

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION ET ANALYSE D' UN ÉTAGE DE TURBINE
DONT LE STATOR EST EN FORME DE CONDUITE SPIRALE

KAMEL MEKROUZ
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
JANVIER 2003



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-81524-2

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

CONCEPTION ET ANALYSE D'UN ÉTAGE DE TURBINE
DONT LE STATOR EST EN FORME DE CONDUITE SPIRALE

présenté par: MEKROUZ Kamel

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. GARON André, Ph.D., président

M. REGGIO Marcelo, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. TRÉPANIÉ Jean-Yves, Ph.D., membre

À ma très chère épouse Fahima

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire de maîtrise. Particulièrement, je tiens à remercier mon directeur de recherche M. Marcelo Reggio pour ses précieux conseils et la confiance dont il a fait preuve envers mes travaux.

Un gros merci à mon épouse Fahima pour son soutien, sa compréhension et son encouragement. Sans sa patience envers mes absences du foyer, durant toutes les périodes de travail, mes études auraient été plus difficiles.

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente une nouvelle idée, qui consiste à changer la configuration connue de l'étage de turbine.

La nouvelle configuration vise à éliminer la partie statique de l'étage qui est la roue directrice afin de la remplacer par une ou deux conduites en forme de spirales.

Ce concept concerne les deux types de turbines thermiques : soit celle à gaz ou à vapeur.

Le plus important objectif de ce mémoire est de prouver que la conduite spirale peut jouer le même rôle que celui de la roue directrice, c'est-à-dire transformer l'énergie thermique du gaz en énergie cinétique.

Le deuxième objectif est de montrer que l'étage avec deux conduites spirales peut être utilisé dans les turbines à vapeur comme moyen de réglage de puissance, remplaçant de ce fait la roue de tête. Sachant que cette dernière représente une source de pertes d'énergie et de problèmes de fabrication et de maintenance, le concept proposé dans ce mémoire rapporterait des gains au fabricant et à l'opérateur de la turbine.

Les deux objectifs cités ci-dessus encourageraient l'industrie à s'intéresser à la nouvelle configuration, parce que les aubes du premier étage des turbines travaillent dans des conditions extrêmes de contraintes mécaniques et thermiques. L'utilisation de matériaux et des technologies avancées afin d'assurer la fiabilité des aubes oblige les fabricants à dépenser plus d'argent.

D'autre part, les exploitants des turbines opèrent des machines dont le cycle de vie des aubes est limité, ceci cause des travaux de maintenance plus fréquents.

Aussi les exploitants des turbines à vapeur, dont le réglage de puissance se fait par remplissage, savent que le rendement au point "off design" est très bas par rapport

à celui du point de design. Le concept analysé dans ce mémoire éliminerait tous les inconvénients cités ci dessus.

Il est montré dans ce document pourquoi une conduite spirale peut remplacer un stator et pourquoi une double conduite peut être utilisée pour le réglage des turbines à vapeur.

Un modèle unidimensionnel est construit pour le calcul de l'écoulement à travers l'étage en question et une analyse paramétrique est effectuée par l'intermédiaire de ce modèle. Les résultats obtenus montrent que la conduite spirale est bien fonctionnelle comme stator, indépendamment des suppositions prises par rapport aux coefficients de pertes dans la conduite spirale. Ce modèle ne permet pas de savoir si le débit massique et l'angle α , que forme la vitesse avec la section de sortie, sont uniformes sur tout le périmètre de la couronne d'ailettes.

Le modèle tridimensionnel est construit afin de répondre à la question restée sans réponse par le modèle 1D. Un calcul effectué par le logiciel FIDAP 8.60 montre que les paramètres thermodynamiques à la sortie de la spirale sont plus ou moins uniformes sur tout le périmètre. Néanmoins il faut souligner que la géométrie des conduites spirales doit être convenablement conçue afin que l'étage proposé remplisse bien sa fonction.

Ce document peut également servir comme plate-forme à d'éventuelles études avancées sur le sujet ou pour tester l'étage proposé par des essais expérimentaux.

ABSTRACT

The following study is a new concept that consists in changing the known configuration of turbine stage.

The new configuration suggests the replacement of the static section by one or two pipes with spiral shapes.

This concept applies to both types of thermal turbines: gas turbine and steam turbine.

The most important objective of this thesis is to prove that the spiral pipe can function as stator. This means it transforms the thermal energy into kinetic energy.

The second objective is to show that the stage, with two spiral pipes, can be used in steam turbine as means to regulate power. In this case the replacement of stator, which is a source of energy losses and operating problems, will be profitable.

Both objectives noted above might encourage the industry to exploit this new concept, because blades of the turbine first stage work in extreme conditions of mechanical and thermal stress.

The use of special materials and high technologies, to ensure blades reliability, force manufacturers to spend more money.

In addition to this, operators of turbines must perform frequently servicing because of the limited blades life cycle.

On the other side steam turbine, with filling method of power adjusting, has a low efficiency at the off-design operating points

Proposed concept in this study shall eliminate all disadvantages noted above.

It is clearly shown in this document: why the spiral pipe can substitute stator and why double pipe can be used in steam turbines power adjustment.

A one-dimensional model is built to compute the flow through the stage, with a spiral pipe. A parametrical analysis is used for this case. Obtained results show that spiral pipe works like a stator, independently of suppositions assumed for the energy loss coefficients.

This model does not allow knowing if at the outflow section, the flow from the pipe and the angle α between speed direction and this section, are uniform.

The tri-dimensional model is built to give information about unknowns noted above. The findings of computation, done per FIDAP 8.60, show that all flow parameters at the outflow are uniform. Nevertheless it must be said that the pipe geometry shall be appropriately designed to ensure functionality of that stage.

This document may be used as platform for possibly advanced studies on the subject or for experimental tests.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT.....	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES.....	xiv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 ROUE DIRECTRICE.....	5
1.1 Généralités	5
1.2 Fonction de la roue directrice dans l'étage.....	6
1.3 Pertes d'énergie générées par la roue directrice.....	8
1.4 Coût de fabrication et d'exploitation de la roue directrice	11
1.5 Vibrations causées par la roue directrice	13
1.6 Réglage des turbines à vapeur	14
1.6.1 Réglage par laminage.....	15
1.6.2 Réglage par remplissage	16
1.6.3 Réglage by-pass	21
1.6.4 Réglage par glissement	21
1.6.5 Réglage par évacuation	22
CHAPITRE 2 CONDUITE SPIRALE.....	24
2.1 Fondements du concept.....	24
2.2 Conduite spirale pour le réglage des turbines à vapeur.....	28
CHAPITRE 3 CALCUL UNIDIMENSIONNEL.....	30
3.1 Modèle.....	30

3.2	Algorithme	35
3.3	Exemple de calcul	43
3.4	Analyse paramétrique.....	47
CHAPITRE 4 CALCUL TRIDIMENSIONNEL.....		50
3.1	Géométrie et maillage	51
3.2	Équations résolues.....	54
3.3	Conditions aux frontières	57
3.4	Résultats.....	57
CONCLUSION.....		63
RÉFÉRENCES.....		65
ANNEXE I PROGRAMME DE CALCUL 1D		68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Paramètres thermodynamiques	45
Tableau 3.2 Triangles de vitesses	46
Tableau 3.3 Réactions des composantes	47
Tableau 3.4 Débit massique et rendement	47

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Étage de turbine	6
Figure 1.2	Roue de tête d'une turbine à vapeur.....	7
Figure 1.3	Détachement de la couche limite	9
Figure 1.4	Changement de la force exercée sur l'ailette durant un tour du stator	13
Figure 1.5	Réglage par laminage	15
Figure 1.6	Transformation thermique lors du laminage	16
Figure 1.7	Réglage par remplissage	17
Figure 1.8	Pertes dues au réglage par remplissage	18
Figure 1.9	Vibrations forcées lors du réglage par remplissage	20
Figure 1.10	Réglage by-pass	21
Figure 1.11	Réglage par glissement	22
Figure 1.12	Réglage par évacuation	23
Figure 2.1	Conduite spirale	25
Figure 2.2	Deux conduites spirales pour le réglage de turbine	28
Figure 3.1	Modèle de calcul	31
Figure 3.2	Étage avec conduites spirale	33
Figure 3.2	Transformation thermique du fluide	34
Figure 3.4	Dimensions utilisées dans le calcul	41
Figure 3.5	Dimensions de la conduite spirale	44
Figure 3.6	Triangles de vitesses	46
Figure 3.7	Variation de l'angle α en fonction du paramètre K_{spi}	48
Figure 3.8	Pressions aux sections de contrôle en fonction du paramètre K_{spi}	49
Figure 4.1	Section de la zone calculée	51
Figure 4.2	Dimensions de la zone modelée	52
Figure 4.3	Maillage des deux conduites spirales	53
Figure 4.4	Graphe de convergence	58
Figure 4.5	Composante normale de la vitesse à la section de sortie	58

Figure 4.6 Composante normale de la vitesse au voisinage de l'entrée	59
Figure 4.7 Composante radiale de la vitesse au voisinage de l'entrée	59
Figure 4.8 Densité sur la section de sortie	60
Figure 4.9 Vecteur vitesse à la section de sortie I.....	60
Figure 4.10 Vecteur vitesse à la section de sortie II.....	61
Figure 4.11 Vitesse à la fin de la conduite	61
Figure 4.12 Variation de l'angle α sur la section de sortie	62

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

b	Corde du profil
C, c	Vitesse absolue
$c_{\mu}, c_{\mu}, \sigma_k, \sigma_{\varepsilon}$	Constantes du modèle $k - \varepsilon$
c_v	Coefficient de chaleur spécifique à volume constant
C_p	Coefficient de chaleur spécifique à pression constante
d	Diamètre moyen
ds	Surface unitaire
e	Largeur de la couronne d'ailettes
$\vec{f}$	Force massique
H	Enthalpie
$\vec{H}$	Moment de quantité de mouvement
k	Énergie cinétique de turbulence
K	Coefficient de perte du moment de quantité de mouvement
l	Largeur de la section de sortie
M	Masse molaire
Ma	Nombre de Mach
P	Pression
$\vec{P}_n$	Tenseur des contraintes normales
q	Flux de l'énergie thermique
R	Constante des gaz
r	Réaction
$\vec{r}$	Vecteur rayon
S	Sections de conduite
t	Pas du profil
w	Vitesse relative
	Angle formé par la direction de la vitesse et la section de sortie
β_u	Angle d'inclinaison de l'ailette
β_4	Angle de sortie de l'ailette
o	Largeur de la fente d'étanchéité

δr	Coefficient correctif de la réaction
δm	Pertes massiques d'étanchéité
ε	Vitesse de dissipation
μ	Viscosité
μ_t	Viscosité turbulente
ρ	Densité
σ	Tenseur de contraintes générales
τ	Contrainte tangentielle
ζ	Coefficient de pertes
θ	Coefficient correctif des pertes
χ	Constante de Poisson

Indices et exposants

'	Fluctuation
0	Entrée au convergent
1	Entrée à la spirale
2	Entrée à la zone de mélange
3	Entrée à la couronne d'ailettes
4	Sortie de la couronne d'ailettes
Rey	Nombre de Reynolds
Mach	Nombre de Mach
spi	Spirale
con	Convergent
mel	Zone de mélange

INTRODUCTION

La présente étude introduit et analyse une nouvelle façon d'alimenter l'étage d'une turbine thermique par le fluide. Cette turbine thermique peut être une turbine à vapeur comme celle à gaz. L'idée du concept s'appuie sur la possibilité de remplacer le stator de la turbine par une conduite en forme de spirale. Dans la nouvelle configuration, l'étage ne se compose pas d'un stator et d'un rotor mais d'un canal spiral et d'un rotor.

La première étape de ce document cherche à montrer que le changement proposé n'affecte pas le rôle de l'étage et qu'une conduite spirale remplit toutes les fonctions du stator. Ce dernier qui est utile pour transformer l'énergie thermique du fluide en énergie cinétique, est muni d'un nombre défini d'aubes dont les profils sont conçus pour ce rôle.

Le concept proposé est valable pour chaque étage de la turbine mais, dans ce mémoire l'étude est concentrée sur le premier étage, parce que les résultats obtenus pour ce cas paraissent plus bénéfiques.

L'idée de remplacer le stator d'une turbine par une conduite spirale est née, lorsque les turbines à vapeur ont démontré de grosses pertes d'énergie durant l'exploitation au point "off design". D'après les études [1] faites pour le compte de ASEA BROWN BOVERI A.B.B, la turbine analysée s'est vue diminuer le rendement durant les charges inférieures à la valeur nominale.

Cette nouvelle configuration de l'étage a pour mission non seulement d'améliorer le rendement des turbines à vapeur, mais également peut être utilisée afin de diminuer le coût de fabrication et de maintenance des aubes des turbines à gaz et à vapeur.

Dans le premier chapitre de ce mémoire il sera question de la roue directrice des turbines thermiques en général. Cette partie se concentre sur les inconvénients que présente cette roue et qui sont possibles à éliminer si l'étage était muni d'une conduite spirale. Des exemples de ces inconvénients sont : les pertes générées par les profils dans le stator, les contraintes thermomécaniques exercées sur les aubes et les vibrations provoquées par les traces des profils.

Les phénomènes cités dessus causent des problèmes au fabricant et à l'exploitant de la turbine, d'une part le fabricant utilise des technologies avancées pour fabriquer des aubes fiables et résistantes aux grandes températures, d'une autre part l'exploitant dépense plus d'argent pour combler les pertes d'énergie et à effectuer des travaux de maintenance plus fréquemment.

La configuration proposée dans ce mémoire possède une autre fonction possible : celle de régler la puissance des turbines à vapeur. Cette caractéristique est réalisable si la turbine est dotée de deux conduites spirales au lieu d'une seule, la propriété du réglage est montrée à la section (2.2) de ce mémoire. Les méthodes utilisées actuellement en industrie pour régler les turbines sont présentées d'une façon générale à la section (1.6) afin de mettre en évidence les gains que peut apporter le concept proposé. L'accent est mis sur le réglage par admission car cette méthode est très utilisée, en même temps elle semble fonctionner par le même principe que celle des conduites spirales.

Cette ressemblance permet de juger les caractéristiques du nouvel étage plus facilement, en plus de faire valoir ses gains d'énergie, comparativement aux pertes du réglage par admission présentées à la section (1.3).

Le but important de ce mémoire est de prouver, en l'absence d'essais expérimentaux, que l'étage avec conduite spirale est bien fonctionnel. Le fondement théorique du concept est présenté à la section (2.1).

Bien que l'étage avec conduite spirale puisse être utilisé pour les deux types de turbines thermiques, l'analyse dans cette étude se concentre sur le cas d'une turbine à vapeur seulement. Ce choix est causé par les facteurs suivants :

1. la possession de données mesurées sur une turbine à vapeur en exploitation.

Ce facteur est important parce qu'il permet d'utiliser des valeurs réelles dans le calcul et l'analyse. Les données sont de deux types :

- a) les données géométriques de la turbine et des tuyères d'alimentation en vapeur qui sont tirés directement du dessin de la machine.
- b) Les données thermodynamiques de la vapeur mesurées sur la turbine en exploitation, pour différents points d'opérations. Ces données donnent la valeur de la pression et la température à l'entrée de l'étage en plus de la chute de pression sur celui ci.

La disponibilité des données permet de solutionner l'écoulement pour des valeurs réelles et rend la comparaison entre le stator et la conduite spirale plus concrète. En plus elle donne les moyens de réduire le nombre d'inconnues qui se posent lors du calcul par la déduction de quelques coefficients des mesures données.

2. par l'analyse de l'écoulement à travers une turbine à vapeur il sera montré qu'une double conduite spirale peut servir pour le réglage de puissance. De ce fait, il sera possible de mettre en évidence une autre utilité du sujet traité.

La première étape de l'analyse s'appuie sur la construction d'un modèle unidimensionnel de l'écoulement à travers l'étage étudié. Le modèle 1D paraît primitif pour refléter l'écoulement dans une géométrie aussi complexe que celle de la spirale, mais il est nécessaire afin de trouver les dimensions appropriées de la conduite qui garantissent la fonctionnalité de l'étage. Cette condition est remplie lorsque

l'écoulement arrive sur les ailettes du rotor avec un angle α défini par rapport à la section d'entrée. Aussi l'écoulement devrait être uniforme sur tout le périmètre de la couronne d'aillettes.

De ce fait le modèle 1D est plus efficace parce qu'il permet d'effectuer plusieurs itérations de calcul dans un temps relativement court. Dans cette étape l'analyse est paramétrique, à cause du manque d'informations sur deux coefficients inconnus. Ces derniers représentent les pertes d'énergie et du moment de quantité du mouvement dans la conduite. Les valeurs utilisées durant le calcul varient dans des intervalles estimés physiquement possibles. De ce fait le modèle 1D permet de savoir quelle est la géométrie qui assure un écoulement donné avec une précision relative à celle des paramètres supposés.

La deuxième étape de l'analyse concerne le calcul sur la base d'un modèle tridimensionnel. L'écoulement dans une double spirale est calculé par la méthode des éléments finis. La géométrie modelée dans ce cas est celle optimisée par le modèle 1D. Les résultats obtenus permettent de mieux analyser le comportement du concept proposé, surtout par les réponses à plusieurs questions restées sans réponses après l'étude 1D, parmi elles : est-ce que les paramètres utilisés ont été bien estimés? est-ce que l'angle α cité dessus est uniforme sur toute la section de sortie de la spirale? etc....

L'étude exécutée durant ce projet a pour but d'introduire l'étage transformé et de montrer ses capacités. Elle peut être utilisée comme point de départ pour une éventuelle recherche afin de déterminer la variation des paramètres de l'écoulement en fonction de la géométrie des conduites spirales.

CHAPITRE 1

ROUE DIRECTRICE

Vu que le sujet traité dans ce mémoire concerne un possible remplacement de la roue directrice par un autre élément, il est utile de s'assurer que le changement proposé n'affecte pas fonctionnalité de l'étage et d'être conscient des conséquences d'un tel remplacement. Pour cela, dans ce chapitre, il sera sujet de la roue directrice, sa fonction dans l'étage et ses propriétés

1.1 Généralités

Un étage de turbine est défini comme l'espace physique occupé par la roue directrice et par la couronne d'ailettes. La roue directrice est le composant statique de l'étage et il contient un nombre défini d'aubes.

Le fluide qui traverse la roue directrice, entre les sections 0 et 1 (figures 1.1) transforme une partie de son énergie thermique en énergie cinétique, cela grâce aux profils des aubes conçus spécialement pour ce rôle.

Entre les sections 1 et 2, le fluide cède une partie de cette énergie cinétique, pour qu'elle soit transformée en travail par la rotation des ailettes.

Par définition la réaction de l'étage r est :

$$r = \frac{\text{chute d'enthalpie dans le rotor}}{\text{chute isentropique totale d'enthalpie dans l'étage}}$$

Dépendamment des valeurs thermodynamiques du fluide, le profil de l'aube et les caractéristiques géométriques de la roue de tête déterminent la réaction de l'étage.

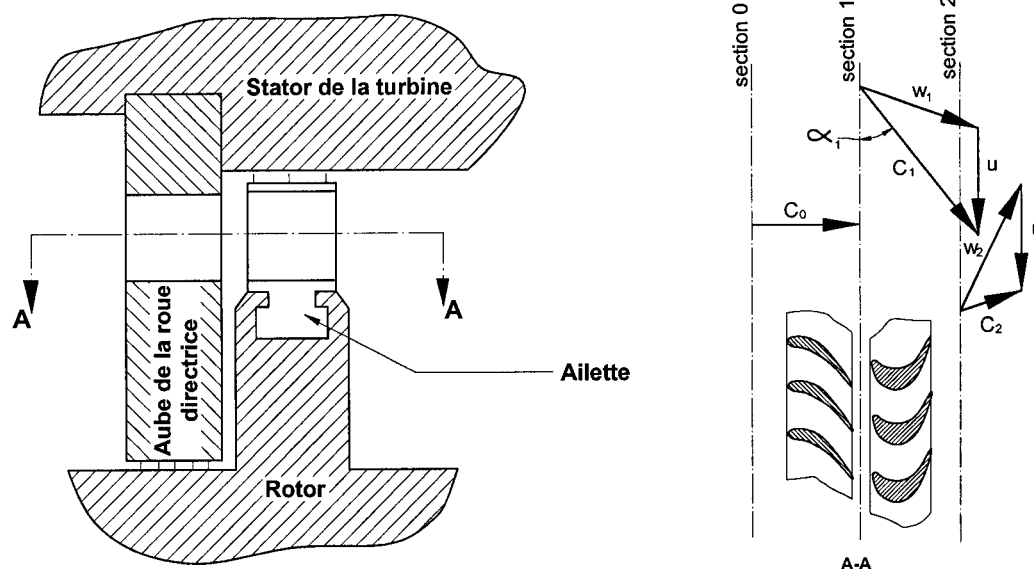


Figure 1.1 Étage de turbine

1.2 Fonction de la roue directrice dans l'étage

La fonction de la roue directrice est de transformer l'énergie thermique du fluide en énergie cinétique, cela par la déviation de l'écoulement d'un angle α par rapport à la section de sortie (figure 1.1). Cette propriété est garantie par le profil des aubes entassées sur tout le périmètre de la roue. Plus la réaction de l'étage est petite plus la chute de pression dans la roue directrice est grande, ce qui provoque une augmentation des contraintes mécaniques sur les aubes.

L'écoulement dans les canaux entre les aubes de la roue est relié à des pertes d'énergie, qui sont détaillées à la section (1.3) de ce document. Un des facteurs influents de ces pertes est la valeur de l'angle α , c'est la raison pour laquelle cet angle est optimisé. Plusieurs essais expérimentaux, effectués en industrie, montrent que sa valeur optimum dépend du rapport e/b .

Par exemple pour le premier étage où e/b est approximativement égale à 0,5, l'angle α doit varier dans l'intervalle de 14 degrés à 16 degrés, afin de garantir le minimum de pertes d'énergie. La valeur de l'angle α n'a pas seulement d'influence sur les pertes dans la roue directrice mais aussi dans la couronne d'ailettes. En fonction de cet angle, les vitesses et les pertes dans le rotor varient.

