330 LL1=R(J2,1)-R(J2-1,1)
5340 LL2=R(J2,2)-R(J2-1,2)
5350 LL3=R(J2,3)-R(J2-1,3)
5360 LL4=R(J2,4)-R(J2-1,4)
5370 KP=LH/LL3
5380 T=R(J2-1,1)+KH*LL1
5390 U=R(J2-1,2)+KH*LL2
5400 S=R(J2-1,4)+KH*LL4
5410 RETURN
5420 '
5430 '      SOUS PROG INTER C3
5440 '
5450 REM      SOUS PROGRAMME D'INTERPOLATION VAP SURCHAUFFEE
5460 '
5470 FOR I3=1 TO 36
5480 IF PC(I3)>=P THEN 5500
5490 NEXT I3
5500 '----- Iere interpolation-----
5510 '
5520 CP=P-PC(I3-1)
5530 CD=PC(I3)-PC(I3-1)
5540 KPR=CP/CD
5550 FOR J3=1 TO 12
5560 FOR K3=1 TO 4
5570 DD=C(I3,J3,K3)-C(I3-1,J3,K3)
5580 M(J3,K3)=C(I3-1,J3,K3)+KPR*DD

```

```

5590 NEXT K3
5600 NEXT J3
5610 !----- 2eme interpolation -----
5620 IF A#="S" THEN 5780
5630 FOR J3=1 TO 12
5640 IF M(J3,1)>=T THEN 5660
5650 NEXT J3
5660 CCT=T-M(J3-1,1)
5670 CC1=M(J3,1)-M(J3-1,1)
5680 CC2=M(J3,2)-M(J3-1,2)
5690 CC3=M(J3,3)-M(J3-1,3)
5700 CC4=M(J3,4)-M(J3-1,4)
5710 KT=CCT/CC1
5720 !
5730 V=M(J3-1,2)+CC2*KT
5740 H=M(J3-1,3)+CC3*KT
5750 S=M(J3-1,4)+CC4*KT
5760 GO TO 6070
5770 ! entree par l'entropie s
5780 IF A#="H" THEN 5940
5790 FOR J3=1 TO 12
5800 IF M(J3,4)>=S THEN 5820
5810 NEXT J3
5820 CCS=S-M(J3-1,4)
5830 CC1=M(J3,1)-M(J3-1,1)
5840 CC2=M(J3,2)-M(J3-1,2)
5850 CC3=M(J3,3)-M(J3-1,3)
5860 CC4=M(J3,4)-M(J3-1,4)
5870 KS=CCS/CC4
5880 !
5890 V=M(J3-1,2)+CC2*KS
5900 H=M(J3-1,3)+CC3*KS
5910 T=M(J3-1,1)+CC1*KS
5920 !
5930 GO TO 6070
5940 ! entree par l'entropie H
5950 FOR J3=1 TO 12
5960 IF R(J3,3)>=H THEN 5980
5970 NEXT J3
5980 CCH=H-M(J3-1,3)
5990 CC1=M(J3,1)-M(J3-1,1)
6000 CC2=M(J3,2)-M(J3-1,2)
6010 CC3=M(J3,3)-M(J3-1,3)
6020 CC4=M(J3,4)-M(J3-1,4)
6030 KH=CCH/CC3
6040 V=M(J3-1,2)+CC2*KH
6050 T=M(J3-1,1)+CC1*KH
6060 S=M(J3-1,4)+CC4*KH
6070 RETURN

```

```

6090 ! sous programme  changement de donnees
6100 INPUT " VOUS VOULEZ CHANGER 1 SEULE DONNEE  OUI/NON";E#
6110 IF E#="NON" THEN 2025
6120 INPUT " quel est le parametre que vous voulez changer":k#
6130 IF K#="N" THEN 6180
6140 IF K#="PENT" THEN 6200
6150 IF K#="TENT" THEN 6220
6160 IF K#="PCOND" THEN 6240
6170 GO TO 6260
6180 INPUT "N=";N
6190 GO TO 3145
6200 INPUT "PENT=";PENT
6210 GO TO 2200
6220 INPUT " TENT=";TENT
6230 GO TO 2200
6240 INPUT " PCOND=";PCOND
6250 GO TO 2270
6260 RETURN
7000 ! SOUS PROGRAMME POUR CYCLE SANS SOUTIRAGES
7010 P=PCOND \ GO SUB 4820
7020 HL(1)=HL \ HG(1)=HG \ SL(1)=SL \ VL(1)=VL