Une autre utilité de la roue directrice consiste à servir comme moyen de réglage de puissance, cette propriété ne concerne que la roue du premier étage de la turbine à vapeur. Elle est remplie de la façon suivante :

Les aubes du premier étage sont réunies en quelques groupes, d'habitude de 2 à 8 (figure 1.2). Chaque groupe est alimenté indépendamment des autres par une tuyère différente.

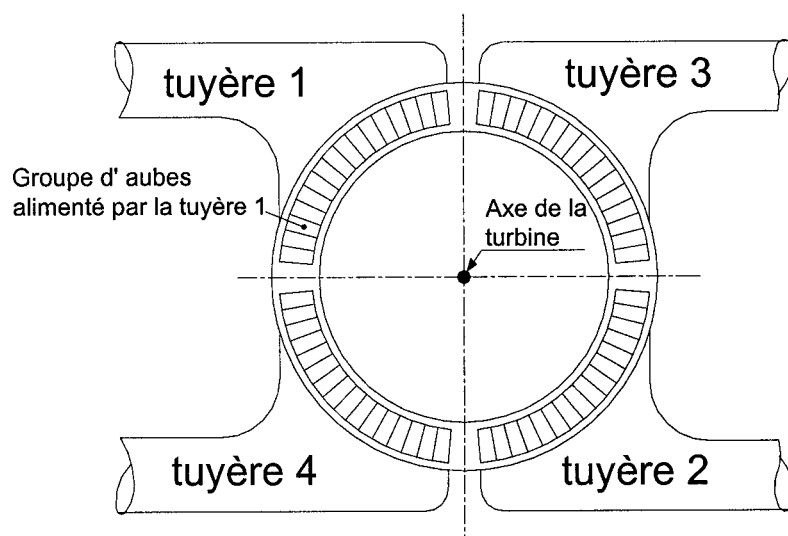


Figure 1.2 Roue de tête d'une turbine à vapeur

Cette configuration de l'étage permet de changer le débit de vapeur traversant la turbine par la fermeture de quelques tuyères et l'ouverture d'autres. De ce fait la puissance fournie par la turbine varie proportionnellement avec la variation du débit,

parce que ces deux quantités sont approximativement proportionnelles entre elles. La roue directrice qui remplit un tel rôle est appelée roue de tête.

En conclusion, la roue directrice possède trois fonctions :

1. changer l'énergie thermique du gaz en énergie cinétique, par la déviation de l'écoulement d'un angle α par rapport à la section de sortie.
2. garantir un angle α optimum pour minimiser les pertes d'écoulement dans l'étage et assurer les meilleures conditions de travail des ailettes
3. servir comme moyen de réglage de puissance (cette propriété ne concerne que la roue du premier étage des turbines à vapeur)

Dans le chapitre 2, il est montré qu'une conduite spirale remplit les deux premières fonctions tandis qu'un ensemble de deux conduites satisfait aux trois conditions.

1.3 Pertes d'énergie générées par la roue directrice

Des pertes d'énergie sont générées lors de l'écoulement à travers la roue directrice, elles sont le résultat des perturbations que les profils d'aubes représentent. Plusieurs bibliographies traitent ce sujet et les répartissent approximativement en plusieurs groupes, sachant que chaque classe de pertes est interactive avec les autres, elles sont classifiées comme suit :

1. Les pertes causées par les profils : ces pertes sont générées par la géométrie des profils, c'est à dire : la forme du canal entre deux aubes, angle à la sortie α , épaisseur du bord de fuite δ , et par les paramètres de l'écoulement tels que le nombre de Reynolds et de Mach ainsi que le degré de turbulence.

Ces pertes sont caractérisées par :

- a) une composante produite par la couche limite: le profil de l'aube génère une couche limite dans laquelle se trouve un important gradient

de vitesse. Le gradient cause du frottement entre les différents éléments du fluide, provoquant ainsi la dissipation de l'énergie cinétique.

Dans certains cas la couche limite se détache dans la zone où la dérivée de la pression change de signe figure 1.3. Ce phénomène est non souhaité parce qu'il agrandit la région occupée par cette couche limite et génère des tourbillons à l'arrière des aubes.

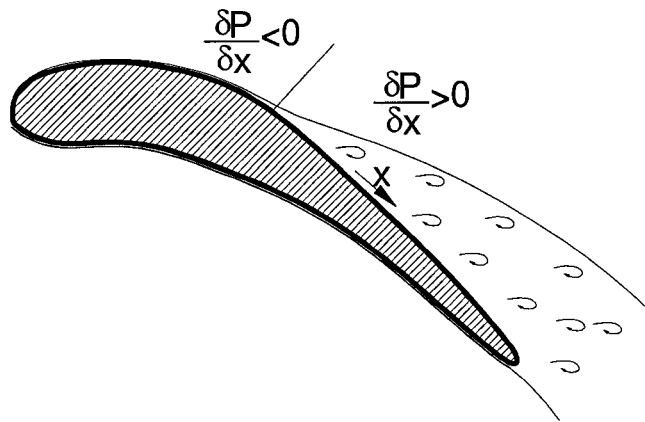


Figure 1.3 Détachement de la couche limite

- b) une composante générée par la rugosité des surfaces de l'aube : les irrégularités que rencontre l'écoulement sur les parois de l'aube entraîne des effets de frottement. Durant l'exploitation le fini des surfaces est détérioré à cause de l'interaction du fluide avec les matériaux et des objets étrangers qui s'infiltrèrent avec l'écoulement. Ce changement de rugosité vient encore augmenter les pertes.

L'industrie s'est beaucoup intéressée au sujet, puisque ça affecte directement la technologie de fabrication des aubes et la consommation du combustible (diminution du rendement en service).

Plusieurs études expérimentales se sont penchées sur le sujet pour trouver la relation entre l'augmentation des pertes et le changement de rugosité en exploitation. Les résultats se sont soldés par différentes formules empiriques.

Ce genre de pertes est beaucoup important dans le cas des turbines à gaz, où les aubes du premier étage travaillent dans des températures élevées jusqu'à 1300 °C.

c) une composante produite par le mélange des couches limites: à la sortie des aubes, les deux couches limites de l'extrados et l'intrados se mélangent. Vu que le bord de fuite possède une épaisseur finie, les deux couches se détachent, induisant ainsi des tourbillons à l'arrière des aubes et la vibration des ailettes.

Les pertes générées par les profils sont caractérisées par le paramètre ζ_{profil} , qui représente le pourcentage de l'énergie perdue durant l'écoulement à travers les aubes.

$$\zeta_{profil} = \theta_{Rey} \theta_{Mach} \zeta_{base} + \zeta_{\delta}$$

où ζ_{base} représente les pertes de base causées par la géométrie du profil.

Il est déterminé en supposant que le profile est idéalement poli et que son bord de fuite est infiniment fin.

θ_{Rey} coefficient correctif relativement au nombre de Reynolds et à la rugosité des surfaces

θ_{Mach} coefficient correctif relativement au nombre de Mach

ζ_{δ} représente les pertes causées par l'épaisseur du bord de fuite

Les valeurs de ζ_{base} , θ_{Rey} , θ_{Mach} et ζ_{δ} sont déterminées par les essais expérimentaux parce que les méthodes théoriques existantes sont incapables de les calculer avec une précision convenable

2. Les pertes aux frontières : se sont les pertes qui sont liées aux écoulements secondaires au pied et à la tête de l'aube. Elles sont inversement proportionnelles

à la hauteur $\frac{l}{b}$, parce que la largeur de la zone des écoulements secondaires est proportionnelle à la corde.

Ce genre de pertes est caractérisé par le paramètre ζ_f :

$$\zeta_f = \zeta_0 k \frac{b}{l}$$

ζ_0 est le coefficient des pertes unitaires (pour $\frac{l}{b} = 1$)

k est le coefficient correctif relatif au type de profil

Les coefficients de ζ_0 et k sont aussi déterminés par des essais expérimentaux.

1.4 Coût de fabrication et d'exploitation de la roue directrice

En général c'est la roue directrice du premier étage qui est sollicitée à des contraintes sévères de design. Les aubes de cette roue sont à risque de rupture et de défaillance. D'habitude l'étage en question est à action (la réaction de l'étage est petite). Ce fait provoque une grande chute de pression entre l'aval et l'amont de la roue, causant ainsi des contraintes mécaniques importantes sur les aubes. Ajoutant à cela les hautes températures que subissent les matériaux du premier étage. Ces températures sont de l'ordre de 1300 °C pour les turbines à gaz. Tout cela crée des contraintes thermomécaniques qui sont à l'origine de plusieurs pannes.

Les aubes du premier étage sont conçues pour résister à des conditions: de fatigue oligocyclique (fatigue plastique), de fatigue endurance, de fluage et de corrosion. Ces inconvénients sont beaucoup plus importants dans le cas de la turbine à gaz que celle à vapeur.

Les principales méthodes utilisées en industrie pour remédier aux problèmes de fiabilité des aubes sont :

- a) l'utilisation de matériaux résistants aux grandes températures comme les alliages du Nickel pour les aubes des turbines à gaz et les aciers inoxydables pour les turbines à vapeur.
- b) l'utilisation de systèmes de refroidissement pour les aubes. Cette technique est réalisée grâce à des canaux internes faits à l'intérieur de l'aube, pour permettre à l'air froid de circuler et de diminuer ainsi la température du matériau. Cette méthode a part d'être coûteuse pour la fabrication, elle cause la perte d'énergie de l'air employé pour le refroidissement
- c) l'utilisation de revêtements couvrant les surfaces de l'aube, dont la température de fusion est plus haute que celle des aubes.

La mission de ces revêtements est de constituer une barrière contre la corrosion et l'oxydation.

Le coût de fabrication de la roue de tête est relié avec celui des aubes. Vu que l'industrie cherche toujours à augmenter la température du fluide à l'entrée du premier étage pour améliorer le rendement de la turbine, elle est toujours en recherche et en développement de nouvelles technologies qui le permettent. Les principales voies de recherche consistent à améliorer les méthodes du moulage par le contrôle de la croissance des grains, à chercher de meilleures compositions chimiques des matériaux et à développer de nouvelles technologies de revêtement.

1.5 Vibrations causées par la roue directrice

Les traces produites par les profils des aubes induisent un champ de vitesse non uniforme dans la zone des ailettes. Ces dernières qui tournent dans ce champ subissent à cet effet des forces variables. L'ailette est affectée par ces perturbations autant de fois que le nombre d'aubes durant un tour complet du rotor (figure 1.4)

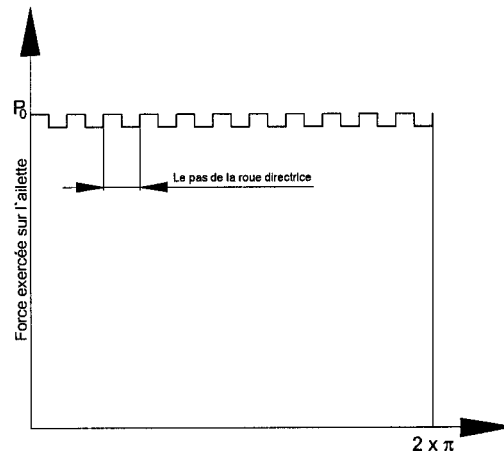


Figure 1.4 Changement de la force exercée sur l'ailette durant un tour du rotor

La force que subie l'ailette peut être calculée par :

$$P_i = \overline{P}_i \sin(\omega_i t)$$

où les amplitudes $\overline{P}_i$ des fréquences harmoniques se calculent par, $\overline{P}_i = c_i P_0$

c_i étant les coefficients des fréquences harmoniques

et $\omega_i = i z_s \omega_r$, $i=1,2,3,\dots$

z_s est le nombre d'aubes dans la roue directrice

ω_r est la vitesse de rotation du rotor

Ces vibrations forcées sont à haute fréquence causant ainsi le bruit et la fatigue des matériaux.

En plus de ça il existe un risque de résonance au moment où la fréquence forcée serait proche d'une des fréquences propres de l'ailette. Le risque est plus grand pour les turbines qui travaillent avec des vitesses variables du rotor. Dans ce cas l'ailette subie des contraintes dynamiques plus importantes.

$$\sigma_{dyn} = \sigma_{stat} c_i A_j$$

σ_{stat} : contrainte statique de flexion causée par l'écoulement

c_i : coefficient de la i-ème fréquence harmonique

A_j : amplitude de résonance du j-ème degré de fréquence propre

1.6 Réglage des turbines à vapeur

Un des avantages provenant de l'utilisation de l'étage, avec deux conduites spirales, serait la possibilité de régler la puissance de la turbine. Cette propriété est présentée au chapitre 2.

Dans ce chapitre, sont exposées les méthodes actuelles utilisées dans l'industrie pour le réglage. Le besoin de régler la puissance d'une turbine est imposé par le fait qu'elle est soumise à différentes charges durant son exploitation, ce requis oblige le concepteur à prévoir un moyen de changement de puissance. La façon la plus utilisée pour le réglage des turbines à vapeur consiste à changer le débit de vapeur qui est approximativement proportionnel à la puissance, en l'ajustant en fonction de la charge.

Dans l'industrie on y retrouve plusieurs façons de réglage, dépendamment de la puissance de la turbomachine ainsi que son utilisation et le type de générateur de vapeur. Ces méthodes sont décrites d'une façon générale par ce qui suit :

1.6.1 Réglage par laminage

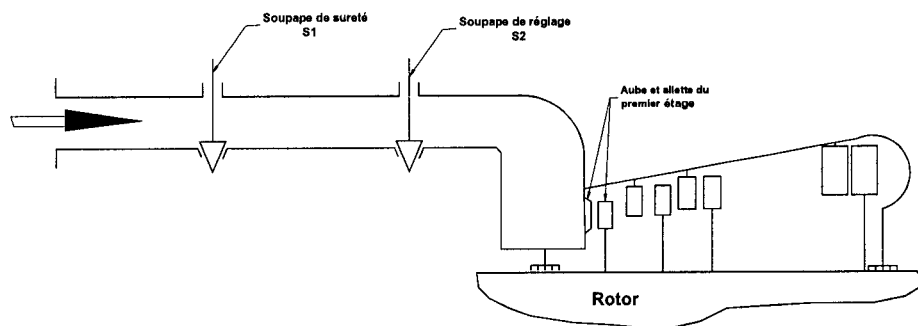


Figure 1.5 Réglage par laminage

C'est la plus simple façon de régler les turbines à vapeur, elle est réalisée par l'étranglement du débit total de vapeur. Après la soupape de sûreté S1 (figure 1.5) qui est toujours ouverte dans les conditions normales de travail, se trouve la soupape de réglage S2. Cette dernière est conçue d'une façon à garantir un débit de vapeur donné pour une charge donnée. Lorsque la soupape S2 est actionnée dans le sens pour la fermer, la pression en aval d'elle diminue et abaisse le débit ainsi que la puissance.

Cette méthode de réglage possède un usage limité parce qu'elle provoque des pertes d'énergie lors du laminage, qui sont représentées par le déplacement à droite sur l'axe de l'entropie de la figure 1.6. Sur cette figure sont illustrés deux transformations thermiques, Celle à gauche décrit l'écoulement sans laminage tandis que l'autre celui avec laminage. Ce genre de réglage est utilisé surtout dans les turbines qui fonctionnent au point de design ou bien dans son voisinage, afin de limiter les pertes.

D'autre part le réglage par laminage possède de bonnes propriétés de manœuvre, c'est à dire la turbine peut être vite chargée ou déchargée. Cette caractéristique est possible parce que le laminage n'affecte pas les températures dans les différents

étages (figure 1.6). En conséquence il n'y a pas de risque d'allongement causé par les contraintes thermiques

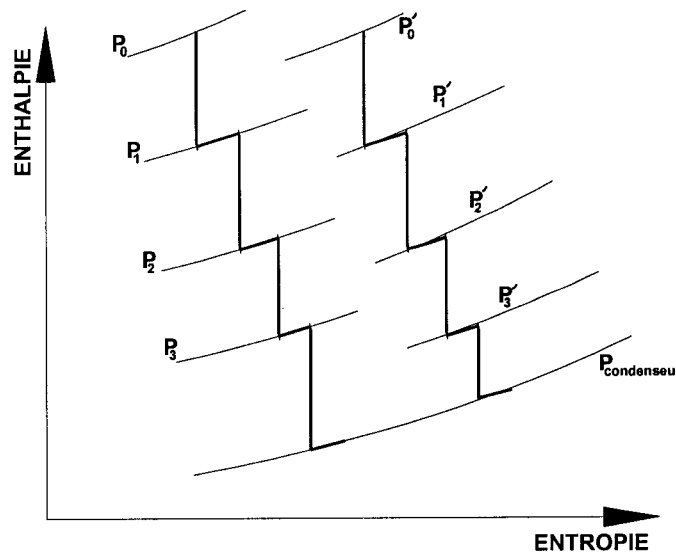


Figure 1.6 Transformation thermique lors du laminage

1.6.2 Réglage par remplissage

Le réglage par remplissage est très souvent utilisé en industrie d'électricité lorsqu'il s'agit d'une turbine qui fonctionne avec des charges variables. Le concept proposé dans ce mémoire possède une façon de réglage semblable à celle par remplissage. C'est la raison pour laquelle cette dernière est présentée, dans ce document, avec plus de détails que les autres méthodes.

Le réglage par remplissage est utilisé sur les turbines dotées d'une roue de tête, qui en plus d'être directrice, elle possède des aubes réparties en groupe A1, A2, A3.... etc. (figure 2.7), chaque groupe est alimenté par une tuyère indépendante des autres. Dépendamment du besoin en puissance, un nombre défini d'aubes est alimenté tandis que les autres sont fermées à l'écoulement. Cette action est effectuée

par l'intermédiaire des soupapes S1, S2, S3...etc., qui diminuent le débit et par conséquent la puissance la turbine est réduite.

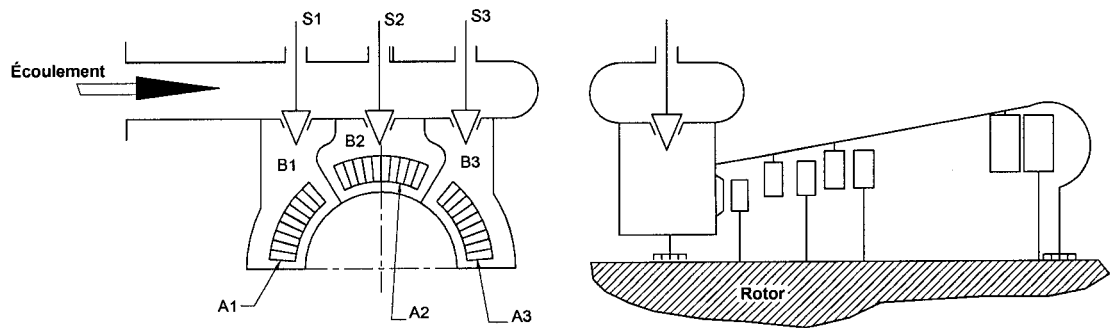


Figure 1.7 Régulation par remplissage

La roue de tête fonctionne comme un groupe d'étages placés en parallèle et qui sont alimentés séparément l'un de l'autre.

Les inconvénients de cette méthode sont :

a) les pertes d'énergie:

Lorsque le réglage par remplissage est requis, les soupapes de quelques tuyères sont fermées, provoquant ainsi l'écoulement de la vapeur par une partie seulement de la roue. Cet état de fonctionnement produit des instabilités.

Pour illustrer les phénomènes produits par telles conditions, une section de la roue de tête est étalée sur le plan comme sur la figure 1.8.

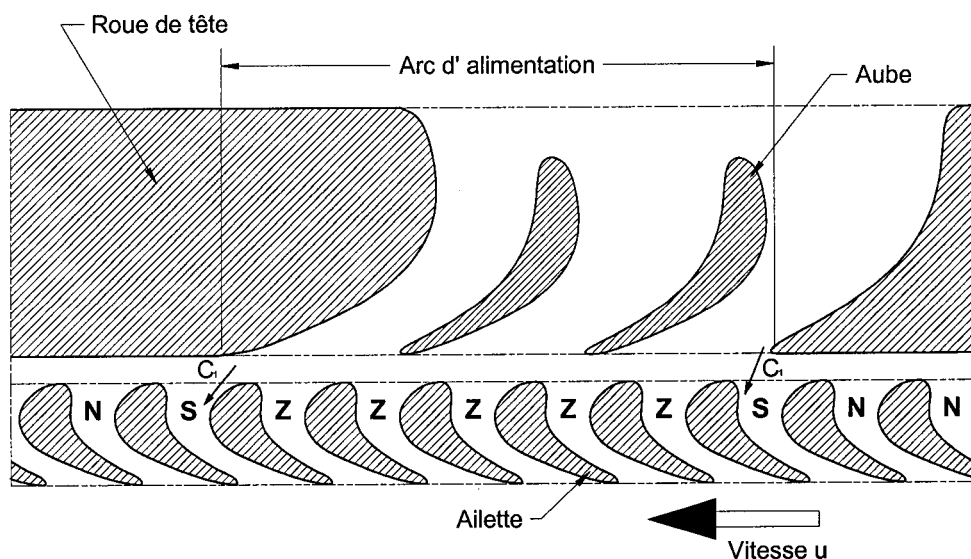


Figure 1.8 Pertes dues au réglage par remplissage

La vapeur est admise sur un segment égal à l'arc d'alimentation, les ailettes tournent autour de l'axe du rotor avec une vitesse u dans le sens noté sur la figure 2.8. Au début, le canal noté par la lettre N se trouve dans la zone non alimentée, par la suite il va s'entraîner petit à petit dans la zone alimentée. À un certain moment celui-ci va se trouver dans la position du canal représenté par la lettre S, à ce moment le canal n'est pas alimenté en totalité ce qui cause l'écoulement seulement sur sa partie concave. Cet état dure jusqu'à ce que tout le canal soit en face de l'écoulement comme le canal noté par la lettre Z, ensuite celui-ci poursuit sa rotation pour arriver enfin dans la sortie de la zone alimentée. À cet instant il se trouve dans la même situation que le début, c'est-à-dire l'écoulement se fait juste sur la partie concave du canal. Les deux situations d'entrée et de sortie de la zone d'écoulement provoquent un état non stationnaire, produit par un écoulement libre dans un espace non limité. De telles conditions augmentent les pertes d'énergie dans la roue de tête.