7030 RETURN

```

64

EXEMPLE D'APPLICATION

INTRODUCTION DES DONNEES

PENT=5 Mpa

TENT=300 oC

PCOND=.008 Mpa

NIT=.75 NIP=.8

XMIN=.95

1 RESURCHAUFFE A P=.7 MPA TRES=300 oC

3 SOUTIRAGES

RESULTATS

entree de la turbine

HENT= 2924.5 kj/kg SENT= 6.2084 kj/kg.oK VENT= .04532 m3/kg

CONDENSEUR

TITRE= .959007

enthalpie= 2478.26 kj/kg

ENTROPIE = 6.99046 kj/kg.oK

temperature= 41.394 oC

debit= .837589 kg/kg

AIL DE LA POMPE (N+1)eme = .115967

SOUTIRAGE No 1

PRESSION DE SOUTIRAGE = .4 MPA

HRS= 2959.42 SRS= 7.3026 T= 231.685
 HG= 2738.6 HL= 604.74 TC= 143.63
 SG= 6.8959 SL= 1.7766
 HRP= 610.973 SSP= 1.77879 TE= 144.379
 TITRE = # V.Surchauffee
 TRAVAIL DE POMPE= 6.23297 KJ/KG
 DEBIT= .406504E-01 m3/kg

SOUTIRAGE No 2

PRESSION DE SOUTIRAGE = .2 MPA

HRS= 2849.12 SRS= 7.3026 T= 155.086
 HG= 2706.7 HL= 504.7 TC= 120.23
 SG= 7.1271 SL= 1.5301
 HRP= 504.965 SSP= 1.7766 TE= 120.23
 TITRE = # V.Surchauffee
 TRAVAIL DE POMPE= .265228 KJ/KG
 DEBIT= .343687E-01 m3/kg

SOUTIRAGE No 3

PRESSION DE SOUTIRAGE = .1 MPA

HRS= 2755.51 SRS= 7.3594 T= 99.63
 HG= 2675.5 HL= 417.46 TC= 99.63 APPROXIMATION
 SG= 7.3594 SL= 1.3026
 HRP= 417.53 SSP= 1.5301 TE= 99.63
 TITRE = .990622 v.h
 TRAVAIL DE POMPE= .130402 KJ/KG
 DEBIT= .087392 m3/kg

#####

RENDEMENT THERMIQUE= .300777

TRAVAIL NET 830.448 KJ/KG

Quantite de chaleur fournie par le
 RECUPERATEUR= 2754.27 KJ/KG

EVAPORATEUR

ENTREE H= 1154.23 SORTIE H= 2794.3 Q= 1640.07

ECONOMISEUR

ENTREE H= 609.726 SORTIE H= 2794.3 Q= 543.257

RESURCHAUFFEUR

ENTREE H= 2686.21 SORTIE H= 3051.2 Q= 364.987

SURCHAUFFEUR

ENTREE H= 2794.3 SORTIE H= 2924.5 Q= 130.2

RESULTATS :

Dans cette partie on a exploité le programme pour déterminer l'influence de certains paramètres sur le rendement thermique et aussi sur le travail spécifique.

Ces résultats sont représentés par les figures suivantes :

- Fig. R1 : variations du rendement thermique en fonction de la température d'admission à la turbine.
- Fig. R2 : variations du rendement en fonction du nombre de régénération.
- Fig. R3 : variations du rendement en fonction de la pression de condensation de la vapeur
- Fig. R4 : variations du rendement en fonction de la pression d'admission de la vapeur.
- Fig. R5 : Variations du travail net en fonction du nombre de soutirages.

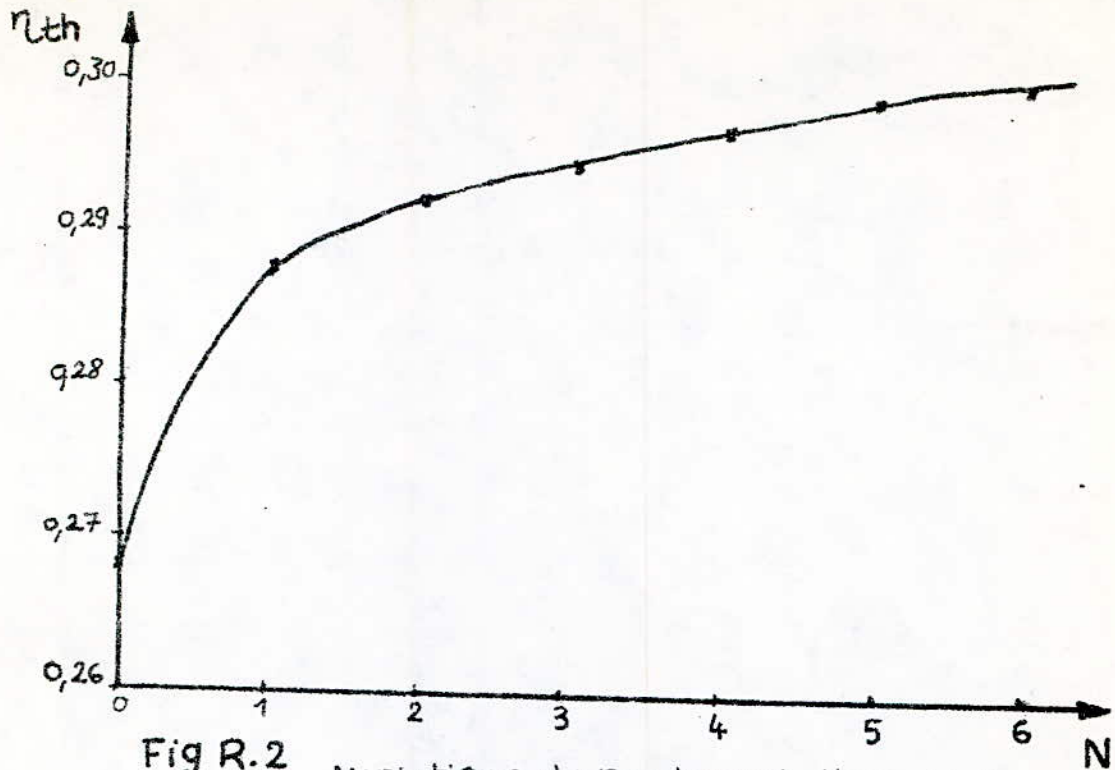


Fig R.2

variations du rendement thermique
en fonction du nombre de Soutirages.

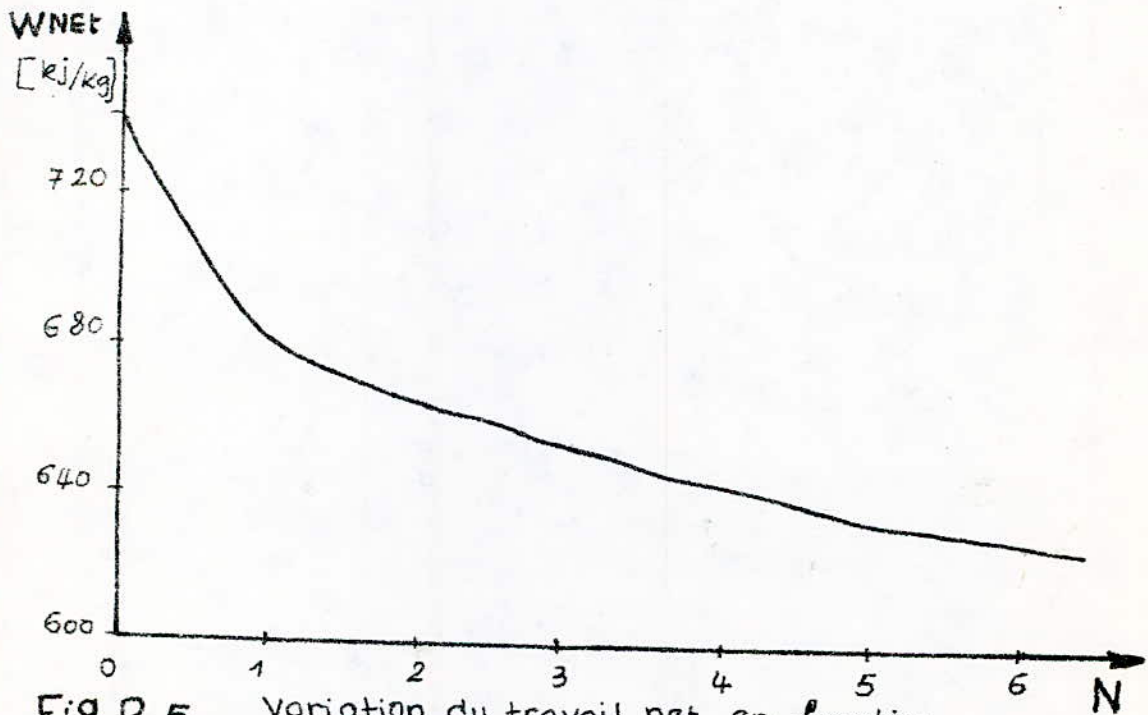


Fig R.5

Variation du travail net en fonction
du nombre de Soutirages.