D'un autre côté, à l'entrée de l'arc d'alimentation le canal entre deux ailettes est rempli de vapeur absorbée dans la zone non alimentée. Cette quantité est poussée par celle qui traverse l'étage, entraînant ainsi la perte d'énergie cinétique.

Aussi le dernier canal sortant va voir la quantité de vapeur qu'il a tirée de la partie alimentée, s'écouler vers l'aval de l'étage, travaillant ainsi comme un piston qui prélève de l'énergie.

Un autre genre de pertes est remarqué lors du réglage par remplissage, il se produit de la façon suivante : les canaux d'ailettes qui se trouvent dans la zone non alimentée larguent la vapeur dans le sens radial, en même temps ils aspirent de la partie alimentée. De cette façon un mouvement de rotation se produit, causant ainsi du frottement entre les ailettes et la vapeur. Ce frottement consomme une partie de la puissance du rotor.

Ajoutant à ces pertes celles des fuites de vapeur par la fente, qui sépare la roue de tête et la couronne d'ailettes.

b) Les Problèmes d'exploitation :

Un des problèmes que cause le réglage par remplissage est celui des vibrations des ailettes. L'ailette subit un changement brusque des forces de la vapeur, d'une valeur minimale jusqu'à la valeur maximale, cela est dû à son passage d'une zone non alimentée vers une zone alimentée, en plus de ça elle rencontre des vides dans la région entre deux groupes de tuyères (figure 1.9).

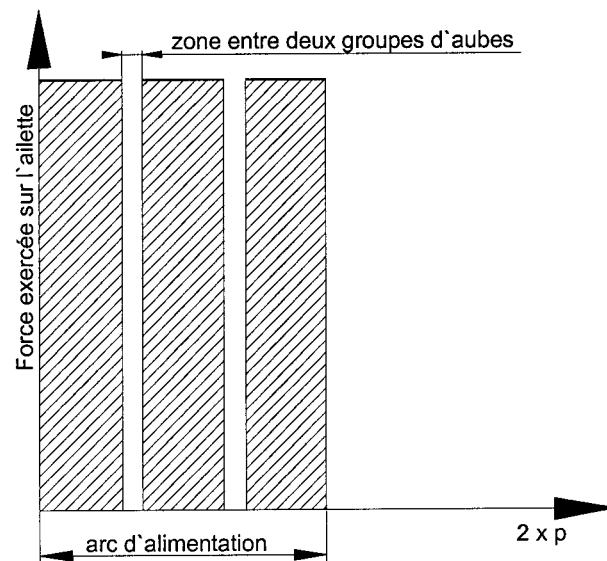


Figure 1.9 Vibrations forcées lors du réglage par remplissage

Ces états se répètent à chaque tour du rotor, provoquant de ce fait des vibrations forcées par les charges :

$$F = \overline{F_i} \sin(\omega_i t)$$

où ω_i est la fréquence forcée.

À cause du risque de résonance les vibrations sont dangereuses pour les ailettes, qui possèdent plusieurs fréquences propres. C'est la raison pour laquelle les ailettes du premier étage sont construites habituellement avec grande rigidité. Les vibrations sont transmises aux autres composantes de la turbine comme la couronne des ailettes, le rotor et les paliers, provoquant ainsi la fatigue de ces derniers à cause de contraintes dynamiques.

1.6.3 Réglage by-pass

La méthode du réglage by-pass est rarement employée dans l'industrie, elle est utilisée dans le cas du fonctionnement en surcharge. Elle se base sur la possibilité d'alimenter un étage, autre que le premier, par la vapeur ``fraîche``, c'est à dire la vapeur qui vient directement des tuyères d'alimentation. Cette configuration permet d'augmenter le débit parce que la pression après la soupape S2 est plus petite que celle après la soupape S1 (figure 1.10) augmentant ainsi la puissance de la turbine.

En général le réglage by-pass est jumelé avec une autre méthode comme celle par laminage ou par remplissage

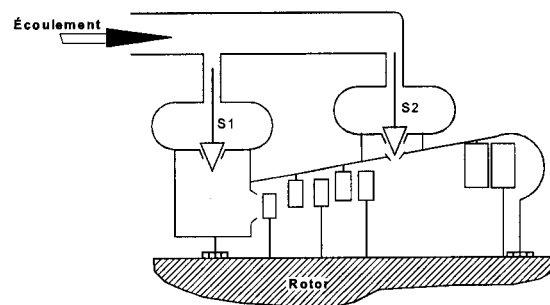


Figure 1.10 Réglage by-pass

1.6.4 Réglage par glissement

Le réglage par glissement est possible lorsqu'un seul générateur de vapeur alimente une seule turbine. Dans le cas des réglages par laminage, par remplissage ou by-pass la pression après le générateur de vapeur est constante, mais celle à l'entrée de la turbine est changée grâce à des soupapes.

Dans le cas du réglage par glissement, la pression est ajustée en fonction de la charge. Le régulateur de pression mesure la puissance et règle le débit du combustible, afin d'assurer une pression constante après le générateur. En même temps le régulateur de température assure une température constante de la vapeur pour éviter toutes contraintes thermiques additionnelles (figure 1.11).

Un des avantages thermodynamiques de cette méthode c'est qu'elle permet de changer le travail des pompes en fonction de la charge. De ce fait elle permet de réduire la puissance requise par ces pompes, lors du pompage de l'eau vers le générateur de vapeur. Le profit est plus grand quand la pression de la vapeur produite par le générateur dépasse les 15 MPa.

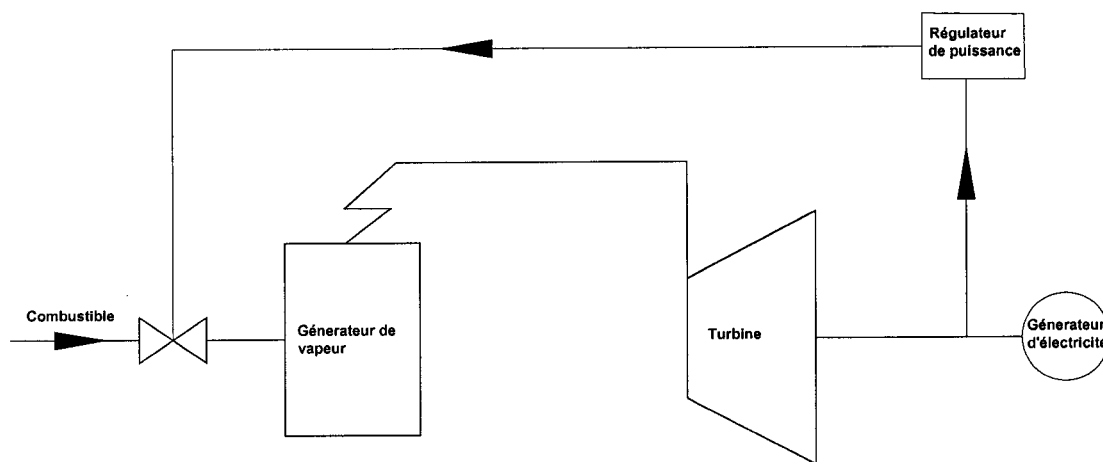


Figure 1.11 Réglage par glissement

1.6.5 Réglage par évacuation

Le réglage par évacuation est utilisé dans les blocks nucléaires, dans ce cas il est nécessaire d'assurer un réglage avec pression constante.

Le régulateur de pression R_p provoque l'évacuation de la quantité excédante de vapeur, pour garantir toujours des pressions et des températures constantes dans le réacteur

et dans le générateur de vapeur (figure 1.12). Cette méthode possède une efficacité thermodynamique très basse, à cause de la perte d'énergie de la quantité de vapeur évacuée.

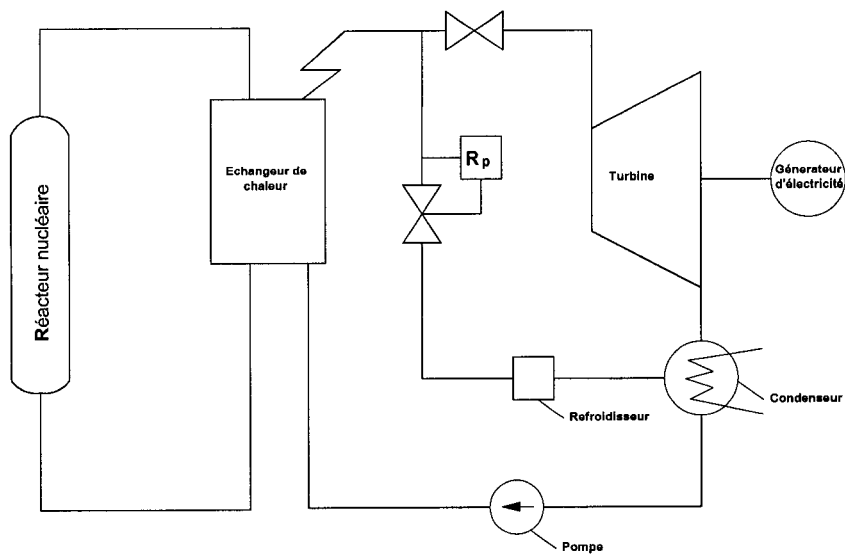


Figure 1.12 Réglage par évacuation

CHAPITRE 2

CONDUITE SPIRALE

Dans le présent chapitre il est montré pourquoi la conduite spirale peut remplacer la roue directrice et pourquoi elle peut être utilisée pour le réglage des turbines à vapeur.

2.1 Fondements du concept

Dans la section 1.2 de ce mémoire sont citées les trois fonctions de la roue directrice. Si la conduite spirale remplit en totalité ces fonctions, cela revient à dire qu'elle peut remplacer la roue directrice sans affecter le rôle de l'étage. Dans ce qui suit les trois fonctions sont vérifiées une par une, pour le compte de la conduite spirale :

a) la conduite spirale doit transformer l'énergie thermique du gaz en énergie cinétique par la déviation de la trajectoire de l'écoulement. Le résultat de la déviation est un angle α que forme la vitesse absolue du fluide avec la section de sortie de la conduite.

Cette propriété est garantie par la loi de conservation du moment de quantité de mouvement.

Dans ce qui suit les suppositions suivantes sont considérés :

- L'écoulement à travers la conduite spirale est permanent
- L'écoulement rentre par la section S_1 et sort par la section S_2 comme sur la figure 2.1. Sur cette dernière il est présenté juste une moitié de la conduite.
- Les forces massiques du fluide traversant la conduite sont négligeables.

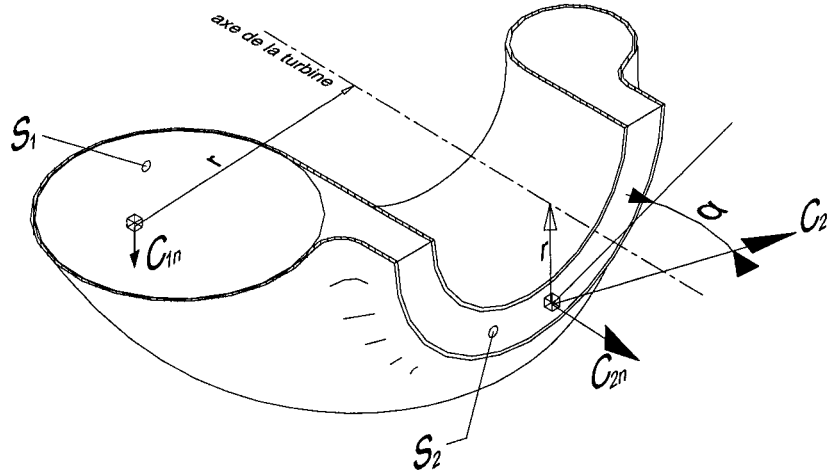


Figure 2.1 Conduite spirale

L'équation de conservation du moment de quantité de mouvement écrite par rapport à l'axe de la turbine est de la forme :

$$\begin{aligned} \int_{S_1} \vec{r} \times \rho \vec{C} C_n ds - \int_{S_2} \vec{r} \times \rho \vec{C} C_n ds &= \int_V \vec{r} \times \rho \vec{f} dV + \int_{S_1} \vec{r} \times \vec{P}_n ds + \\ &+ \int_{S_2} \vec{r} \times \vec{P}_n ds + \int_{S_{SPIRALE}} \vec{r} \times \vec{P}_n ds \end{aligned} \quad (2.1)$$

Si les forces massiques sont négligeables (d'après les suppositions) :

$$\int_V \vec{r} \times \rho \vec{f} dV = 0$$

et le vecteur $\vec{H}$ est défini par :

$$\vec{H} = \int_{S_1} \vec{r} \times \vec{P}_n ds + \int_{S_2} \vec{r} \times \vec{P}_n ds + \int_{S_{SPIRALE}} \vec{r} \times \vec{P}_n ds \quad (2.2)$$

Alors l'équation de conservation du moment de quantité de mouvement devient :

$$\int_{S_2} \vec{r} \times \rho \vec{C} C_n ds = \int_{S_1} \vec{r} \times \rho \vec{C} C_n ds - \vec{H} \quad (2.3)$$

Le vecteur $\vec{H}$ est le moment induit par les forces suivantes :

- 1) les forces tangentes (de frottement) et les forces normales aux parois de la conduite. La part des forces tangentes dans ce moment doit être la plus grande, parce que le bras du levier de celles-ci est plus grand.
- 2) les contraintes normales et tangentiellles aux surfaces d'entrée S_1 et de sortie S_2 .

Ce moment, d'après l'équation (2.2) peut prendre plusieurs valeurs dépendamment du tenseur $\vec{P}_n$ sur les parois, à l'entrée et à la sortie de la conduite spirale. Cela revient à dire qu'il est fonction de la géométrie de la conduite et des paramètres à l'entrée.

Soit une géométrie de la conduite qui garantie que :

$$\vec{H} \neq \int_{S_1} \vec{r} \times \rho \vec{C} C_n ds \quad (2.4)$$

Dans ce cas :

$$\int_{S_2} \vec{r} \times \rho \vec{C} C_n ds \neq \vec{0} \quad (2.5)$$

l'équation (2.5) implique deux conclusions :

- La vitesse de l'écoulement $\vec{C}$ n'est perpendiculaire à la section de sortie S_2 , sinon sa direction serait parallèle à celle de l'axe de la turbine, ce qui signifierait que le moment de quantité de mouvement par rapport à cet axe est nul.
- La vitesse de l'écoulement $\vec{C}$ n'est pas tangente à la section S_2 , sinon $\vec{C} C_n = \vec{0}$ et le moment de quantité de mouvement, par rapport à l'axe de la turbine, serait nul.

En conclusion : l'écoulement à la sortie de la conduite spirale possède une vitesse ni perpendiculaire ni tangente à la section S_2 . Cela signifie que cette conduite génère un angle α comme le fait le stator de la turbine.

b) La conduite spirale doit garantir un angle optimum afin de minimiser les pertes d'écoulement dans l'étage et assurer les meilleures conditions de travail des ailettes.

L'équation (2.3) peut être écrite comme suit :

$$\int_{S_2} \vec{r} \times \rho \|\vec{C}\| \cdot C_n \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) ds = \int_{S_1} \vec{r} \times \rho \vec{C} C_n ds - \vec{H} \quad (2.6)$$

ce qui signifie que l'angle α est fonction de plusieurs variables qui sont :

1. La géométrie de la spirale : elle affecte les paramètres du fluide dans les différentes sections en dépend de ceux à l'entrée, elle définit aussi l'écoulement à travers la conduite.

La géométrie de la spirale est représentée par :

- a) la section à l'entrée S_0
 - b) la section de sortie S_1
 - c) la distance entre le centre de la section S_0 et l'axe de la turbine
 - d) le rayon moyen de la section S_2
 - e) la variation des sections transversales en fonction de la coordonnée reliée avec l'axe de la conduite
2. les paramètres thermodynamiques à l'entrée : l'équation (2.6) montre que l'angle α est dépendant des paramètres thermodynamiques sur la section S_1 .

Il est évident que si la vitesse est plus grande à l'entrée de la conduite, le moment de quantité de mouvement induit à la section S_1 est plus grand, ce qui provoque la diminution de l'angle α .

Tout cela montre que l'angle α , pour des paramètres à l'entrée donnés, est défini par le choix de la géométrie. De cette façon la conduite spirale peut être conçue pour un angle α optimum qui garantit le moins de pertes et les meilleures conditions de travail de l'étage.

2.2 Conduite spirale pour le réglage des turbines à vapeur

Sur le même principe que le réglage par admission, l'étage avec la conduite spirale peut être conçu pour permettre le changement de débit.

Soit le premier étage de la turbine comme sur la figure 2.2

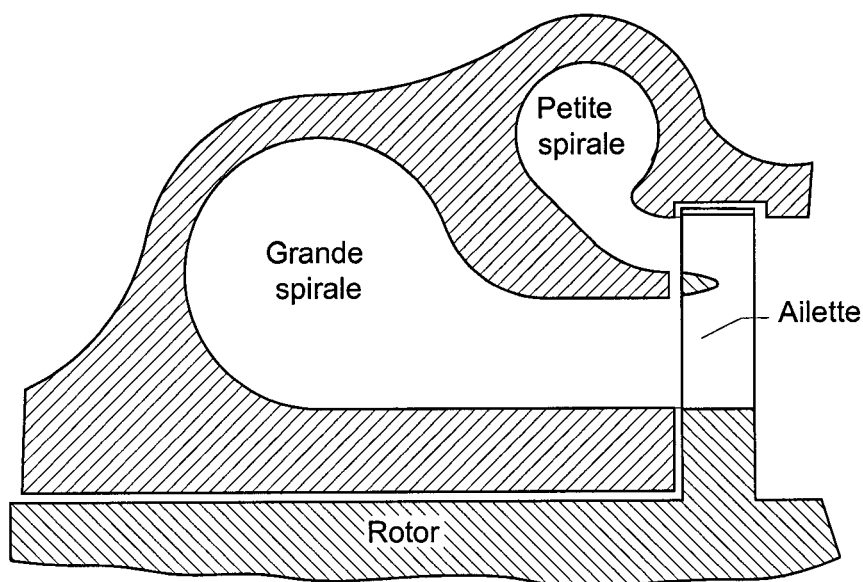


Figure 2.2 Deux conduites spirales pour le réglage de turbine

Cet étage se compose de deux conduites spirales dont la section de sortie de l'une est plus grande que celle de l'autre. Chaque conduite est alimentée en vapeur par une tuyère indépendante. Cette configuration de l'étage permet de régler la puissance de la turbine pour trois niveaux de charges :

- a) la petite spirale est alimentée tandis que la grande est fermée à l'écoulement, cette alimentation fournirait la plus basse puissance

- b) la grande spirale est alimentée tandis que la petite est fermée à l'écoulement, cette alimentation fournirait la puissance moyenne
- c) les deux spirales sont alimentées, cette alimentation fournirait la plus haute puissance

En plus de pouvoir fonctionner comme le stator de turbine, un ensemble de deux conduites spirales permettent d'améliorer le travail de l'étage par :

- a) élimination des pertes générées par les aubes. Ces pertes sont décrites à la section (1.3).
- b) garantie l'alimentation en vapeur sur tout le périmètre de la couronne d'ailettes, ce qui n'est pas le cas pour la roue de tête. Cet avantage permet d'éliminer les pertes du réglage par admission et de supprimer les vibrations forcées sur les ailettes décrites au point 1.6.2.

CHAPITRE 3

CALCUL UNIDIMENSIONNEL

3.1 *Modèle*

Ce modèle permet de calculer les paramètres thermodynamiques aux différentes sections de contrôle de l'étage. Ce dernier est considéré être composé d'une conduite spirale à la place de la roue directrice. L'écoulement est supposé unidimensionnel et permanent dont la transformation thermique est adiabatique.

Le modèle unidimensionnel est largement utilisé pour déterminer les paramètres moyens du fluide, dont l'écoulement se fait à travers un étage avec roue directrice. La précision des résultats est fonction des coefficients de pertes d'énergie employés.

La méthodologie poursuivie dans le cas de l'étage avec conduite spirale reste la même, les pertes de l'écoulement à travers la conduite sont représentées par des coefficients. Etant donné qu'aucune information n'est disponible sur l'écoulement à travers l'étage avec conduite spirale, les coefficients de pertes sont variés dans des intervalles jugés suffisamment grands pour englober toutes les valeurs possibles physiquement. Les résultats obtenus refléteront de ce fait toutes les solutions possibles et donneront une image générale sur l'écoulement à travers l'étage étudié.

Par exemple la variation des coefficients de pertes est prise entre une valeur minimum et une valeur maximum afin de trouver les valeurs extrêmes que peut prendre l'angle de sortie de la conduite spirale.

Ces valeurs minimum et maximum des coefficients sont estimées grâce aux résultats obtenus des travaux [1] et [2].

Par conséquent l'analyse devient paramétrique en employant deux coefficients α_{spirale} et S_{spirale} .

α_{spirale} : représente les pertes totales d'énergie dans la conduite spirale.

K_{spirale} : représente la perte du moment de quantité de mouvement.

où

$$K_{\text{spirale}} = \frac{\|\vec{H}\|}{\left\| \int_{S_i} \vec{r} \times \rho \vec{C}_n ds \right\|} \quad (3.1)$$

La signification des termes de l'équation (3.1) est donnée à la section (2.1) de ce mémoire

Le présent modèle se compose de quatre éléments qui sont :

- a) le convergent
- b) la conduite spirale
- c) la zone de mélange
- d) le rotor.

Ce modèle est représenté graphiquement sur la figure 3.1.

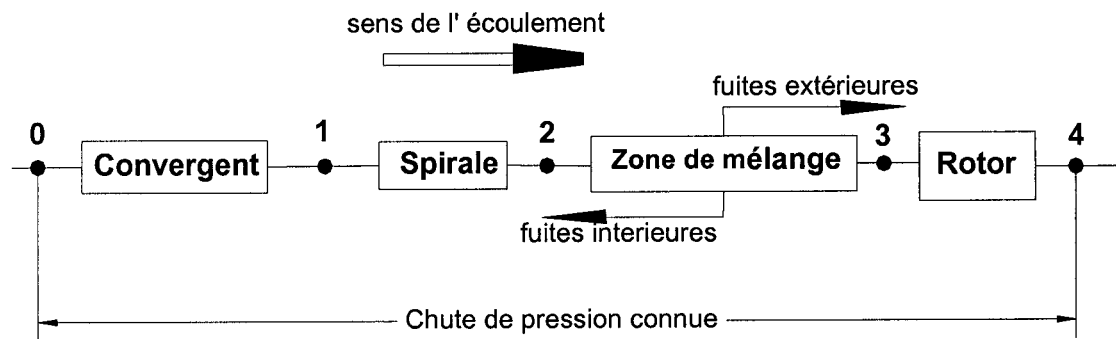


Figure 3.1 Modèle de calcul

Le convergent est introduit dans l'ensemble afin de pouvoir varier le moment de quantité de mouvement généré à l'entrée de la conduite spirale. Cela se fait par l'accélération ou la décélération de l'écoulement. Cette possibilité permet de varier l'angle α de sortie de la conduite, afin d'obtenir la valeur optimum qui garantie l'efficacité maximum de l'étage. Par conséquent la géométrie du convergent est choisie en fonction de l'angle α voulu.

La conduite spirale est l'élément qui remplace la roue directrice de l'étage, la chute d'enthalpie statique dans ce composant sert à augmenter l'énergie cinétique de la vapeur. Cet élément sert à générer l'angle de sortie vers les ailettes du rotor. Sa géométrie est conçue d'une façon à :

- a) répondre aux exigences dimensionnelles de la couronne d'ailettes et des tuyères d'alimentation en vapeur.
- b) varier ses dimensions simultanément avec celles du convergent afin de garantir un angle de sortie α optimum.

La zone de mélange est définie dans ce modèle pour tenir compte des pertes d'énergie, qui sont causées par le mélange des débits des deux conduites différentes. C'est le cas où l'étage est alimenté par deux tuyères spirales (figure 3.2).

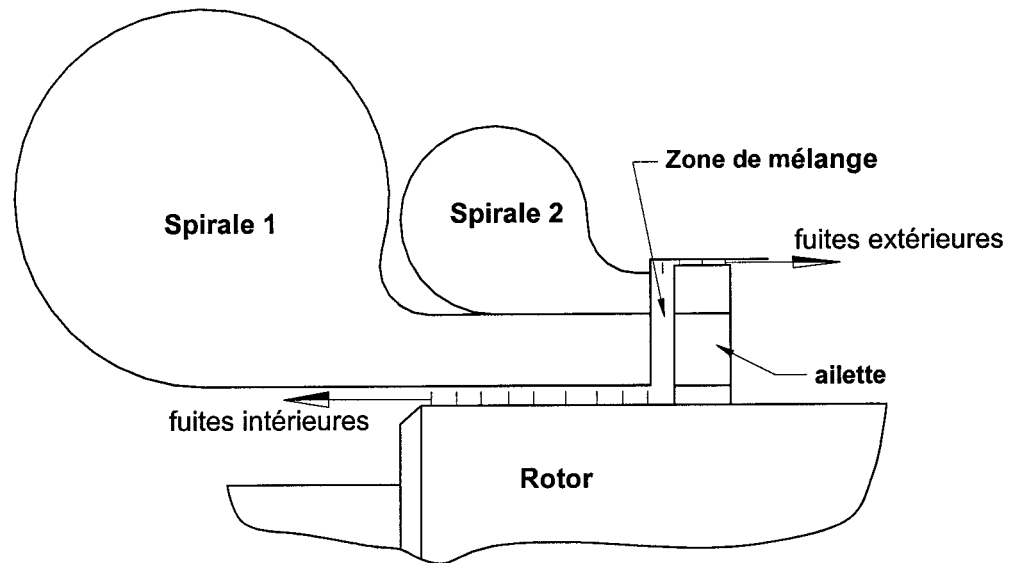


Figure 3.2 Étage avec conduites spirales

À part cela dans cette région, le fluide est entraîné par le rotor. Par conséquent le moment de quantité de mouvement est augmenté par le mouvement de rotation. Cette augmentation affecte l'angle d'entrée sur les ailettes. C'est la raison pour laquelle cette zone est distinguée dans le modèle en lui attribuant deux paramètres: le coefficient de pertes d'énergie $\alpha_{\text{mélange}}$ et le coefficient d'augmentation du moment de quantité de mouvement $K_{\text{mélange}}$. Aussi c'est dans cette région que le débit massique est diminué par les pertes des fuites intérieures et extérieures (figure 3.2).

Le rotor est l'élément qui sert à enlever une partie de l'enthalpie de l'écoulement pour la transformer en travail de rotation. Cette transformation est réalisée par la géométrie de la couronne d'ailette, qui est déterminée par :

- a) le profil des ailettes
- b) les dimensions de la couronne d'ailettes

La transformation thermique subie par l'écoulement à travers ce modèle est représentée sur le graphe enthalpie entropie (figure 3.3)

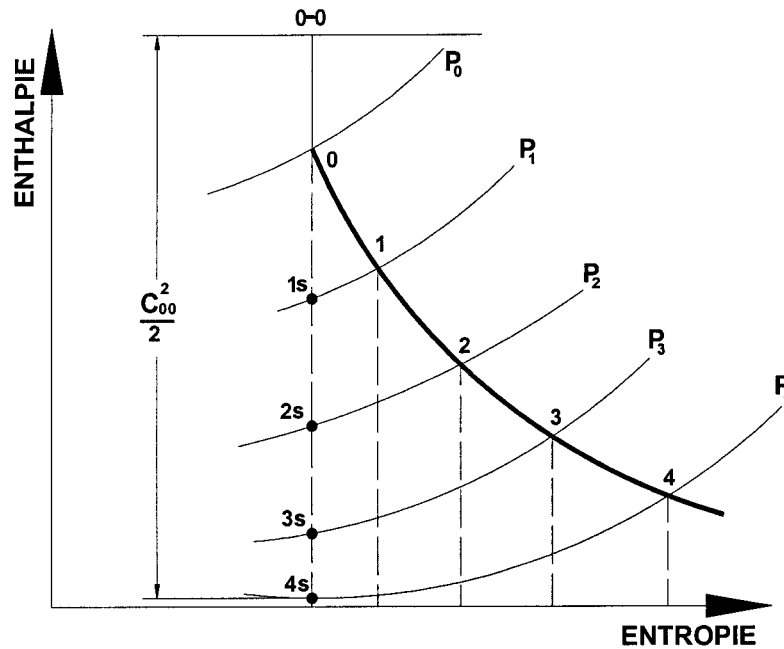


Figure 3.3 Transformation thermique du fluide

Les états de la vapeur représentés par 0, 1, 2, 3 et 4 sur ce graphique correspondent à ceux des sections de contrôle numérotés par ces mêmes chiffres sur la figure (3.1).

Une correction dans la deuxième dimension est apportée à ce modèle 1D, afin de tenir compte de la variation des paramètres thermodynamiques suivant la coordonnée radiale. Cette correction est basée sur les travaux [3], dans lesquelles les réactions interne et externe de l'étage sont définies par :

$$r_{ext} = r + \delta r_{spi} - \delta r_{rot} \quad (3.2)$$

$$r_{int} = r - \delta r_{spi} + \delta r_{rot} \quad (3.3)$$

Où :

r : est la réaction sur la demi hauteur de l'ailette

r_{ext} : est la réaction externe de l'étage (à la tête de l'ailette)

r_{int} : est la réaction interne de l'étage (au pied de l'ailette)

δr_{spi} : est la correction relative à l'effet de la conduite spirale sur la variation de la vitesse absolue suivant la coordonnée radiale

δr_{rot} : est la correction relative à l'effet du rotor sur la variation de la vitesse relative suivant la coordonnée radiale

La variation de la réaction de l'étage affecte tous les paramètres thermodynamiques.

3.2 Algorithme

Le but de l'algorithme est l'élaboration d'un programme de calcul. La tâche de ce dernier est : déterminer les paramètres de l'écoulement dans un étage avec conduite spirale.

L'algorithme s'appuie sur le modèle présenté à la section 3.1.

Les données sont :

- a) les données thermodynamiques à l'entrée de l'étage
- b) la pression à la sortie de l'étage
- c) les données géométriques de chacune des composantes du modèle
- d) les coefficients de pertes d'énergie dans chacune des composantes du modèle
- e) les coefficients de pertes du moment de quantité de mouvement dans la conduite spirale et dans la zone de mélange

Les valeurs calculées sont :

- a) tous les paramètres thermodynamiques du fluide dans chacune des sections de contrôle : 0, 1, 2, 3 et 4 (figure 3.1)
- b) l'efficacité de l'étage.

Dans tout ce qui suit, une grandeur avec un indice représente la valeur de cette grandeur, à l'état indiqué par cet indice sur la figure (3.3).

Le bilan d'enthalpie de l'écoulement à travers le convergent donne :

$$H_{00} = H_{1S} + \frac{1}{2} C_{1S}^2 \quad (3.4)$$

Si le coefficient de chaleur spécifique à pression constante C_p est considéré constant, durant l'écoulement à travers le convergent, l'équation (3.4) peut s'écrire comme suit :

$$C_p T_{00} = C_p T_{1S} + r_{con} \frac{C_{00}^2}{2} \quad (3.5)$$

r_{con} : est définie comme la réaction du convergent par :

$$r_{con} = 2 \frac{H_{00} - H_{1S}}{C_{00}^2} \quad (3.6)$$

L'équation (3.5) se transforme en:

$$\begin{aligned} \frac{\chi}{\chi-1} \frac{P_{00}}{\rho_{00}} &= \frac{\chi}{\chi-1} \frac{P_1}{\rho_{1S}} + r_{con} \frac{C_{00}^2}{2} \\ \frac{\chi}{\chi-1} \frac{P_{00}}{\rho_{00}} \left(1 - \frac{P_1 \rho_{00}}{\rho_{1S} P_{00}} \right) &= r_{con} \frac{C_{00}^2}{2} \\ \frac{P_1 \rho_{00}}{\rho_{1S} P_{00}} &= 1 - \frac{\chi-1}{\chi} r_{con} \frac{C_{00}^2}{2} \frac{\rho_{00}}{P_{00}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Etant donné que l'écoulement est considéré comme adiabatique:

$$\frac{P_{00}}{\rho_{00}^\chi} = \frac{P_1}{\rho_{1s}^\chi}$$

$$\frac{\rho_{00}}{\rho_{1s}} = \left(\frac{P_{00}}{P_1} \right)^{\frac{1}{\chi}} \quad (3.8)$$

L'équation (3.8) introduite dans l'équation (3.7) donne:

$$\left(\frac{P_1}{P_{00}} \right)^{1-\frac{1}{\chi}} = 1 - \frac{\chi-1}{\chi} r_{con} \frac{C_{00}^2}{2} \frac{\rho_{00}}{P_{00}} \quad (3.9)$$

d'où :

$$f_1(P_1, r_{con}) = \left(\frac{P_1}{P_{00}} \right)^{1-\frac{1}{\chi}} - \left(1 - \frac{\chi-1}{\chi} r_{con} \frac{C_{00}^2}{2} \frac{\rho_{00}}{P_{00}} \right) = 0 \quad (3.10)$$

où

r_{con} : est définie comme la réaction de la conduite spirale par :

$$r_{con} = 2 \frac{H_{00} - H_{1s}}{C_{00}^2} \quad (3.11)$$

f_1 : est une fonction qui permet de calculer la pression P_1 à l'entrée de la conduite spirale et la réaction r_{con} du convergent.

Le coefficient des pertes étant connu, cela permet de calculer les grandeurs C_1 et ρ_1 .

Le même raisonnement est employé pour toutes les autres composantes du modèle.

Par conséquent il est obtenu:

Pour la conduite spirale :

$$f_2(P_2, r_{spi}) = \left(\frac{P_2}{P_{00}} \right)^{\frac{1}{\chi}} - \left(1 - \frac{\chi-1}{\chi} (r_{con} + r_{rot}) \frac{C_{00}^2}{2} \frac{\rho_{00}}{P_{00}} \right) = 0 \quad (3.12)$$

où

r_{spi} : est définie comme la réaction de la conduite spirale par :

$$r_{spi} = 2 \frac{H_{1s} - H_{2s}}{C_{00}^2} \quad (3.13)$$

f_2 : est une fonction qui permet de calculer la pression P_2 à la sortie de la conduite spirale et la réaction r_{spi} de cette dernière. La connaissance du coefficient des pertes dans le canal en spirale permet de calculer C_2 à p_2 .

Pour la zone de mélange :

$$f_3(P_3, r_{rot}) = \left(\frac{P_3}{P_{00}} \right)^{\frac{1}{\chi}} - \left(1 - \frac{\chi-1}{\chi} (1 - r_{rot}) \frac{C_{00}^2}{2} \frac{\rho_{00}}{P_{00}} \right) = 0 \quad (3.14)$$

où

r_{rot} : est définie comme la réaction du rotor par :

$$r_{rot} = 2 \frac{H_{3s} - H_{4s}}{C_{00}^2} \quad (3.15)$$

f_3 : est une fonction qui permet de calculer la pression P_3 après la zone de mélange et la réaction r_{rot} du rotor. . La connaissance du coefficient des pertes dans la couronne d'ailettes permet de calculer C_3 à p_3 .

Enfin pour le rotor :

$$f_4(P_4) = \left(\frac{P_4}{P_{00}} \right)^{\frac{1}{\chi}} - \left(1 - \frac{\chi - 1}{\chi} \frac{C_{00}^2}{2} \frac{\rho_{00}}{P_{00}} \right) = 0 \quad (3.16)$$

A ce niveau l'algorithme se compose de trois équations :

$$f_1(P_1, r_{con}) = 0 \quad f_2(P_2, r_{spi}) = 0 \quad f_3(P_3, r_{rot}) = 0$$

Celles ci se composent de six inconnues :

$$r_{con}, r_{spi}, r_{rot}, P_1, P_2 \text{ et } P_3$$

Pour résoudre le problème, trois autres équations sont employées:

a) loi de continuité écrite pour la conduite en spirale :

$$\rho_1 C_1 S_1 = \rho_2 C_2 \sin(\alpha_2) \Pi d_{spi} l_{spi} \quad (3.17)$$

b) loi de continuité écrite pour la zone de mélange :

$$\rho_2 C_2 \sin(\alpha_2) \Pi d_{spi} l_{spi} (1 - \delta m_{int} - \delta m_{ext}) = \rho_3 C_3 \sin(\alpha_3) \Pi d_{rot} l_{rot} \quad (3.18)$$

c) loi de continuité écrite pour le rotor :

$$\rho_3 C_3 \sin(\alpha_3) \Pi d_{rot} l_{rot} = w_4 \sin(\beta_4) \rho_4 \Pi d_{rot} l_{rot} \quad (3.19)$$

δm_{int} et δm_{ext} représentent respectivement le taux des fuites intérieures et extérieures à travers les labyrinthes d'étanchéité. Ces paramètres sont calculés d'après les études [3], par les formules suivantes :

$$\delta m_{ext} = f(r_{ext}, \alpha_3) = \frac{\mu_{ext} \delta_{ext} \left(1 + \frac{l_{spi}}{d_{spi}} \right) \sqrt{\frac{r_{ext}}{1 - r_{rot}}}}{l_{spi} \sqrt{1 - \zeta_{mel}} \sin \alpha_3} \quad (3.20)$$

$$\delta m_{\text{int}} = f(r_{\text{int}}, \alpha_3) = \frac{\mu_{\text{int}} \delta_{\text{int}} \left(1 - \frac{l_{\text{spi}}}{d_{\text{spi}}} \right) \sqrt{\frac{r_{\text{int}}^2}{1-r}}}{l_{\text{spi}} \sqrt{1-\zeta_3} \sin \alpha_3} \quad (3.21)$$

où

r_{ext} : est la réaction de l'étage à la tête de l'ailette, calculée par :

$$r_{\text{ext}} = r_{\text{rot}} + \delta r_{\text{spi}} - \delta r_{\text{rot}} \quad (3.22)$$

r_{int} : est la réaction de l'étage au pied de l'ailette, calculée par :

$$r_{\text{int}} = r_{\text{rot}} - \delta r_{\text{spi}} + \delta r_{\text{rot}} \quad (3.23)$$

avec

$$\delta r_{\text{spi}} = \frac{2 l_{\text{spi}} (1 - r_{\text{rot}}) (1 - \zeta_{\text{mel}}) \cos \alpha_3}{d_{\text{spi}}} \quad (3.24)$$

et

$$\delta r_{\text{rot}} = \frac{2 l_{\text{rot}} (1 - r_{\text{rot}}) \left(1 + \left(\frac{u}{C_{00}} \right)^2 - 2 \frac{u}{C_{00}} \cos \alpha_3 \sqrt{1 - r_{\text{rot}}} \sqrt{1 - \zeta_{\text{mel}}} - \zeta_{\text{mel}} (1 - r_{\text{rot}}) \right) \beta_4}{d_{\text{rot}} \tan \beta_4 \left(1 + \left(\frac{u}{C_{00}} \right)^2 - \frac{u}{C_{00}} \cos \alpha_3 \sqrt{1 - r_{\text{rot}}} \sqrt{1 - \zeta_{\text{mel}}} \right)} \quad (3.25)$$

Les différentes dimensions utilisées dans les formules précédentes sont représentées sur la figure (3.4).

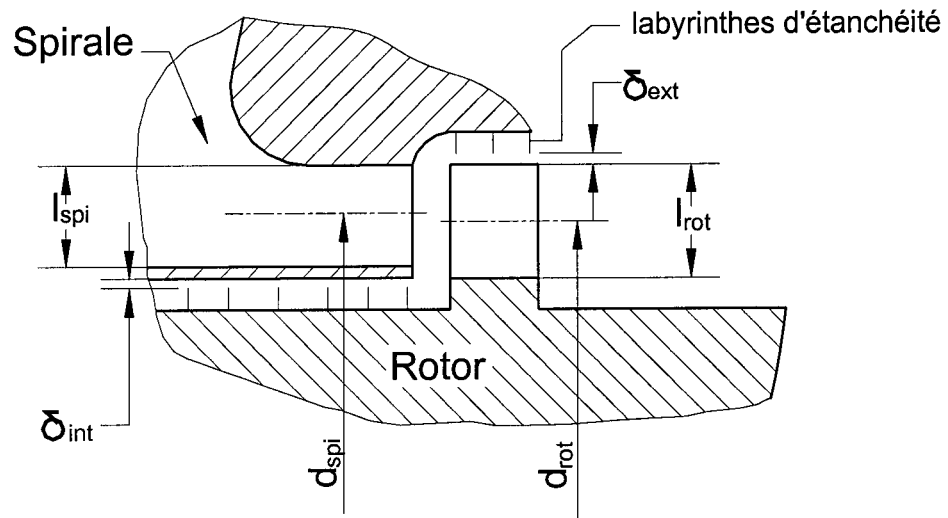


Figure 3.4 Dimensions utilisées dans le calcul

Les équations (3.16), (3.17) et (3.18) ont introduit deux autres inconnues qui sont :

α_2 : l'angle entre la vitesse absolue $\vec{C}_2$ et la section de sortie du canal en spirale

α_3 : l'angle entre la vitesse absolue $\vec{C}_3$ et la section d'entrée sur les ailettes

Ces inconnues sont déterminées par les équations de conservation du moment de quantité de mouvement, par rapport à l'axe de la turbine:

a) pour la conduite spirale :

$$m_1 K_{spi} C_1 r_1 = m_2 C_2 \cos(\alpha_2) r_2 \quad (3.26)$$

où $m_1 = \rho_1 C_1 S_1$

et $m_2 = \rho_2 C_2 \sin(\alpha_2) \Pi d_{spi} l_{spi}$

b) la zone de mélange :

$$m_2 K_{mel} C_2 \cos(\alpha_2) r_2 = m_3 C_3 \cos(\alpha_3) r_3 \quad (3.27)$$

où $m_2 = \rho_2 C_2 \sin(\alpha_2) \Pi d_{spi} l_{spi}$

et $m_3 = \rho_3 C_3 \sin(\alpha_3) \Pi d_{rot} l_{rot}$

K_{spi} est le coefficient défini par l'équation (3.1). Le rôle de ce paramètre est de mettre en évidence la partie du moment de quantité de mouvement perdue par le fluide, afin de surmonter l'écoulement dans la conduite en spirale. Cette perte est générée principalement par les forces de frottement contre les parois du canal.

Dans la zone de mélange les éléments du fluide sont entraînés par le mouvement rotatif du rotor. À cet effet le moment de quantité de mouvement augmente. Pour tenir compte de cet effet, le coefficient K_{mel} est introduit dans l'équation (3.26).

Finalement l'algorithme est représenté par un système d'équations fermé composé des équations : (3.10), (3.12), (3.14), (3.17), (3.18) et (3.19), dont la résolution permet de déterminer les paramètres thermodynamiques du fluide dans toutes les sections de contrôle du modèle.

Le programme basé sur cet algorithme est codé en FORTRAN POWER STATION 3.1. La totalité du code est présenté en annexe 1.

3.3 Exemple de calcul

Un exemple d'écoulement de vapeur, à travers le modèle de la figure (3.1), est calculé par le programme présenté à la section 3.2.

Le choix est tombé sur le cas d'une turbine à vapeur à cause de:

- a) la disponibilité de données dimensionnelles, nécessaires pour le calcul, d'une turbine à vapeur en exploitation actuellement. Ces données sont représentées par :
 - le type des profils des aubes et des ailettes
 - les dimensions de la roue de tête et de la couronne d'ailettes
 - les dimensions des tuyères d'alimentation en vapeur
- b) la disponibilité de mesures prises durant le fonctionnement de cette turbine. Ces mesures donnent les valeurs de plusieurs paramètres thermodynamiques de la vapeur, comme: la température, la pression et la chute de pression sur le premier étage.
- c) les études faites sur l'écoulement de vapeur dans les tuyères d'alimentation [1] et [2], permettent de mieux estimer et choisir les coefficients de pertes inconnus et utilisés durant le calcul.