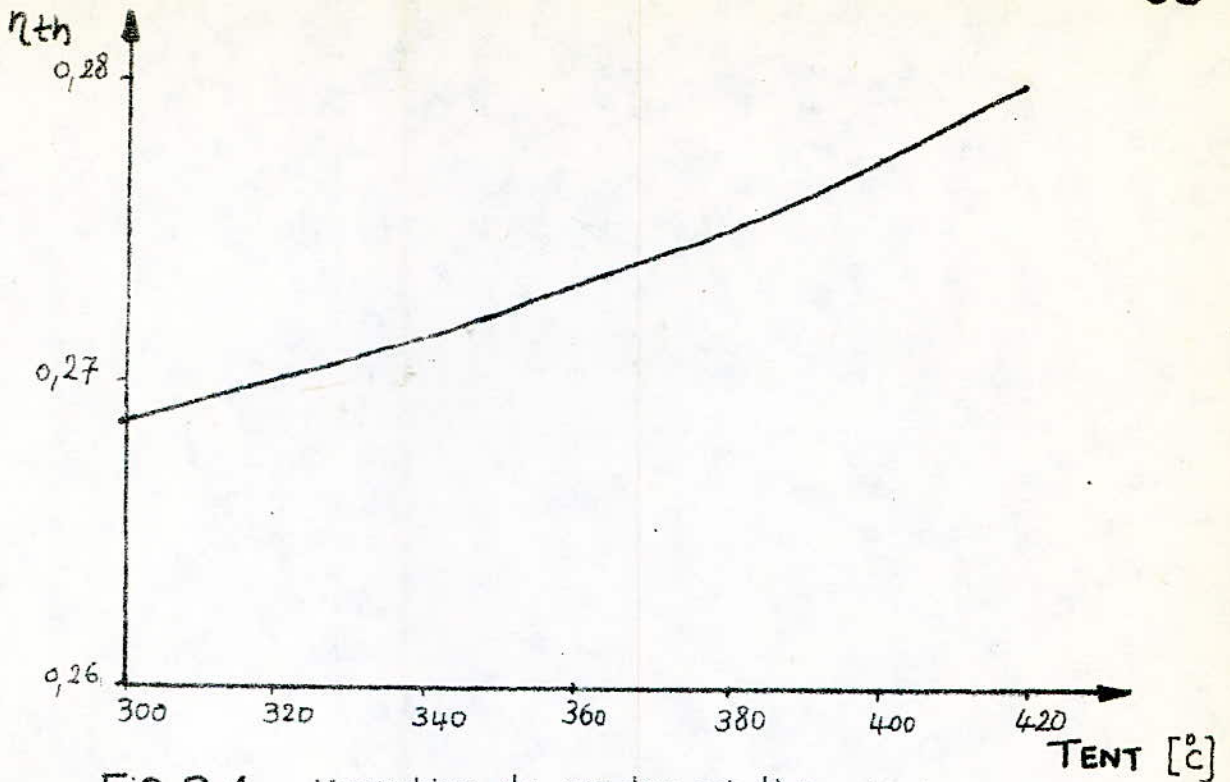


Fig R.1 Variation du rendement thermique en fonction de la température d'admission à la turbine

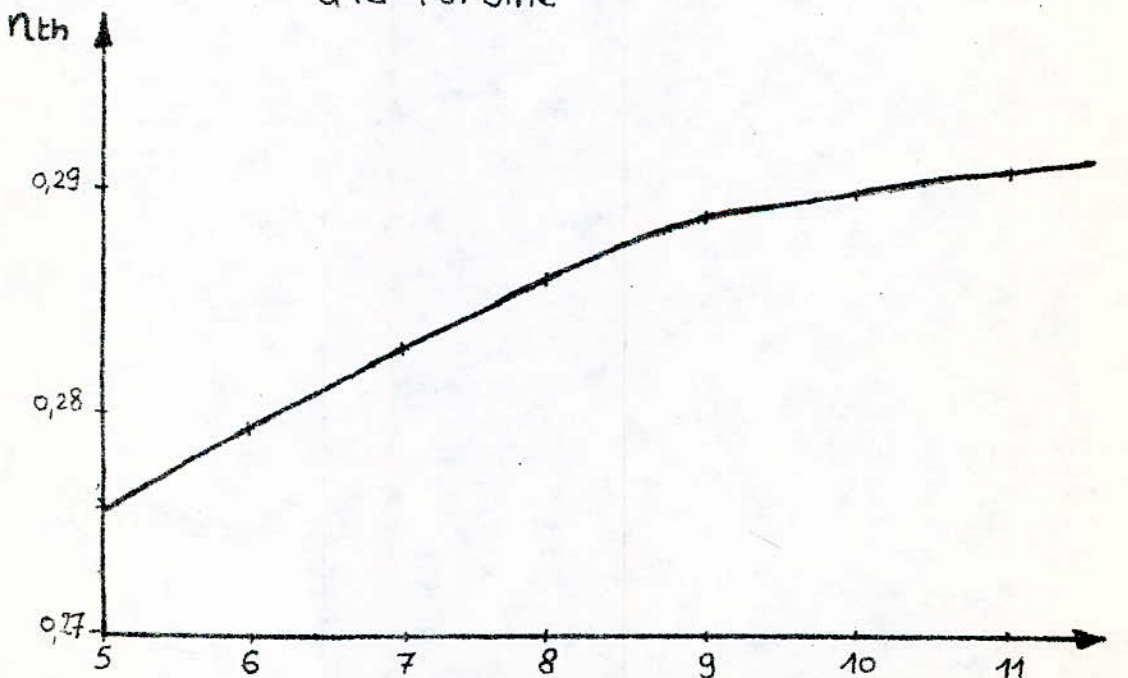


Fig R.4 Variations du rendement thermique en fonction de la pression d'admission à la turbine