Les données géométriques de l'exemple calculé sont choisies de telle façon à les ajuster aux dimensions de la turbine en exploitation. De ce fait, le rotor est resté inchangé, tandis que le stator est remplacé par une conduite spirale dont les dimensions sont adaptées à celles du rotor. Le convergent quant à lui, il est ajusté par rapport aux dimensions de la conduite spirale et les tuyères d'alimentation en vapeur.

Ces caractéristiques géométriques sont comme suit :

1. le convergent :

Section d'entrée : $S_0 = 0.02 \text{ m}^2$

Section de sortie : $S_1 = 0.008 \text{ m}^2$

Distance r_0 (figure 3.5), $r_0 = 0.687 \text{ m}$

Distance r_1 (figure 3.5), $r_1 = 0.657$ m

2. la conduite spirale :

Section d'entrée : $S_1 = 0.008$ m²

Distance r_1 (figure 3.5), $r_1 = 0.657$ m

Diamètre moyen à la sortie $d_{spi} = 1.1834$ m

Hauteur de la section de sortie $l_{spi} = 0.010$ m

Dimension des labyrinthes intérieurs $\delta_{int} = 0.0015$ m

Dimension des labyrinthes extérieurs $\delta_{ext} = 0.001$ m

3. la couronne d'ailettes :

Diamètre moyen à l'entrée de la couronne d'ailettes $d_{rot} = 1.1834$ m

Hauteur de l'ailette $l_{rot} = 0.012$ m

Angle $\beta_4 = 28^\circ$

Angle $\beta_u = 74^\circ$

Corde $b = 0.055$ m

Pas $t = 0.023$ m

Les données citées dessus sont représentées graphiquement sur les figures (3.4) et (3.5)

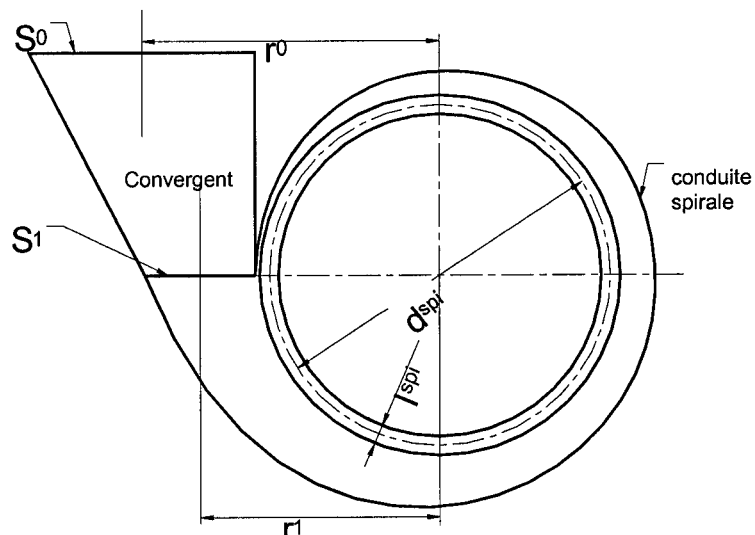


Figure 3.5 Dimensions de la conduite spirale

Les données thermodynamiques à l'entrée de l'étage sont puisées des mesures prises sur la turbine en question. Les données utilisées dans cet exemple représentent le point d'opération à 70% de la puissance nominale. Ces données sont comme suit:

Pression totale à l'entrée de l'étage $P_{00} = 116$ Bar

Température absolue à l'entrée de l'étage $T_{00} = 535$ °C

Le Coefficient $U/C_{00} = 0.29$

Les valeurs des coefficients de pertes employés dans le calcul, sont estimés sur la base des études faites sur l'écoulement à travers les tuyères [1].

$$\zeta_{\text{con}} = 0.1$$

$$\zeta_{\text{spi}} = 0.15$$

$$\zeta_{\text{mel}} = 0.1$$

$$K_{\text{spi}} = 0.6$$

$$K_{\text{mel}} = 1.05$$

Les résultats obtenus après calcul sont :

- a) les valeurs des paramètres thermodynamiques du gaz à chaque section de contrôle de l'étage sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Paramètres thermodynamiques

Etat du fluide sur le graphe enthalpie entropie	point 1	Point 2	point 3	point 4	point 4s
Pression P [bar]	81.8746	84.5390	79.6065	61.0238	61.0238
Enthalpie H [kJ/kg]	3342.017	3366.285	3356.694	3296.956	3240.041
Température T [°C]	477.93	489.07	482.66	447.87	424.59

- b) Les triangles de vitesse à chaque section de contrôle de l'étage sont présentés dans le tableau 3.2. Les différentes notations utilisées dans ce tableau sont illustrées sur la figure 3.6.

c

Section de contrôle	1	2	3	4
Vitesse absolue C [m/s]	454.86	397.94	421.36	286.64
Angle α [°]	-	37.28	26.28	45.72
Vitesse relative W [m/s]	-	274.22	267.64	437.16
Angle β [°]	-	61.52	44.18	28.00
Nombre de Mach M_a [-]	0.71	0.62	0.65	0.45

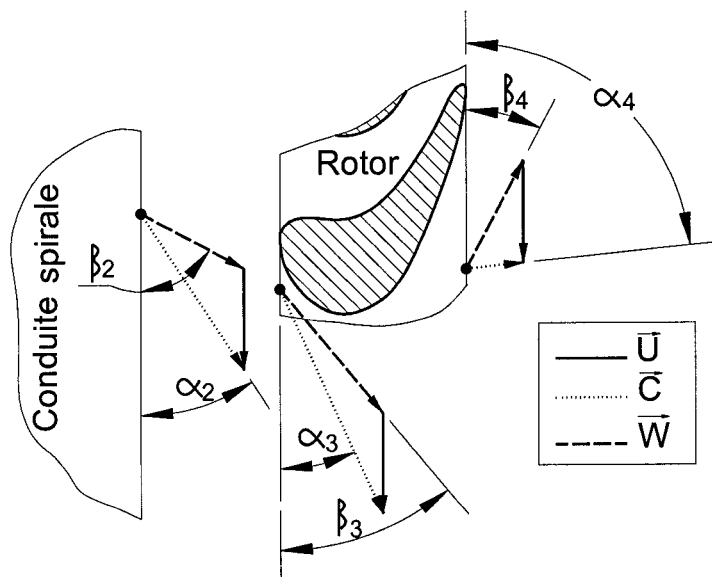


Figure 3.6 Triangles de vitesses

- c) Les valeurs des réactions de toutes les composantes de l'étage figurent dans le tableau (3.3). Ces grandeurs sont définies dans la section (3.2) de ce mémoire.

Tableau 3.3 Réactions des composantes

r_{con}	r_{spi}	r_{rot}	r_{int}	r_{ext}
0.5595	-0.0497	0.3971	0.3978	0.3964

- d) Les débits massiques à travers les composantes et le rendement interne de l'étage sont présentés dans le tableau (3.4).

Tableau 3.4 Débit massique et rendement

$m_{con} = m_{spi}$ [kg/s]	m_{rot} [kg/s]	δm_{ext} [kg/s]	δm_{int} [kg/s]	Rendement interne [-]
232.299	204.408	7.835	20.049	0.5230

3.4 Analyse paramétrique

Les résultats obtenus de l'exemple précédent, reflètent les paramètres de l'écoulement au cas où les coefficients des pertes dans la conduite spirale seraient comme suit :

$$\zeta_{spi} = 0.15 \text{ et } K_{spi} = 0.6$$

Vu que les valeurs réelles de ces deux inconnues ne peuvent être déterminées, à cause du manque d'informations à leurs égards, elles sont estimées grâce aux résultats des études [1].

Le calcul est fait en utilisant le programme de la section 3.2, pour différentes valeurs des deux paramètres ζ_{spi} et K_{spi} . Les autres données du calcul sont inchangées.

La valeur du coefficient de pertes ζ_{spi} est variée de 0.05 jusqu'à 0.15, tandis que le coefficient de perte du moment de quantité de mouvement est varié entre 0.6 jusqu'à 0.9.

Les résultats obtenus après calcul sont représentés sur les figures (3.7) et (3.8)

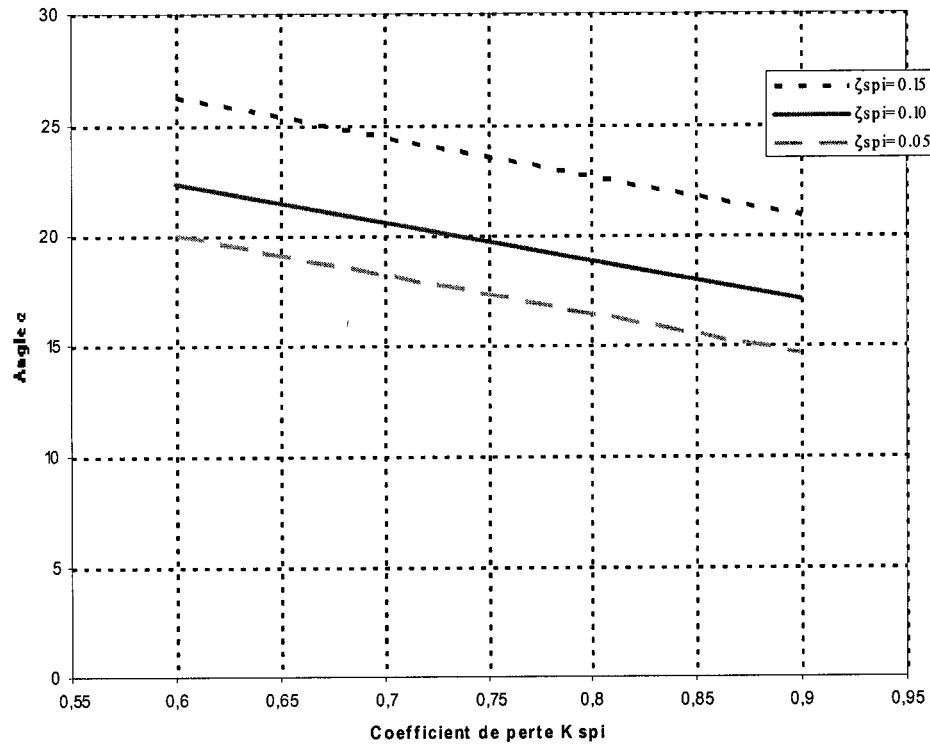


Figure 3.7 Variation de l'angle α en fonction du paramètre K_{spi}

La figure 3.7 montre la variation de l'angle α en fonction du paramètre K_{spi} , pour différentes valeurs du paramètre ζ_{spi} . Plus l'écoulement perd son moment de quantité de mouvement induit à l'entrée de la spirale, plus l'angle que génère cette dernière est grand. Les pertes d'énergie ont la même influence sur cet angle, c'est-à-dire il augmente quand les pertes augmentent.

Il est à souligner aussi que la valeur de l'angle α est comprise entre 14.9° et 26.28° dans tout l'intervalle de variation, estimé physiquement possible, pour les deux inconnues K_{spi} et ζ_{spi} .

Les résultats obtenus confirment que la conduite spirale génère un angle α comparable à celui du stator, pour les valeurs supposées de K_{spi} et ζ_{spi}

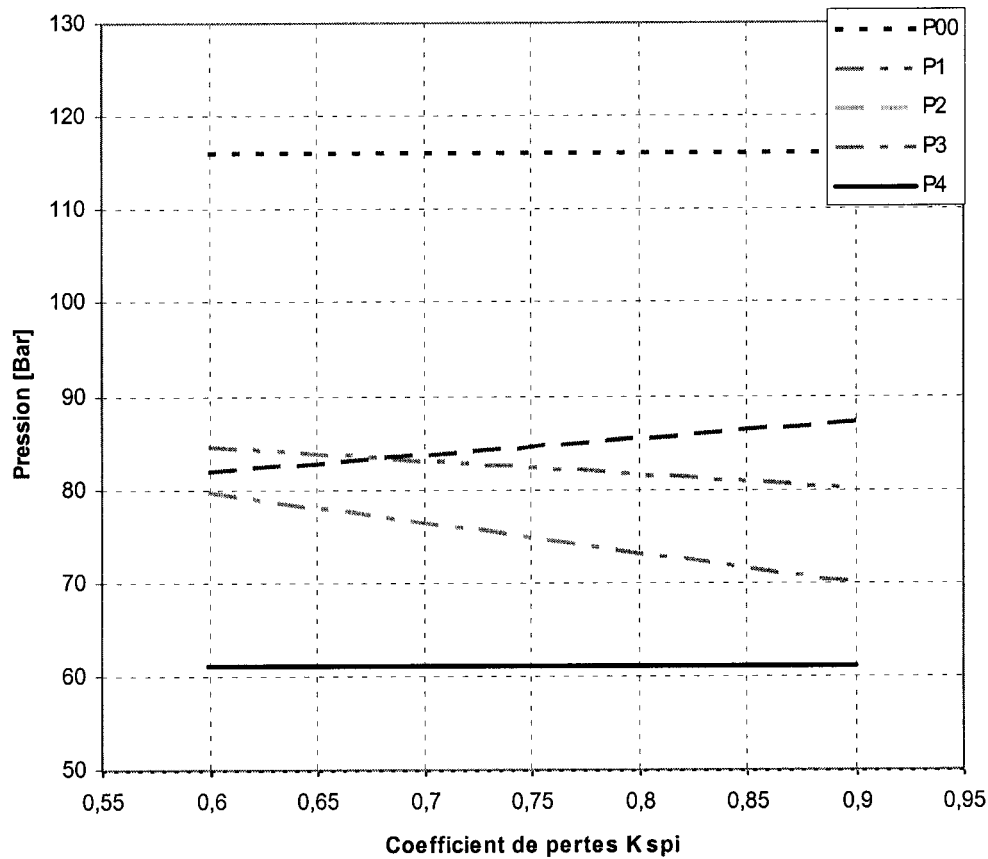


Figure 3.8 Pressions aux sections de contrôle en fonction du paramètre K_{spi}

La figure 3.8 montre la variation de la pression à chaque section de contrôle du modèle en fonction de K_{spi} , la valeur de ζ_{spi} étant constante et égale à 0.15.

Les pressions à l'entrée et à la sortie de l'étage sont constantes, tandis que les pressions entre les différentes composantes du modèle varient avec le paramètre K_{spi} .

Pour des valeurs de K_{spi} inférieures à 0.67, il se produit une compression du fluide dans la conduite spirale. Ce fait est expliqué par la valeur du paramètre K_{spi} correspondante à une grande décélération du fluide, causée par les frottements sur les parois de la conduite.

CHAPITRE 4

MODÈLE TRIDIMENSIONNEL

L'analyse faite dans le chapitre précédent avait comme avantage d'effectuer plusieurs itérations dans un temps relativement court. Cela est nécessaire afin de trouver la géométrie optimale, qui garantie un angle α de l'ordre de celui généré par un stator. Cependant le modèle 1D est incapable de donner toutes les informations en rapport avec l'écoulement dans la conduite spirale. La fiabilité des résultats repose sur le bon choix des coefficients de pertes ζ_{spi} et K_{spi} , utilisés lors du calcul. En plus le modèle 1D suppose que les paramètres thermodynamiques du fluide sont uniformes sur tout le périmètre de la section de sortie.

Dans ce chapitre l'étude va se baser sur un modèle tridimensionnel d'écoulement dans une double conduite spirale. Une telle analyse permet de répondre à plusieurs questions comme :

1. quelle est la valeur de l'angle de sortie α ?
2. est ce que l'angle α est uniforme sur tout le périmètre de la section de sortie ?
3. est ce que le débit massique est uniforme sur toute la section de sortie ?
4. etc.....

Le modèle tridimensionnel, en plus de répondre à toutes ces questions a l'avantage de donner plus d'informations sur les valeurs des coefficients ζ_{spi} et K_{spi} supposés dans le modèle 1D.

Le calcul 3D est effectué par la méthode des éléments finis, par l'intermédiaire du logiciel FIDAP 8.60

4.1 Géométrie et maillage

La géométrie optimisée lors du calcul 1D est utilisée pour le calcul 3D. La zone d'écoulement à travers les conduites spirales est définie comme la région délimitée par :

1. les parois des conduites
2. les sections d'entrée
3. les frontières de la zone de mélange (où se mélangent les débits des deux conduites).

Une section de cette zone est montrée sur la figure (4.1)

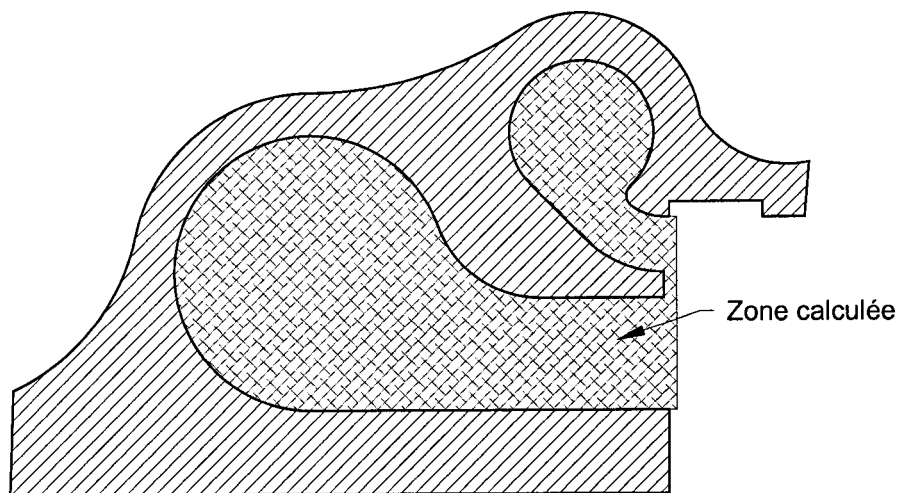


Figure 4.1 Section de la zone calculée

Chaque spirale possède une sortie par laquelle le fluide s'échappe vers les ailettes, ces sorties s'étalent sur un angle de 355 degrés chacune. Les sorties n'occupent pas tout le périmètre de l'étage pour séparer le début de la conduite de sa fin. Cette condition est requise afin d'éviter les écoulements secondaires causés par la différence entre les pressions à l'entrée et celle à la fin de la conduite.

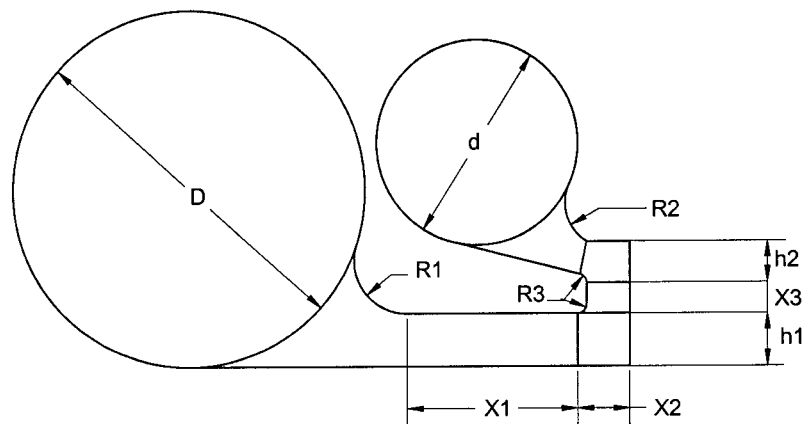


Figure 4.2 Dimensions de la zone modelée

Les dimensions de la zone modelée sont illustrées sur la figure (4.2), elles ont les valeurs suivantes:

Grande spirale :

Diamètre à l'entrée $D = 100 \text{ mm}$

Largeur du canal à la sortie $h1 = 12 \text{ mm}$

Petite spirale :

Diamètre à l'entrée $d = 66 \text{ mm}$

Largeur du canal à la sortie $h2 = 7 \text{ mm}$

La section transversale de chaque spirale diminue proportionnellement en fonction de la coordonnée reliée avec l'axe de la conduite, cela de la section à l'entrée jusqu'à la plus petite section à la fin de cette spirale.

Les dimensions suivantes sont constantes sur tout le périmètre des conduites.

$R1 = 40 \text{ mm}$

$R2 = 40 \text{ mm}$

$R3 = 10 \text{ mm}$

$X1 = 90 \text{ mm}$

$X2 = 1,5 \text{ mm}$

$X3 = 5 \text{ mm}$

Pour générer un maillage structuré dans toute la région calculée avec des éléments non déformés, la zone d'écoulement est divisée en 26 sous zone. Le maillage est généré dans toutes ces parties employant des éléments "bricks" avec 08 nœuds localisés sur les sommets

Un exemple de maillage des parois est illustré sur la figure (4.3).

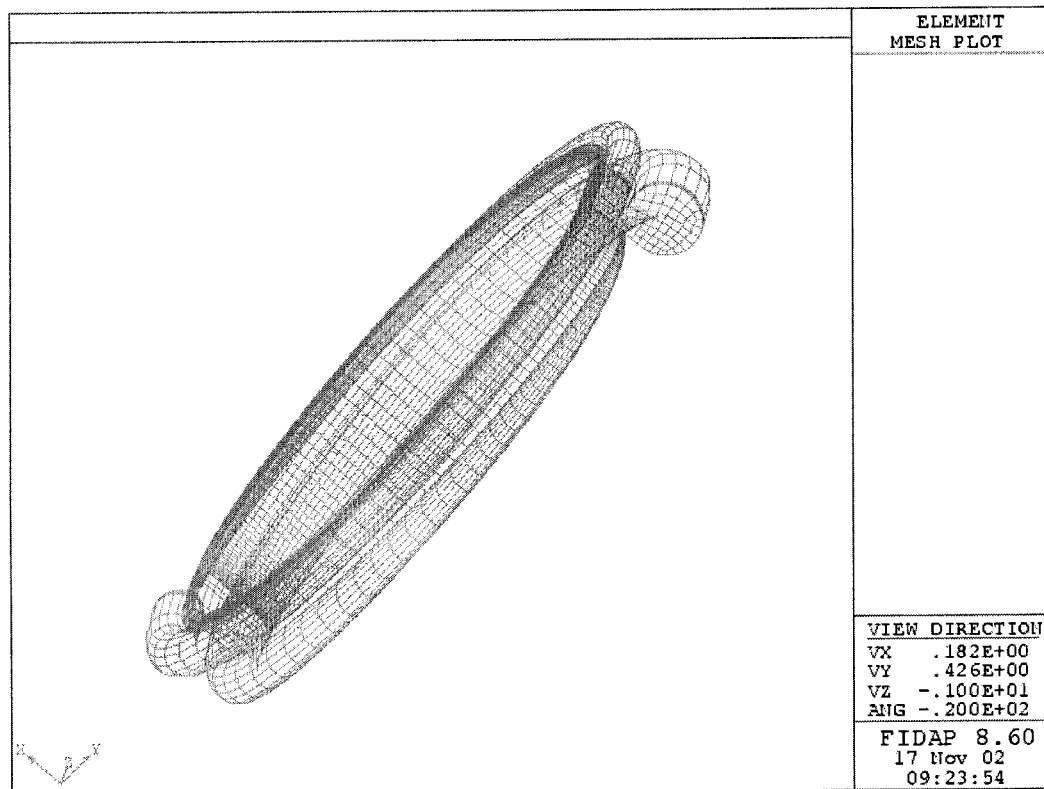


Figure 4.3 Maillage des deux conduites spirales

4.2 Équations résolues

Le logiciel FIDAP 8.60 est choisi pour calculer l'écoulement dans la double spirale décrite à la section précédente. Cet Outil s'appuie sur la méthode des éléments finis pour approximer les équations de conservation dans le continuum étudié.

Le modèle 3D considère que l'écoulement dans les conduites est compressible et turbulent.

Les équations résolues à cet effet sont:

a) L'équation de continuité

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho u_j)_{,j} = 0 \quad (4.1)$$

b) L'équation de conservation de quantité de mouvement:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = \sigma_{ij,j} \quad (4.2)$$

ou $\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \tau_{ij}$

$$\tau_{ij} = 2 \mu S_{ij} + \left(\mu_b - \frac{2}{3} \mu \right) \mu_{k,k} \delta_{ij}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i})$$

c) L'équation de conservation d'énergie :

$$\rho c_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_i T_{,i} \right) = -q_{i,i} - p u_{i,i} \quad (4.3)$$

où $q_i = -k_{i,j} T_{,j}$

$$c_p - c_v = \frac{R}{M}$$

d) L'équation d'état:

$$\rho = \frac{M p}{R T} \quad (4.4)$$

Dans ces équations les variables sont représentées par:

$$u = \bar{u} + u'$$

$$p = \bar{p} + p'$$

$$T = \bar{T} + T'$$

$$\rho = \bar{\rho} + \rho'$$

$$\mu = \bar{\mu} + \mu'$$

ou la quantité x' représente la valeur de la fluctuation par rapport à la valeur moyenne $\bar{x}$ de la variable x , du à la turbulence de l'écoulement.

e) L'équation de l'énergie de turbulence k-ε

Le modèle de turbulence k-ε utilisé dans le calcul est celui nommé par RNG k-ε établi par Yakhot et al. (1992).

Dans ce modèle on emploie des formules empiriques des équations de transport pour déterminer :

- l'énergie cinétique de la turbulence k par les:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (4.5)$$

- vitesse de dissipation ε

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$+ c_1 \frac{\varepsilon}{k} G - \frac{c_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^3}{k} - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.6)$$

Dans lesquelles

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$\text{ou } \eta = s \frac{k}{\varepsilon}, \quad s = \sqrt{2 s_{ij} s_{ij}} = \sqrt{\frac{G}{\mu_t}} \quad \text{et} \quad s_{ij} = \frac{1}{2t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Les différentes constantes utilisées dans ces équations d'après [6] sont :

C_μ	c_1	c_2	σ_k	σ_ε
0.085	1.42	1.68	0.7179	0.7179

4.3 Conditions aux frontières

Les conditions frontières suivantes ont été supposées :

- a) à l'entrée des deux spirales, tous les profils des grandeurs suivantes sont considérés plats :

$$\text{Vitesse } C, C = 56.52 \frac{m}{s}$$

$$\text{Pression totale } P_{00} = 116 \text{ Bar}$$

$$\text{Température totale } T_{00} = 535 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Énergie cinétique de turbulence } k = 22.42 \frac{m^2}{s^2}$$

$$\text{Vitesse de dissipation } \varepsilon = 1422.3 \frac{m^4}{s^3}$$

- b) sur les parois, les vitesses sont nulles :

$$C = 0$$

4.4 Résultats

Les résultats obtenus du calcul 3D montrent que les conduites génèrent l'angle α recherché (figure 4.8). Néanmoins il est remarqué que dans les zones adjacentes aux deux entrées, cet angle devient presque droit. Ceci est causé par :

- a) la paroi qui finie la conduite (figure 4.10) dont la forme change brusquement la direction de l'écoulement, pour le faire évacuer avec un angle droit vers les ailettes.
- b) La paroi de l'entrée qui dirige l'écoulement vers la section de sortie

Ce désavantage, remarqué dans les zones indiquées, peut être évité en changeant la géométrie des deux parois. Notamment si celles-ci seront inclinées d'un angle égal à l'angle α recherché, la valeur de ce dernier sera régulière sur toute la section de sortie.

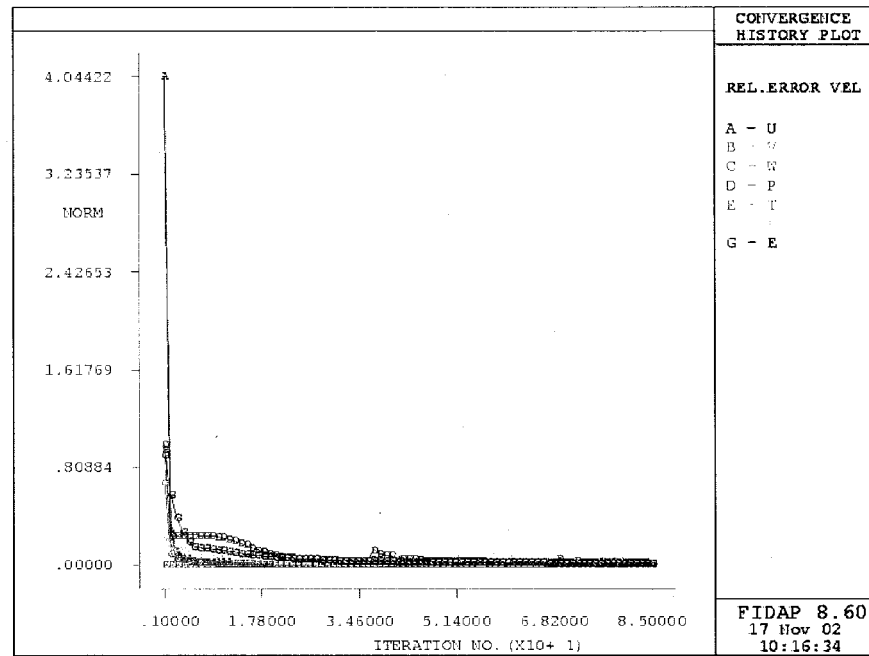


Figure 4.4 Graphe de convergence

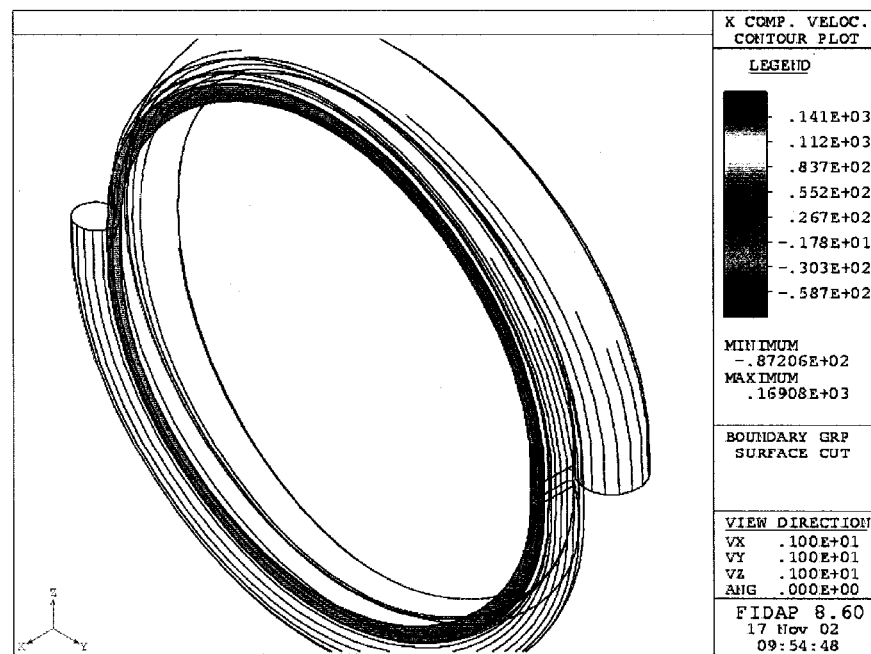


Figure 4.5 Composante normale de la vitesse à la section de sortie

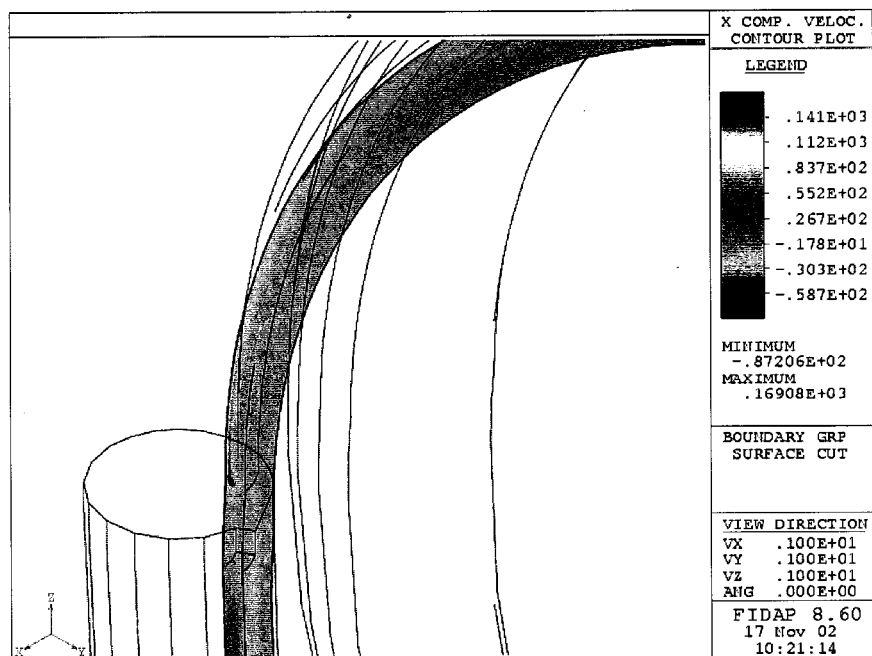


Figure 4.6 Composante normale de la vitesse au voisinage de l'entrée

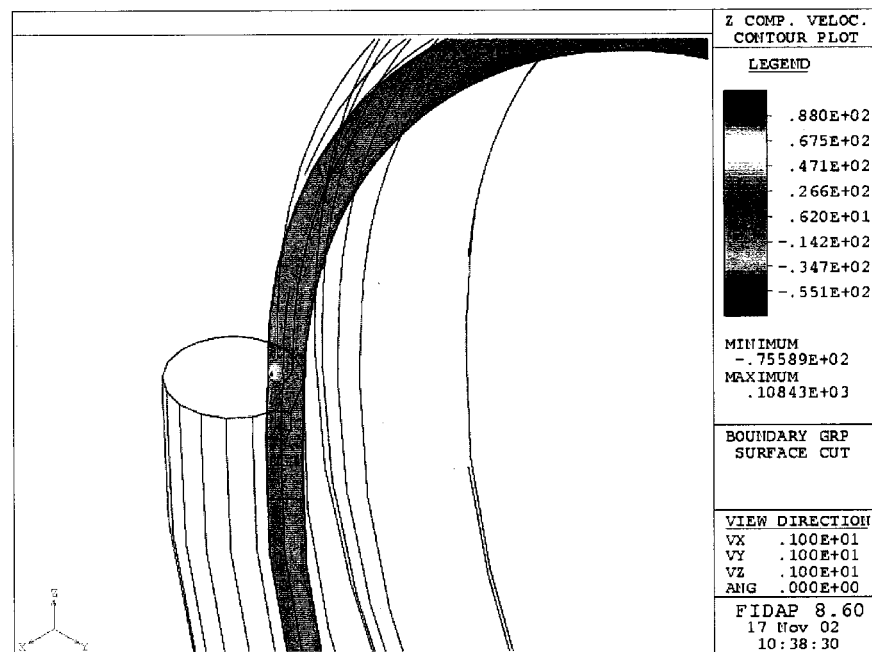


Figure 4.7 Composante radiale de la vitesse au voisinage de l'entrée

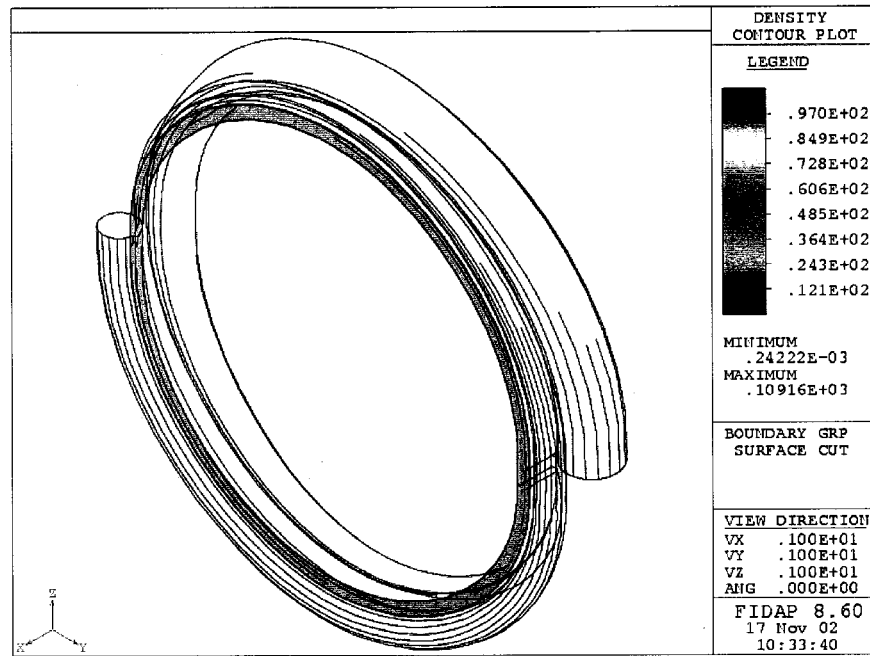


Figure 4.8 Densité sur la section de sortie

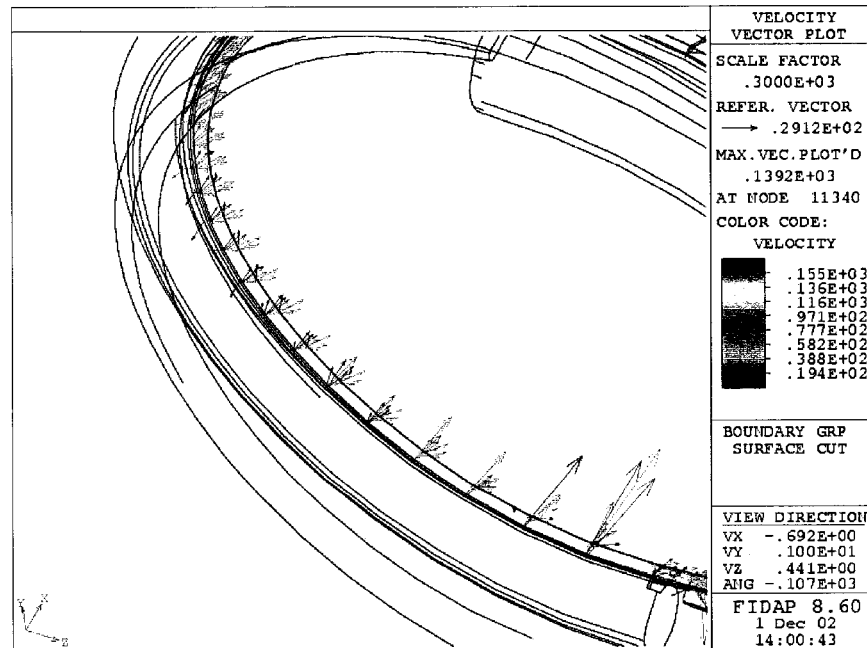


Figure 4.9 Vecteur vitesse à la section de sortie I

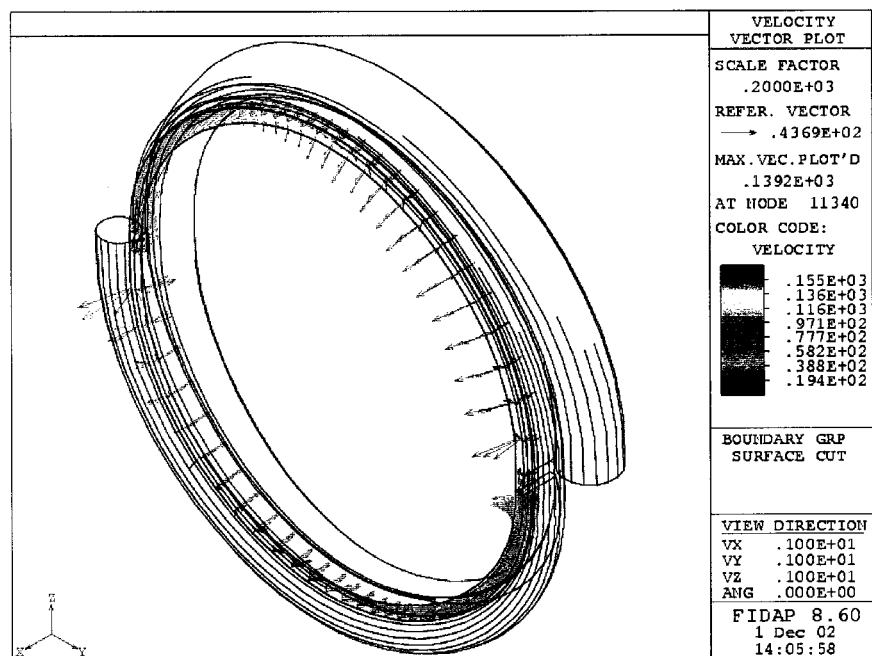


Figure 4.10 Vecteur vitesse à la section de sortie II

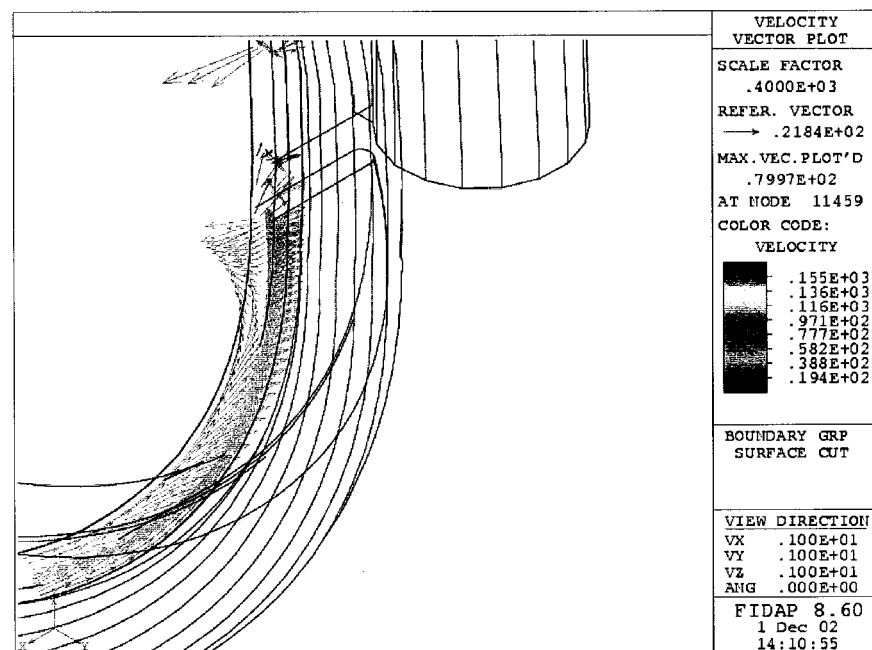


Figure 4.11 Vitesse à la fin de la conduite

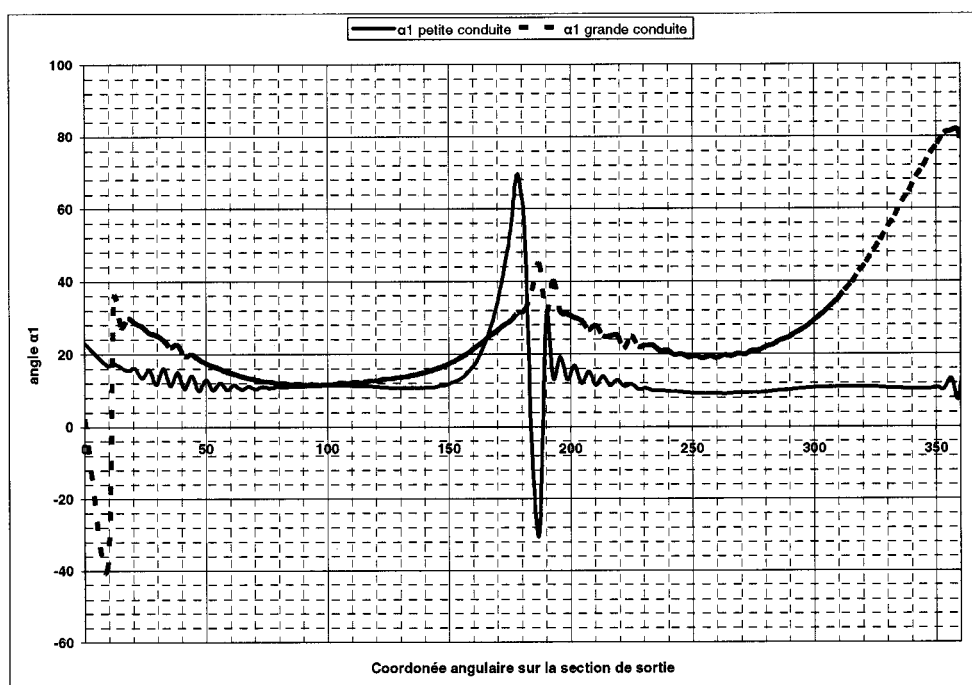


Figure 4.12 Variation de l'angle α sur la section de sortie

Par contre le débit massique est approximativement uniforme sur toute la section de sortie (figures 4.4 et 4.7). Ceci confirme que la conduite spirale alimenterait la couronne d'ailettes uniformément sur tout le périmètre.