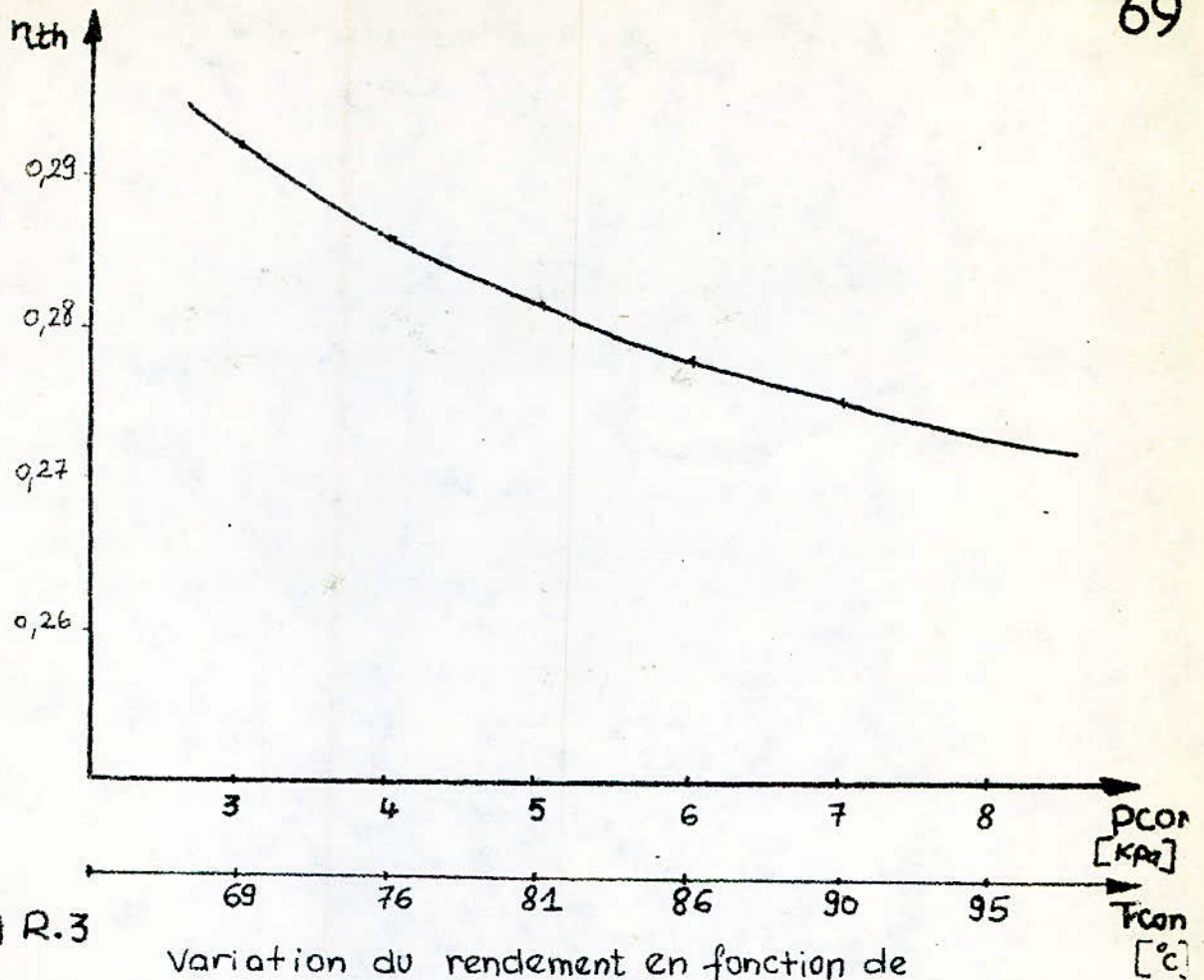


Fig R.3

Variation du rendement en fonction de la température de condensation

APPENDICE

calcul d'un cycle combiné
gaz-vapeur

ETUDE DE LA COMBUSTION

ON A CHOISI COMME COMBUSTIBLE LE GAZ NATUREL AYANT LES
CARACTERISTIQUE SUIVANTE:

COMPOSITION MASSIQUE EN .

o CH₄ : 87

C₂H₆ : 10

C₃H₈ : 3

POUVOIR CALORIFIQUE INFERIEUR EN KJ / KG

CH₄ = 55495

C₂H₆ = 51875

C₃H₈ = 50345

LE POUVOIR CALORIFIQUE MOYEN EQUIVALENT:

PCI = 54977,9 KJ / KG

LA MASSE MOLAIRES EQUIVALENTE 18,24. KG/KMOL E

4,6174 KG D HYDROGENE / KMOL E

13,056 kg DE CARBONE /KMOL E

SOIT 26,7 % de H ET 76,3. DE C

RAIORT H/C = 0,35
C/H = 2,84

ETABLISONS LA FORMULE CHIMIQUE DE LA MOLE FICTIVE EQUIVALENTE

C C H Y:

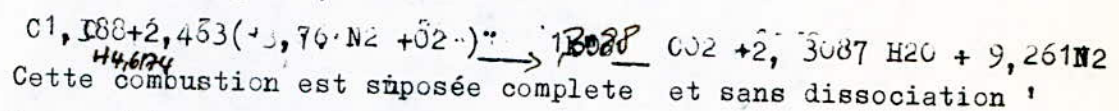
$$X = \frac{\%C}{12} = \frac{13,056}{12} = 1,088$$

$$Y = \frac{\%H}{1} = \frac{4,6174}{1} = 4,6174$$

LA FORMULE FICTIVE POUR UNE MOLE DE COMBUSTIBLE SOIT C_{1,3088}H_{4,6174}

COMBUSTION STOCHIOMETRIQUE §

La réaction de combustion stochiometrique de ce gaz naturel avec l'air atmospherique composé de 3,76 moles d azotes pour une mole d oxygene . S ecrit:



Cette combustion est supposée complete et sans dissociation ' Lareaction est equilibrée en etablissant d' abord le bilan de C ;le bilan de H2, celui de O2 ET CELUI de N2

Lepouvoir calorifique moyen equivalent a eté évalué à 54979KJ/KG

COMBUSTION REELLE

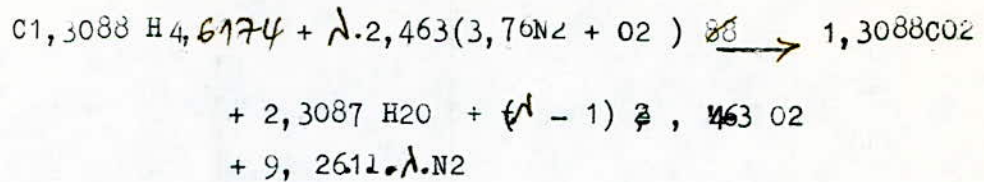
La combustion reelle ne se fait un certain exces d'air pour etre aussi complete que possible ou pour reduire la temperature de combustion comme dans le cas des turbines à gaz dont les a ubages ne peuvent supporter des temperatures elevés sans etre refroidies

cet exces d'air est realisé par le dosage de combustible injecté par pompe pour le debit d'air admis ,c'est le cas notamment de l'injection d'essence dans le cas de moteur à combustion interne, de celle du gazoil dans le moteur diesel , de celle du kerozane dans la turbine à gaz .Dans le moteur à essence normal l' exes d'air , quand il est t moderé, n'affecte pas sensiblement le rendement thermodynamique de carnet , car il prodiut une combustion complete .

il en est autrement de l' exes d'air realisé pour le controle de temperature d' admission à la turbine à gaz .