À cause des perturbations notées au voisinage des deux entrées, le débit massique change de valeur dans ces zones (figures 4.5 et 4.6) à cause de la re-circulation du fluide évacué avec un angle droit vers les ailettes.

La variation de l'angle α sur tout le périmètre de sortie est représenté sur la figure (4.11).

Il est évident que c'est les deux zones d'entrées, se situant à 0° et à 180° , qui provoque la déstabilisation de l'écoulement, à cause des parois normales au début et à la fin de chaque conduite.

Dans la zone non perturbée, l'angle généré par les deux spirales est de l'ordre de 16° , qui représente un résultat satisfaisant pour le but du concept.

Un design adéquat des parois pourrait garantir un angle régulier sur la section de sortie.

CONCLUSION

Ce mémoire avait pour but de montrer qu'une conduite en forme de spirale pourrait remplacer le stator de turbine. Il a été confirmé, par l'étude du model tridimensionnel, que la spirale génère un angle α de l'ordre de celui rencontré dans le stator. Par ce fait la géométrie de la spirale peut être conçue pour remplir la fonction du stator.

La valeur de l'angle α est fonction de la géométrie choisie et des paramètres thermodynamiques à l'entrée de la conduite. Plus le moment de quantité de mouvement induit à l'entrée est grand, plus l'angle α est petit.

L'étude unidimensionnelle, qui s'appuie sur une analyse paramétrique, a permis de retrouver la configuration dimensionnelle optimum de la conduite, afin que celle-ci garantisse l'angle α recherché. La précision de ce model est dépendante du bon choix des paramètres supposés, mais il est efficace car il permet d'effectuer plusieurs calculs dans un temps relativement court.

Pour une perte, du moment de quantité de mouvement, supérieure à 13 % de celui induit à l'entrée, il se produit une compression du fluide dans la spirale. Ceci laisse à croire qu'un choix non adéquat de la géométrie, pourrait entraîner des pertes importantes dans la conduite et de ce fait, la spirale ne remplirait pas le rôle pour lequel elle a été conçue.

Le model tridimensionnel donne plus d'informations sur l'écoulement dans les conduites spirales, notamment, les résultats obtenus démontre que l'écoulement à la sortie est approximativement uniforme sur toute la section, ce qui avantage le concept proposé par rapport au stator.

Le débit massique uniforme sur toute la section de sortie éliminerait plusieurs pertes présentes dans le stator et améliorerait le travail des ailettes, par la suppression des vibrations forcées par les aubes.

Par contre l'angle α dans les zones adjacentes aux entrées des conduites prend des valeurs au environ de 80° , cette condition n'est pas acceptable pour le but recherché. Cependant cet inconvénient n'est pas relié avec le concept lui-même, mais qu'avec la géométrie employée pour le calcul. L'interaction du débit massique rentrant avec celui qui est sortant des spirales, en plus des parois perpendiculaires à la fin de chaque spirale, ont provoqué un changement de direction brusque de l'écoulement. Ces conditions ont créé des perturbations dans les zones indiquées.

Une meilleure optimisation de la géométrie permettrait d'éliminer ces inconvénients. Les parois de l'entrée et de la fin de chaque conduite devraient être conçues, de telle façon à garantir l'angle α recherché, cette démarche éviterait à l'écoulement d'être détourné d'un angle droit à la fin de chaque spirale.

Il est évident qu'il faudrait autres recherches et études variées pour déterminer les propriétés importantes de l'étage muni d'une spirale à la place du stator. Par exemple, une connaissance de la variation des paramètres du fluide, à la sortie de la conduite, en fonction de la géométrie déterminerait les limites d'utilisation du concept proposé.

RÉFÉRENCES

- [1] PUZYREWSKI, R. et MEKROUZ K. (1997). Algorytm oraz program rozplywu pary w ukladzie rozrzadu na podstawie danych Energopomiar. Université Technique de Gdansk.
- [2] PUZYREWSKI, R., KRZYSŁAK, P. et MEKROUZ, K. (1995). Analiza stopni cylindrycznych z profilami PLK-R2. Université Technique de Gdansk.
- [3] PUZYREWSKI, R. et BOGDALI-SARNOWSKA, L. (1991). Odtwarzanie charakterystyk stopni modelowych ``zadanie proste``. Université Technique de Gdansk.
- [4] DENTON, J. D. (1993). Loss mechanism in turbomachines. Journal of Turbomachinery, 115, 621-656
- [5] BLOCH, H. P. (1996). A practical guide to steam turbine technology. The McGraw-Hill Companies.
- [6] FLUENT INCORPORATED. (2001). Fidap 8.60 theory manual.
- [7] FIELDING, Leslie. (2000). Turbine design, the effect on axial flow turbine, performance of parameter variation. ASME. Press.
- [8] YI, Li. (1995). Geometrical modeler and mesh generation for turbomachinery components. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Ecole Polytechnique.
- [9] PERYCZ, S. (1988). Turbiny parowe i gazowe. Université Technique de Gdansk.

- [10] FLOWER, Harvey, M. (1995). High performance materials in Aerospace. Chapman & Hall. 135-155, 182-203.
- [11] TULISZKA, E. (1991). Turbiny cieplne zagadnienia termodynamiczne i przeplywowe. WNT.
- [12] LINDSLEY, David. (2000). Power-plant control and instrumentation. The Institution Of Electrical Engineers
- [13] WILSON, D. G. et KORAKIANITIS, T. (1998). The Design of high-efficiency turbomachinery and gas turbines. Prentice-Hall, Inc.
- [14] RAO, J. S. (1991). Turbomachine blade vibration. John Wiley and Sons.
- [15] WENDT, John, F. (1996). Computational fluid dynamics. Springer-Verlay Berlin Heidelberg.
- [16] TAYLOR, C., MORGAN, K. et BREBBIA C.A. (1978). Numerical methods in laminar and turbulent flow. John Wiley and Sons.
- [17] LÖHNER, Rainald. (2001). Applied CFD techniques. John Wiley and Sons, LTD
- [18] SCHIESTEL, Roland. (1998). Les écoulements turbulents, modélisation et simulation. HERMES.
- [19] COHEN, H., ROGERS G. F. C. et SARAIVANAMUTTOO H. I. H. (1972). Gas turbine theory. Longman.

[20] DUNKER, R. (1993). Advances in Engine technology. John Wiley and Sons. 154-184

[21] YOUNG, A. D. (1989). Boundary layers. AIAA Education series.

[22] LAKSHMINARAYANA, B. (1996). Fluid dynamics and heat transfer of turbomachinery. John Wiley and Sons.

[23] WHITE, F.M. (1999). Fluid Mechanics. McGraw-Hill.

ANNEXE 1

PROGRAMME DE CALCUL 1D

La présente annexe renferme le code du model décrit dans la section 3.1 de ce mémoire.

Les principales procédures incluses sont :

1. CALC1 : pour le calcul d'après le model de la section 3.1
2. broydn: pour la résolution des équations non linéaires
3. TPWF1 : pour le calcul des paramètres thermodynamiques de la vapeur

```

PROGRAM spiralal
EXTERNAL TPWF1

INTEGER iz , iw
DIMENSION x(3)
PARAMETER (Pi=3.1415)
REAL delw[allocatable] (:), delz[allocatable] (:)
REAL ls, lw, Miz, Miw, Kv, km, sm, wm, Mi2, mach1, mach2, mach3,
&      mach4
COMMON/PAR1/ H00, s00, c0, u, Uc0,
&      dzkon, dzsp, dzmie, Kv, Km, Miz, Miw, proc,
&      r1, s1, r2, S2, ls, d2s, r3, S3, lw, d2w, dlz, dlw, beta4

COMMON/PAR2/ x
COMMON/PAR3/ P00, p1, p2, p3, p4, h1s, h1, h2s, h2t, h2, h3s, h3l, h3, h4s, h4p,
&
h4, too, t1s, t1, t2s, t2t, t2, t3s, t3l, t3, t4s, t4p, t4, s01, s02
&
, s03, s04, c1, c2, a12, w2, beta2, c3, a13, w3, beta3, c4, a14, w4,
&      dzw, Mi2, rkon, rsp, rwir, rz, rw, sm, wm, dmz, dmw, delm,
&      mach1, mach2, mach3, mach4

CHARACTER*20 qaz1, qaz2

C      Entree de donnees :

WRITE (*,*) 'entrez le fichier de donnees geometriques:'
READ (*,45) qaz1
45  FORMAT (A)
Open (1, FILE=qaz1)

```

```

C      Entree de donnees pour le convergent :

      READ(1,45) TEXT
      READ(1,45) TEXT
      READ (1,*) s1

C      Entree de donnees pour la spirale :

      READ (1,45) TEXT
      READ (1,45) TEXT
      READ (1,*) d2s,ls

C      Entree de donnees pour le rotor :

      READ (1,45) TEXT
      READ (1,45) TEXT
      READ (1,*) d2w, lw, betau, b2, t2
      READ (1,45) TEXT
      READ (1,*) iw, iz
      Allocate(delz(1:iz))
      Allocate(delw(1:iw))
      READ (1,45) TEXT
      Do 66 i=1,iw
        READ (1,*) delw(i)
66      CONTINUE
      READ (1,45) TEXT
      Do 77 i=1,iz
        READ (1,*) delz(i)
77      CONTINUE
      CLOSE(1)

C      Entree de donnees thermodynamiques :

      WRITE (*,*) 'Entrez le fichier des donnees thermodynamiques: '
      READ (*,31) qaz2
31      FORMAT (A)
      Open (2,FILE=qaz2)
      READ (2,31) TEXT
      READ (2,31) TEXT
      READ (2,*) P00, T00, Uc0
      READ (2,31) TEXT
      READ (2,*) dzkon,dzsp,dzmie
      READ (2,31) TEXT
      READ (2,*) kv,km
      READ (2,31) TEXT
      READ (2,*) Miz,Miw
      READ (2,31) TEXT
      READ (2,*) proc
      READ (2,31) TEXT
      READ (2,31) TEXT
      READ (2,*) x(1),x(2),x(3)
      close(2)

```

```

H00=TPWF1(2,T00,P00)*1000
V00=TPWF1(1,T00,P00)
S00=TPWF1(3,T00,P00)
P00=P00*10**5
T00=T00+273.15
Ro00=1/V00

Do 99 i=1,iz
    dlz=dlz+1/(delz(i)*delz(i))
99 CONTINUE

dlz=1/DSQRT(dlz)

Do 110 i=1,iw
    dlw=dlw+1/(delw(i)*delw(i))
110 CONTINUE

dlw=1/DSQRT(dlw)

r2=d2s/2

r3=d2w/2

S2=pi*d2s*ls

S3=pi*d2w*lw

r1=r2+ls/2+0.01+sqrt(s1/pi)

c    write(*,*) 'r1=',r1
c    write(*,*) 'r2=',r2
c    write(*,*) 'r3=',r3

u=Pi*d2w*3000/60

c0=u/Uc0

beta4=19.311539+0.9112749*(betau-75)+18.666*((t2/b2)-0.7)

bopt=34.2212+(75.97-betau)

CALL CALC1

Open(3,file='Spir_wyn')

write(*,*) '
write(*,*) '          Resultats '
write(*,*) '          -----'

```

```

write (*,107) x(1)
write (*,108) x(2)
write (*,109) x(3)
107  FORMAT ('    Reac. con. rkon=',(1x,f8.6))
108  FORMAT ('    Reac. spirale rspi=',(1x,f8.6))
109  FORMAT ('    Reac. rotor rwir=',(1x,f8.6))

write(3,*) '          Resultats'

Write(3,41)
41  FORMAT(/T15'PARAMETRES DE L'ETAGE SUR LE GRAPHE S-H'//
&      T4'p00'T15'p1'T25'p2'T35'p3'T45'p4'T64'[bar]')
Write(3,42) P00/10**5,p1/10**5,p2/10**5,p3/10**5,p4/10**5

42  FORMAT(F8.4,T12,F8.4,T22,F8.4,T32,F8.4,T42,F8.4/)
Write(3,43)
43
FORMAT(T3'H00'T14'H1s'T24'H2s'T34'H3s'T44'H4s'T54'H1'T64'[kJ/kg]')
Write(3,44) H00/1000,H1s/1000,H2s/1000,H3s/1000,H4s/1000,H1/1000

44  FORMAT(F9.3,T12,F9.3,T22,F9.3,T32,F9.3,T42,F9.3,T52,F9.3/)

Write(3,58)
58  FORMAT(T3'H2t'T14'H2'T24'H3l'T34'H3'T44'H4p'T54'H4'T64'[kJ/kg]')

Write(3,46) H2t/1000,H2/1000,H3l/1000,H3/1000,H4p/1000,H4/1000

46  FORMAT(F9.3,T12,F9.3,T22,F9.3,T32,F9.3,T42,F9.3,T52,F9.3/)

Write(3,47)
47  FORMAT(T3't00'T14't1s'T24't2s'T34't3s'T44't4s'T54't1'T64'[st.C]')
Write(3,48) t00-273.15,t1s,t2s,t3s,t4s,t1

48  FORMAT(F9.3,T12,F9.3,T22,F9.3,T32,F9.3,T42,F9.3,T52,F9.3/)

Write(3,49)
49  FORMAT(T3't2t'T14't2'T24't3l'T34't3'T44't4p'T54't4'T64'[st.C]')
Write(3,50) t2t,t2,t3l,t3,t4p,t4

50  FORMAT(F9.3,T12,F9.3,T22,F9.3,T32,F9.3,T42,F9.3,T52,F9.3/)

Write(3,51)
51
FORMAT(T3'S00'T13'S01'T23'S02='T33'S03'T43's04'T64'[kJ/(kg*degC)]'
&      )
Write(3,52) S00,S01,S02,S03,s04

52  FORMAT(F7.5,T12,F7.5,T22,F7.5,T32,F7.5,T42,F7.5/)

Write(3,53)
53  FORMAT(/T20'Trojkaty predkosci'/)
Write(3,54)
54  FORMAT(T3'c1'T9'c2'T18'al2'T25'w2'T32'beta2'T39'c3'T47'al3'

```

```

&T55'w3'T61'beta3')
  Write(3,55) c1,c2,al2*180/Pi,w2,beta2*180/Pi,c3,al3*180/pi,
&          w3,beta3*180/pi

55  FORMAT(F6.2,T8,F6.2,T17,F6.2,T24,F6.2,T31,F6.2,T38,F6.2,T46,F6.2
&T53,F6.2,T60,F6.2/)

  Write(3,56)
56  FORMAT(T3'c4'T9'al4'T18'w4'T25'beta4'T32'u'T39'mach1'T47'mach2'
&T55'mach3'T61'mach4')

Write(3,57) c4,al4*180/Pi,w4,beta4*180/Pi,u,mach1,mach2,mach3,mach4

57  FORMAT(F6.2,T8,F6.2,T17,F6.2,T24,F6.2,T31,F6.2,T38,F6.2,T46,F6.2
&T53,F6.2,T60,F6.2)

  Write(3,67)
67  FORMAT(/T15'Wspolczynniki. PERTES '/')
  Write(3,68)
68  FORMAT(T3'dzkon'T12'dzsp' T24'dzw'T36'Kv'T48'Km'T58'Mi2')
  Write(3,69) dzkon,dzsp,dzw,kv,km,Mi2
69  FORMAT(F6.4,T12,F5.4,T24,F5.4,T36,F5.4,T48,F6.4,T58,F6.4)

  Write(3,83)
83  FORMAT(/T10'REACTIONS DES DIFFERENTS COMPOSANTS'/)
  Write(3,84)
84  FORMAT(T5,'rkon'T13'rsp'T23'r'T33'rw'T43'rz'T50'[-]')
  Write(3,85) rkon,rsp,rwir,rw,rz
85  FORMAT(F7.4,T11,F7.4,T21,F7.4,T31,F7.4,T41,F7.4)
  Write(3,70)
70  FORMAT(/T20'DEBITS MASSIQUES'/)
  Write(3,71)
71  FORMAT(T1'Ms=Mkon'T12'Mw'T22'Dmz'T32'Dmw'T42'Deltam'T52'[kg/s]')
  Write(3,72) sm,wm,dmz,dmw,delm
72  FORMAT(F7.3,T10,F7.3,T20,F7.3,T30,F7.3,T40,F7.3)
c    Write(3,80)
c80  FORMAT(/T15'RENDEMENTS'/)
c    Write(4,81)
c81  FORMAT(T3'Eta(k)'T12'Eta(w)'T22'Etau'T32'Eta(i)'T39'[-]')
c    Write(4,82) etak,etaw,etau,etai
c82  FORMAT(F6.4,T10,F6.4,T20,F6.4,T30,F6.4)
c    Write(4,47)
      close (4)

END

SUBROUTINE CALC1
  INTEGER NK
  PARAMETER (NK=3,Pi=3.1415)
  REAL x(NK),f(NK),ls,lw,Miz,Miw,Kv,km,sm,wm,Mi2,mach1,mach2,mach3,
&      mach4
  COMMON/PAR1/ H00,s00,c0,u,Uc0,
&      dzkon,dzsp,dzmie,Kv,Km,Miz,Miw,proc,

```

```

&          r1,s1,r2,s2,lw,d2s,r3,s3,lw,d2w,dlz,dlw,beta4

COMMON/PAR2/ x
COMMON/PAR3/P00,p1,p2,p3,p4,h1s,h1,h2s,h2t,h2,h3s,h3l,h3,h4s,h4p,
&
h4,too,t1s,t1,t2s,t2t,t2,t3s,t3l,t3,t4s,t4p,t4,s01,s02
&
,s03,s04,c1,c2,a12,w2,beta2,c3,a13,w3,beta3,c4,a14,w4,
&          dzw,Mi2,rkon,rsp,rwir,rz,rw,sm,wm,dmz,dmw,delm,
&          mach1,mach2,mach3,mach4
LOGICAL check

call broydn(x,NK,check)
call funcv(NK,x,f)
if (check) then
    write(*,*) 'Convergence problems.'
end if

rkon=x(1)
rsp=x(2)
rwir=x(3)

H1s=H00-rkon*c0*c0/2

p1=TPWF1(10,H1s/1000,s00)*100000

H1=H1s+dzkon*(H00-H1s)

v1=TPWF1(8,H1/1000,P1/100000)

ro1=1/v1

c1=SQRT(2*(h00-h1))

s01=TPWF1(9,H1/1000,p1/100000)

a1=CSOUND(S01,P1/100000)

mach1=c1/a1

T1s=TPWF1(7,H1s/1000,p1/100000)

T1=TPWF1(7,H1/1000,p1/100000)

H2s=H00-(rkon+rsp)*c0*c0/2

p2=TPWF1(10,H2s/1000,s00)*100000

H2t=TPWF1(6,s01,p2/100000)*1000

H2=H2t+dzsp*(H00-H2t)

c2=SQRT(2*(h00-h2))

```

```

V2=TPWF1(8,H2/1000,P2/1000000)

ro2=1/v2

s02=TPWF1(9,H2/1000,p2/1000000)

a12=ACOS(c1*r1*kv/(r2*c2))

a2=CSOUND(S02,P2/1000000)

mach2=c2/a2

T2s=TPWF1(7,H2s/1000,p2/1000000)

T2t=TPWF1(7,H2t/1000,p2/1000000)

T2=TPWF1(7,H2/1000,p2/1000000)

beta2=ATAN(c2*sin(a12)/(c2*cos(a12)-u))

W2=c2*SIN(a12)/SIN(beta2)

H4s=H00-(c0*c0/2)

H3s=H4s+rwir*c0*c0/2

p3=TPWF1(10,H3s/1000,s00)*100000

H3l=TPWF1(6,s02,p3/1000000)*1000

H3=H3l+dzmie*(H00-H3l)

c3=SQRT(2*(h00-h3))

V3=TPWF1(8,H3/1000,P3/1000000)

ro3=1/v3

s03=TPWF1(9,H3/1000,p3/1000000)

a13=0.5*Asin(Km*ro2/ro3*c2*c2/(c3*c3)*r2/r3*s2/s3*sin(2*a12))

a3=CSOUND(S03,P3/1000000)

mach3=c3/a3

T3s=TPWF1(7,H3s/1000,p3/1000000)

T3l=TPWF1(7,H3l/1000,p3/1000000)

T3=TPWF1(7,H3/1000,p3/1000000)

```

```

drk=2*ls*(1-rwir)*(1-dzmie)*(COS(al3)*COS(al3))/d2s

drw=(2*(1-rwir)*lw*(1+Uc0**2-2*Uc0*COS(al3)*
&      SQRT(1-dzmie)*SQRT(1-rwir)-dzmie*(1-rwir))*beta4)/
&      (d2w*TAN(beta4)*(1+Uc0**2-Uc0*COS(al3)*SQRT(1-dzmie)*
&      SQRT(1-rwir)))

rz=rwir+drk-drw

rw=rwir-drk+drw

dmz=Miz*dlz*(1+(ls/d2s))*SQRT(rz/(1-rwir))/ls/
&      SQRT(1-dzmie)/SIN(al3)

dmw=Miw*dlw*(1-(ls/d2s))*SQRT(rw*rw/SQRT(rw*rw)/(1-rwir))/ls/
&      SQRT(1-dzmie)/SIN(al3)

dzw=0.2

Mi2=1.0

w3=SQRT((c3*sin(al3)*c3*sin(al3))+((c3*cos(al3)-u)*(c3*cos(al3)-
&      u)))

beta3=ASIN(c3*sin(al3)/w3)

p4=TPWF1(10,H4s/1000,s00)*100000

H4p=TPWF1(6,s03,p4/100000)*1000

w4p=SQRT(w3*w3+2*(H3-H4p))

V4p=TPWF1(8,H4p/1000,P4/100000)

ro4p=1/V4p

w4=SQRT(1-dzw)*w4p

C4=SQRT((W4*SIN(beta4))**2+(W4*COS(beta4)-u)**2)

al4=ATAN(W4*SIN(beta4)/(W4*COS(beta4)-u))

H4=H4p+dzw*(H3+w3*w3/2-H4p)

T4s=TPWF1(7,H4s/1000,p4/100000)

T4p=TPWF1(7,H4p/1000,p4/100000)

T4=TPWF1(7,H4/1000,p4/100000)

s04=TPWF1(9,H4/1000,p4/100000)