SOIT $\lambda = \frac{\text{Masse d'air admise}}{\text{masse d' air theorique}}$

La réaction de la combustion avec excès d'air complète et sans dissociation s'écrit/:



on se propose de calculer et de maintenir un excès d'air de λ afin de limiter la température d'admission à la turbine à 950°C

Le calcul de λ se fait à partir de l'équation de combustion ci-dessus à laquelle on applique le bilan énergétique approprié à une combustion adiabatique selon laquelle

$$Q - W = H_P - H_R \\ \text{ET } Q = W = 0$$

DONC l'enthalpie des produits est égale à l'enthalpie des réactants, chacune étant évaluée par rapport à la base standard de 25°C , 100 kPa

$$H_P = \sum n_P (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h}_{T_i P})_P \quad (1)$$

$$H_R = \sum n_R (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h}_{T_i R})_R \quad (2)$$

AVEC

\bar{h}_f° enthalpie de formation aux conditions standard

$\Delta \bar{h}_{T_i P}$ différence d'enthalpie de la substance considérée entre les conditions actuelles et les conditions standard

les enthalpies de formation standard utilisées sont données en kJ/Kmol

$$\text{CH}_4 : \bar{h}_f^\circ = -74873$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 : \bar{h}_f^\circ = 84667$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 : h_f = - 1\,03847$$

$$\text{H}_2\text{O, vap} : h_f^\circ = - 241827$$

$$\text{CO}_2 : h_f^\circ = - 393522$$

$$\text{N}_2, \text{O}_2 : h_f = 0$$

PAR DEFINITION LES VALEURS DE D_{HTIP} EN KJ/KMOL UTILISÉE sont données par le tableau (A.1)

ETANT DONNÉES les conditions à l'entrée de la chambre de combustion, l'enthalpie des réactions est évaluée à partir de leurs compositions, de leur enthalpie de formation à $298,15\text{K}$ ET de D_{HTIP} évaluée à partir des tableaux A.1. on supposera que le gaz naturel est injecté à 25°C à la pression de la chambre de combustion

L'HYPOTHESE des gaz parfaits est faite pour l'air et le gaz naturel à l'entrée de la chambre de combustion.

L'enthalpie des produits de combustion est évaluée selon la même procédure et l'hypothèse de gaz parfaits. lorsque la température maximum de 950°C est atteinte, l'égalité de l'enthalpie des produits et des réactants permet de déterminer N et d'effectuer les autres calculs du cycle.

CALCUL DU CYCLE DE BRAYTON

On se propose de calculer un cycle thermodynamique de turbine à gaz ayant les caractéristiques suivantes :

Admission de l'air : Température 25°C

Pression 1 atm

Compresseur : Rendement = 0,8

Taux de compression = 6

Température maximale de fin de combustion = 950°C

Combustible utilisé G.N. (déjà défini)

Rendement de la turbine = 0,84

Les Enthalpies de l'air et des gaz sont évaluées par rapport aux conditions standard (25°C, 100 kpa). Le cycle étudié est représenté sur le diagramme (T - S) par la figure (A. 2).

On a par définition :

$h_1 = 0$ enthalpie de l'air ambiant à 25°C.

La transformation 1 — 2' est isentropique :

$$\text{d'où : } \frac{T_2'}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \quad \gamma = 1,4 \text{ et } \frac{P_2}{P_1} = 6$$

$$T_2' = 298 \cdot \left(6 \right)^{\frac{0,4}{1,4}}$$

$$T_2' = 497^\circ\text{K}$$

h'_2 est calculé à partir de la formule suivante :

$$h'_2 = h_{298} + \int_{298}^{497} C_{p\text{air}} \cdot dt$$

$$C_{p\text{air}} = \frac{\sum n_i \cdot C_{pi}}{\sum n_i}$$

$$C_p (N_2) = 39,060 - 512,78 \theta^{-1,5} + 1072,7 \theta^{-2} - 820,40 \theta^{-3}$$

$$C_p (O_2) = 37,432 + 0,020102 \theta^{1,5} - 1,7857 \theta^{-1,5} + 236,88 \theta^{-2}$$

$$\text{avec } \theta = \frac{T}{100} \text{ [}^\circ\text{K]}^{-1}$$

$$\text{On a } h_2' = 203 \text{ kJ / kg}$$

Détermination de l'excès d'air :

l'enthalpie des produits de combustion :

$$H_p = \sum n_p (\bar{h}_f + \Delta h_{T,P})_p$$

l'enthalpie des réactants :

$$H_R = \sum n_R (\bar{h}_f + \Delta h_{T,P})_R$$

$$H_p = 1,3088 (\bar{h}^{\circ}_f + \Delta h_{T,P})_{CO_2} + 2,3087 (\bar{h}^{\circ}_f + \Delta h_{T,P})_{H_2O} + (\lambda - 1) \cdot 2,463 (\bar{h}^{\circ}_f + \Delta h_{T,P})_{O_2} + \lambda \cdot 9,26 (\bar{h}^{\circ}_f + \Delta h_{T,P})_{N_2}$$

$$H_R = H_{air} + \Delta h_{\text{combustible}}$$

En utilisant les données de base de chaque constituant on aura :

$$H_p = -100\,6\,821 + 342\,875 \cdot \lambda$$

$$H_R = -78\,570 + 67\,553 \cdot \lambda$$

$$\text{d'où l'excès d'air } \lambda = 3,372$$

enthalpie des gaz en fin de combustion :

$$h_3 = h_2 + \Delta h$$

$$h_2 = h_1 + \frac{h_2' - h_1}{M_c} = 0 + \frac{203 - 0}{0,8} = 254 \text{ kJ/kg}$$

Δh étant l'enthalpie de combustion.

$$\Delta h = 0,87 \cdot \Delta h (CH_4) + 0,10 \cdot \Delta h (C_2H_6) + 0,03 \cdot \Delta h (C_3H_8)$$

Les enthalpies de combustion des différents hydrocarbures prises à 25°C sont en [kJ / kg]

$$CH_4 = 50\,010$$

$$C_2H_6 = 47\,484$$

$$C_3H_8 = 46\,353$$

finalement $h_3 = 1115 \text{ [Kj/kg]}$

L'étape 3 — 4' est une détente isentropique

$$\frac{T_3}{T_{4'}} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \longrightarrow T_{4'} = \frac{1223}{6^{0,14}} = 733 \text{ K}$$

$$T_{4'} = 733^\circ\text{K}$$

$$h_3 - h_{4'} = \int_{T_3}^{T_{4'}} C_p \cdot dT$$

On prend une valeur moyenne $C_p = 1,20 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$

alors $h_{4'} = 528 \text{ K/kg}$ et $h_4 = 586,5$

Le rendement thermique du cycle de Brayton

$$\eta_{th} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2}$$

$$\eta_{th} = 0,32$$

2/ Cycle de Brayton à régénération :

Une partie de la chaleur des gaz d'échappement est récupérée à l'aide d'un échangeur d'efficacité = 0,9

$$\varepsilon = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \quad h_5 = h_2 + \varepsilon \cdot (h_4 - h_2)$$

$$h_5 = 553 \text{ kJ/kg}$$

Le rendement thermique du cycle de Brayton à régénération s'écrit :

$$\eta_{th} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_5}$$

$$\eta_{th} = 0,48$$

Le travail net

$$W = h_3 - h_4 = 528,5 \text{ kJ/kg}$$

3/ CALCUL APPROXIMATIF du cycle combiné :

	Données	Resultats
cycle à Vapeur	pression d'entrée de la turbine $= 5 \text{ Mpa}$ Temperature d'entrée $= 300^\circ\text{C}$ pression de Condensation $= 8 \text{ kpa}$ rendements : $\eta_{it} = 0,75$; $\eta_{ip} = 0,8$ Sans resurchauffe et sans soutirage	rendement $= 0,38$ travail net $= 668 \text{ kJ/kg}$
cycle à gaz	calculé en 2/	rendement $= 0,32$ travail net $= 528,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
cycle Combiné gaz - vapeur	débit de gaz de Combustion $= 350 \text{ t/h}$ débit de Vapeur 60 t/h	$P_{EV} \approx 12 \text{ MWh}$ $P_{EG} \approx 52 \text{ MWh}$ $P_C \approx 94 \text{ MWh}$ rendement global $= 0,68$ Consommation $= 4,47 \text{ kg/kWh}$

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette étude nous a permis d'établir un programme informatique en langage BASIC, permettant de faire l'étude généralisée des cycles thermodynamiques à vapeur.

C'est un moyen qui facilite notablement l'étude de ces cycles, et en particulier, permet d'établir rapidement une comparaison des différents cycles entre eux et de déterminer ainsi l'influence des principaux paramètres caractérisant le fonctionnement de l'installation thermique : forme du cycle, pressions et températures extrêmes etc...

Mais l'introduction du cycle gaz à l'amont du cycle vapeur présente plusieurs particularités et entraîne l'étude dans un domaine très vaste. Il s'agit d'étudier l'association d'un cycle de turbine à gaz avec une tranche à vapeur et de tirer de cette association le meilleur effet possible.

Il est donc nécessaire de poursuivre cette étude par des programmes complémentaires de cycle à gaz et de dimensionnement des appareils dans lesquels ont lieu les principales transformations thermodynamiques, notamment la chaudière de récupération, le condenseur et les régénérateurs.

Le programme a été chargé sur bande et déposé à la direction du département Génie Mécanique pour son utilisation dans l'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

- | | |
|--|-------------------|
| 1- Thermodynamique Technique | HOUBECHTS |
| 2- Thermodynamique Technique | V. KRILLIN |
| 3- Thermodynamique Technique | M. BAILLY |
| 4- La Turbine à gaz | P. CHAMBADAL |
| 5- Principes de la thermodynamique | JEAN CHARLES SISI |
| 6- Turbines à vapeur et à gaz | LUCIEN VIVIER |
| 7- Les machines transformatrices d'énergie | LEMASSON |
| 8- Programmation BASIC | SCHAUM |
| 9- Revues BROWN BOVERI | |