```

```

a4=CSOUND(S04,P4/100000)

mach4=c4/a4

delm=proc*ro3*c3*s3*sin(al3)

sm=ro2*c2*s2*Sin(al2)

wm=mi2*pi*d2w*lw*ro4p*w4p*Sin(beta4)

dmz=dmz*sm

dmw=dmw*sm

dek=dzsp*(1-rwir)

dew=dzw*w4p*w4p/(c0*c0)

dewyl=c4*c4/(c0*c0)

etau=(1-dek-dew-dewyl)

etam=(1-dek-dew-dewyl)*(1-dmz-dmw)

RETURN
END

```

```

SUBROUTINE funcv(n,x,f)
INTEGER n
REAL x(n),f(n)
PARAMETER(Pi=3.1415)
REAL ls,lw,Miz,Miw,kv,km,Mi2
COMMON/PAR1/ H00,s00,c0,u,Uc0,
& dzkon,dzsp,dzmie,Kv,Km,Miz,Miw,proc,
& r1,s1,r2,S2,ls,d2s,r3,S3,lw,d2w,dlz,dlw,beta4

H1s=H00-x(1)*c0*c0/2

p1=TPWF1(10,H1s/1000,s00)*100000

H1=H1s+dzkon*(H00-H1s)

v1=TPWF1(8,H1/1000,P1/100000)

ro1=1/v1

c1=SQRT(2*(h00-h1))

s01=TPWF1(9,H1/1000,p1/100000)

H2s=H00-(x(1)+x(2))*c0*c0/2

```

```

p2=TPWF1(10,H2s/1000,s00)*100000
H2t=TPWF1(6,s01,p2/100000)*1000
H2=H2t+dzsp*(H00-H2t)
c2=SQRT(2*(h00-h2))
V2=TPWF1(8,H2/1000,P2/100000)
ro2=1/v2
s02=TPWF1(9,H2/1000,p2/100000)
al2=ACOS(c1*r1*kv/(r2*c2))
H4s=H00-(c0*c0/2)
H3s=H4s+x(3)*c0*c0/2
p3=TPWF1(10,H3s/1000,s00)*100000
H3l=TPWF1(6,s02,p3/100000)*1000
H3=H3l+dzmie*(H00-H3l)
c3=SQRT(2*(h00-h3))
V3=TPWF1(8,H3/1000,P3/100000)
ro3=1/v3
s03=TPWF1(9,H3/1000,p3/100000)
al3=0.5*Asin(Km*ro2/ro3*c2*c2/(c3*c3)*r2/r3*s2/s3*sin(2*al2))
drk=2*ls*(1-x(3))*(1-dzmie)*(COS(al3)*COS(al3))/d2s
drw=(2*(1-x(3))*lw*(1+Uc0**2-2*Uc0*COS(al3)*
&      SQRT(1-dzmie)*SQRT(1-x(3))-dzmie*(1-x(3))*beta4)/
&      (d2w*TAN(beta4)*(1+Uc0**2-Uc0*COS(al3)*SQRT(1-dzmie)*
&      SQRT(1-x(3))))
rz=x(3)+drk-drw
rw=x(3)-drk+drw
dmz=Miz*dlz*(1+(ls/d2s))*SQRT(rz/(1-x(3)))/ls/
&      SQRT(1-dzmie)/SIN(al3)

```

```

      dmw=Miw*dlw*(1-(ls/d2s))*SQRT(rw*rw/SQRT(rw*rw)/(1-x(3)))/ls/
&      SQRT(1-dzmie)/SIN(al3)

      dzw=0.2

      Mi2=1.0

      w3=SQRT((c3*sin(al3)*c3*sin(al3))+((c3*cos(al3)-u)*(c3*cos(al3)-
&      u)))

      p4=TPWF1(10,H4s/1000,s00)*100000

      H4p=TPWF1(6,s03,p4/100000)*1000

      w4p=SQRT(w3*w3+2*(H3-H4p))

      V4p=TPWF1(8,H4p/1000,P4/100000)

      ro4p=1/V4p

      delm=proc*ro3*c3*s3*sin(al3)

      f(1)=ro3*c3*s3*sin(al3)-mi2*pi*d2w*lw*ro4p*w4p*
&      sin(beta4)-delm

      f(2)=c3*ro3*s3*Sin(al3)-ro2*c2*s2*sin(al2)*(1-dmw-dmz)

      f(3)=ro2*c2*s2*Sin(al2)-ro1*c1*s1

      RETURN
      END

      SUBROUTINE broydn(x,n,check)
      INTEGER n,nn,NP,MAXITS
      REAL x(n),fvec,EPS,TOLF,TOLMIN,TOLX,STPMX
      LOGICAL check
      PARAMETER (NP=40,MAXITS=600,EPS=1.e-7,TOLF=1.e-2,TOLMIN=1.e-6,
&      *TOLX=EPS,STPMX=100.)
      COMMON /newtv/ fvec(NP),nn
CU      USES fdjac,fmin,lnsrch,qrdcmp,grupdt,rsolv
      INTEGER i,its,j,k
      REAL
den,f,fold,stpmax,sum,temp,test,c(NP),d(NP),fvcold(NP),g(NP),
&      *p(NP),qt(NP,NP),r(NP,NP),s(NP),t(NP),w(NP),xold(NP),fmin
      LOGICAL restrt,sing,skip
      EXTERNAL fmin
      nn=n
      f=fmin(x)
      test=0.
      do 11 i=1,n
          if(abs(fvec(i)).gt.test)test=abs(fvec(i))
11      continue

```

```

if(test.lt..01*TOLF)return
sum=0.
do 12 i=1,n
    sum=sum+x(i)**2
12  continue
    stpmax=STPMX*max(sqrt(sum),float(n))
    restrt=.true.
do 44 its=1,MAXITS
    if(restrt)then
        call fdjac(n,x,fvec,NP,r)
        call qrdcmp(r,n,NP,c,d,sing)
        if(sing) pause 'singular Jacobian in broydn'
        do 14 i=1,n
            do 13 j=1,n
                qt(i,j)=0.
13             continue
                qt(i,i)=1.
14             continue
            do 18 k=1,n-1
                if(c(k).ne.0.)then
                    do 17 j=1,n
                        sum=0.
                        do 15 i=k,n
                            sum=sum+r(i,k)*qt(i,j)
15                         continue
                            sum=sum/c(k)
                            do 16 i=k,n
                                qt(i,j)=qt(i,j)-sum*r(i,k)
16                             continue
17                             continue
                        endif
18                     continue
                    do 21 i=1,n
                        r(i,i)=d(i)
                        do 19 j=1,i-1
                            r(i,j)=0.
19                         continue
21                     continue
                else
                    do 22 i=1,n
                        s(i)=x(i)-xold(i)
22                     continue
                    do 24 i=1,n
                        sum=0.
                        do 23 j=i,n
                            sum=sum+r(i,j)*s(j)
23                         continue
                            t(i)=sum
24                     continue
                    skip=.true.
                    do 26 i=1,n
                        sum=0.
                        do 25 j=1,n

```

```

        sum=sum+qt(j,i)*t(j)
25      continue
        w(i)=fvec(i)-fvcold(i)-sum
        if(abs(w(i)).ge.EPS*(abs(fvec(i))+abs(fvcold(i)))) then
            skip=.false.
        else
            w(i)=0.
        endif
26      continue
        if(.not.skip) then
            do 28 i=1,n
                sum=0.
                do 27 j=1,n
                    sum=sum+qt(i,j)*w(j)
27                continue
                t(i)=sum
28            continue
            den=0.
            do 29 i=1,n
                den=den+s(i)**2
29            continue
            do 31 i=1,n
                s(i)=s(i)/den
31            continue
            call grupdt(r,qt,n,NP,t,s)
            do 32 i=1,n
                if(r(i,i).eq.0.) pause 'r singular in broydn'
                d(i)=r(i,i)
32            continue
        endif
    endif
    do 34 i=1,n
        sum=0.
        do 33 j=1,n
            sum=sum+qt(i,j)*fvec(j)
33        continue
        g(i)=sum
34    continue
    do 36 i=n,1,-1
        sum=0.
        do 35 j=1,i
            sum=sum+r(j,i)*g(j)
35        continue
        g(i)=sum
36    continue
    do 37 i=1,n
        xold(i)=x(i)
        fvcold(i)=fvec(i)
37    continue
    fold=f
    do 39 i=1,n
        sum=0.
        do 38 j=1,n

```

```

        sum=sum+qt(i,j)*fvec(j)
38      continue
        p(i)=-sum
39      continue
        call rsolv(r,n,NP,d,p)
        call lnsrch(n,xold,fold,g,p,x,f,stpmax,check,fmin)
        test=0.
        do 41 i=1,n
            if(abs(fvec(i)).gt.test)test=abs(fvec(i))
41      continue
        if(test.lt.TOLF)then
            check=.false.
            return
        endif
        if(check)then
            if(restrt)then
                return
            else
                test=0.
                den=max(f,.5*n)
                do 42 i=1,n
                    temp=abs(g(i))*max(abs(x(i)),1.)/den
                    if(temp.gt.test)test=temp
42      continue
                if(test.lt.TOLMIN)then
                    return
                else
                    restrt=.true.
                endif
            endif
        else
            restrt=.false.
            test=0.
            do 43 i=1,n
                temp=(abs(x(i)-xold(i)))/max(abs(x(i)),1.)
                if(temp.gt.test)test=temp
43      continue
            if(test.lt.TOLX)return
        endif
44      continue
        pause 'MAXITS exceeded in broydn'
        END

C  (C) Copr. 1986-92 Numerical Recipes Software 0)142+2:93Y+.
    FUNCTION fmin(x)
    INTEGER n,NP
    REAL fmin,x(*),fvec
    PARAMETER (NP=40)
    COMMON /newtv/ fvec(NP),n
    SAVE /newtv/
CU   USES funcv
    INTEGER i
    REAL sum

```

```

        call funcv(n,x,fvec)
        sum=0.
        do 11 i=1,n
            sum=sum+fvec(i)**2
11      continue
        fmin=0.5*sum
        return
        END

C  (C) Copr. 1986-92 Numerical Recipes Software 0)142+2:93Y+.
      SUBROUTINE fdjac(n,x,fvec,np,df)
      INTEGER n,np,NMAX
      REAL df(np,np),fvec(n),x(n),EPS
      PARAMETER (NMAX=40,EPS=1.e-4)
CU     USES funcv
      INTEGER i,j
      REAL h,temp,f(NMAX)
      do 12 j=1,n
          temp=x(j)
          h=EPS*abs(temp)
          if(h.eq.0.)h=EPS
          x(j)=temp+h
          h=x(j)-temp
          call funcv(n,x,f)
          x(j)=temp
          do 11 i=1,n
              df(i,j)=(f(i)-fvec(i))/h
11      continue
12      continue
      return
      END

C  (C) Copr. 1986-92 Numerical Recipes Software 0)142+2:93Y+.
      SUBROUTINE lnsrch(n,xold,fold,g,p,x,f,stpmax,check,func)
      INTEGER n
      LOGICAL check
      REAL f,fold,stpmax,g(n),p(n),x(n),xold(n),func,ALF,TOLX
      PARAMETER (ALF=1.e-4,TOLX=1.e-7)
      EXTERNAL func
CU     USES func
      INTEGER i
      REAL
a,alam,alam2,alamin,b,disc,f2,fold2,rhs1,rhs2,slope,sum,temp,
      *test,tmplam
      check=.false.
      sum=0.
      do 11 i=1,n
          sum=sum+p(i)*p(i)
11      continue
      sum=sqrt(sum)
      if(sum.gt.stpmax)then
          do 12 i=1,n
              p(i)=p(i)*stpmax/sum
12      continue

```

```

endif
slope=0.
do 13 i=1,n
    slope=slope+g(i)*p(i)
13 continue
test=0.
do 14 i=1,n
    temp=abs(p(i))/max(abs(xold(i)),1.)
    if(temp.gt.test)test=temp
14 continue
alamin=TOLX/test
alam=1.
1 continue
do 15 i=1,n
    x(i)=xold(i)+alam*p(i)
15 continue
f=func(x)
if(alam.lt.alamin)then
do 16 i=1,n
    x(i)=xold(i)
16 continue
check=.true.
return
else if(f.le.fold+ALF*alam*slope)then
    return
else
    if(alam.eq.1.)then
        tmplam=-slope/(2.*(f-fold-slope))
    else
        rhs1=f-fold-alam*slope
        rhs2=f2-fold2-alam2*slope
        a=(rhs1/alam**2-rhs2/alam2**2)/(alam-alam2)
        b=(-alam2*rhs1/alam**2+alam*rhs2/alam2**2)/(alam-alam2)
        if(a.eq.0.)then
            tmplam=-slope/(2.*b)
        else
            disc=b*b-3.*a*slope
            tmplam=(-b+sqrt(disc))/(3.*a)
        endif
        if(tmplam.gt..5*alam)tmplam=.5*alam
    endif
endif
alam2=alam
f2=f
fold2=fold
alam=max(tmplam,.1*alam)
goto 1
END

```

C (C) Copr. 1986-92 Numerical Recipes Software 0)142+2:93Y+

```

SUBROUTINE qrdcmp(a,n,np,c,d,sing)
INTEGER n,np
REAL a(np,np),c(n),d(n)

```

```

LOGICAL sing
INTEGER i,j,k
REAL scale,sigma,sum,tau
sing=.false.
scale=0.
do 17 k=1,n-1
  do 11 i=k,n
    scale=max(scale,abs(a(i,k)))
11  continue
    if(scale.eq.0.)then
      sing=.true.
      c(k)=0.
      d(k)=0.
    else
      do 12 i=k,n
        a(i,k)=a(i,k)/scale
12  continue
      sum=0.
      do 13 i=k,n
        sum=sum+a(i,k)**2
13  continue
      sigma=sign(sqrt(sum),a(k,k))
      a(k,k)=a(k,k)+sigma
      c(k)=sigma*a(k,k)
      d(k)=-scale*sigma
      do 16 j=k+1,n
        sum=0.
        do 14 i=k,n
          sum=sum+a(i,k)*a(i,j)
14  continue
          tau=sum/c(k)
          do 15 i=k,n
            a(i,j)=a(i,j)-tau*a(i,k)
15  continue
16  continue
      endif
17  continue
      d(n)=a(n,n)
      if(d(n).eq.0.)sing=.true.
      return
      END

C  (C) Copr. 1986-92 Numerical Recipes Software 0)142+2:93Y+.
SUBROUTINE grupdt(r,qt,n,np,u,v)
INTEGER n,np
REAL r(np,np),qt(np,np),u(np),v(np)
CU  USES rotate
    INTEGER i,j,k
    do 11 k=n,1,-1
      if(u(k).ne.0.)goto 1
11  continue
      k=1
1  do 12 i=k-1,1,-1

```

```

        call rotate(r,qt,n,np,i,u(i),-u(i+1))
        if(u(i).eq.0.) then
            u(i)=abs(u(i+1))
        else if(abs(u(i)).gt.abs(u(i+1))) then
            u(i)=abs(u(i))*sqrt(1.+(u(i+1)/u(i))**2)
        else
            u(i)=abs(u(i+1))*sqrt(1.+(u(i)/u(i+1))**2)
        endif
12    continue
        do 13 j=1,n
            r(1,j)=r(1,j)+u(1)*v(j)
13    continue
        do 14 i=1,k-1
            call rotate(r,qt,n,np,i,r(i,i),-r(i+1,i))
14    continue
        return
    END

C (C) Copr. 1986-92 Numerical Recipes Software 0)142+2:93Y+.
    SUBROUTINE rsolv(a,n,np,d,b)
    INTEGER n,np
    REAL a(np,np),b(n),d(n)
    INTEGER i,j
    REAL sum
    b(n)=b(n)/d(n)
    do 12 i=n-1,1,-1
        sum=0.
        do 11 j=i+1,n
            sum=sum+a(i,j)*b(j)
11    continue
        b(i)=(b(i)-sum)/d(i)
12    continue
    return
    END

C (C) Copr. 1986-92 Numerical Recipes Software 0)142+2:93Y+.
    SUBROUTINE rotate(r,qt,n,np,i,a,b)
    INTEGER n,np,i
    REAL a,b,r(np,np),qt(np,np)
    INTEGER j
    REAL c,fact,s,w,y
    if(a.eq.0.) then
        c=0.
        s=sign(1.,b)
    else if(abs(a).gt.abs(b)) then
        fact=b/a
        c=sign(1./sqrt(1.+fact**2),a)
        s=fact*c
    else
        fact=a/b
        s=sign(1./sqrt(1.+fact**2),b)
        c=fact*s
    endif
    do 11 j=i,n

```

```

        y=r(i,j)
        w=r(i+1,j)
        r(i,j)=c*y-s*w
        r(i+1,j)=s*y+c*w
11      continue
        do 12 j=1,n
            y=qt(i,j)
            w=qt(i+1,j)
            qt(i,j)=c*y-s*w
            qt(i+1,j)=s*y+c*w
12      continue
        return
        END
C  (C) Copr. 1986-92 Numerical Recipes Software 0)142+2:93Y+.

```

```

FUNCTION TPWF1(N,A,B)
REAL DTFK1,DTFK2,DTFK4,DTFK5
COMMON /NTPDTF/NR,TT,PP /TPDTF/ TC,PC /H2H1DT/ H2C,H1C
TC=.0
PC=.0
H2C=.0
H1C=.0
NR=N
TT=A
PP=B
106  IF(N-27) 102,105,101
101  IF(N-37) 105,105,102
102  IF(B) 103,103,105
103  CALL ERRDTF
      STOP
105  GOTO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,20,
&21,22,24,25,26,20,21,22,23,24,25,26,27,
&28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,
&41,42,43,44,44,46),N
1    TPWF1=DTFK1(1,A,B)
      RETURN
2    TPWF1=DTFK1(2,A,B)
      RETURN
3    TPWF1=DTFK1(3,A,B)
      RETURN
4    K=2
100  TPWF1=DTFK1(K,A+.5,B)-DTFK1(K,A-.5,B)
      RETURN
5    TPWF1=DTFK2(1,A,B)
      RETURN
6    TPWF1=DTFK2(2,A,B)
      RETURN
7    TPWF1=DTFK2(3,A,B)
      RETURN
8    TPWF1=DTFK2(4,A,B)
      RETURN

```

```
9      TPWF1=DTFK2 (5,A,B)
      RETURN
10     TPWF1=DTFK5 (1,A,B)
      RETURN
11     TPWF1=DTFK5 (2,A,B)
      RETURN
12     TPWF1=DTFK2 (11,A,B)
      RETURN
13     TPWF1=THSN (A,B)
      RETURN
20     TPWF1=DTFK2 (6,A,B)
      RETURN
21     TPWF1=DTFK2 (7,A,B)
      RETURN
22     TPWF1=DTFK2 (8,A,B)
      RETURN
23     TPWF1=DTFK2 (9,A,B)
      RETURN
24     TPWF1=DTFK2 (10,A,B)
      RETURN
25     TPWF1=DTFK5 (3,A,B)
      RETURN
26     TPWF1=DTFK5 (4,A,B)
      RETURN
27     TPWF1=PT (A)
      RETURN
28     TPWF1=TP (A)
      RETURN
29     TPWF1=DTFK4 (4,A)
200    PC=PT (A)
      RETURN
30     TPWF1=DTFK4 (5,A)
      GOTO 200
31     TPWF1=DTFK4 (7,A)
      TC=TP (A)
      RETURN
32     TPWF1=DTFK4 (9,A)
      RETURN
33     TPWF1=DTFK4 (10,A)
      RETURN
34     TPWF1=DTFK4 (8,A)
      RETURN
35     TPWF1=DTFK4 (1,A)
      GOTO 200
36     TPWF1=DTFK4 (2,A)
      GOTO 200
37     TPWF1=DTFK4 (3,A)
      GOTO 200
38     TPWF1=DTFK1 (4,A,B)
      RETURN
39     TPWF1=DTFK1 (5,A,B)
      RETURN
40     TPWF1=DTFK1 (6,A,B)
```

```

      RETURN
41    K=5
      GOTO 100
42    TPWF1=DTFK2(12,A,B)
      RETURN
43    TPWF1=THPW(A,B)
      RETURN
44    K=N-43
      TPWF1=VISK(K,A,B)
      RETURN
46    TPWF1=CSOUND(A,B)
      RETURN
      END

      REAL FUNCTION DTFK1(NR,T,P)
C      REAL DEXP,DLOG,DSQRT
      REAL FL,AG,AK,BTN,BOS,BOH,B9,BK,BG,FKONST,XTBK,
& BO,AGS,TB,TC,HZA,A1,AO,TC1,PC1,VC1,PVC1,PVTC1,TK,AGO,A11A5,
& A18T2,A19T3,A21T3,A22T4,A14T2,A15T10,A16T19,A22T20,A21A12,
& A22T21,A3M1,BGO,FI1,FL3T2,ZERO
      REAL TO,PO,VO,HO,X,PL,PPL,POR,HZ,SUM,HZ1,PDL,
& BT,T2,T6,T7,T10,T11,T17,T18,T19,T20,Y,Z,DY
      REAL TCL,XHZ,FZ
      DIMENSION FL(3),AG(21),AK(12),IL(3),IN(8),FZ(3,8),
&          BTN(6),BOS(3),BOH(2),B9(7),BK(2,3),BG(3,8),
&          FKONST(21),XTBK(2,3),BO(3),AGS(8),TB(3),TC(3),
&          HZA(3),TCL(2,3),XHZ(3,8)
      COMMON /C2TPWF/ TC1,PC1,VC1,PVC1,PVTC1,TK
      DATA A1,AO /5.248813248720659E-6,-2.4338362343331E-6/
      DATA ZERO /0.0E0/
      DATA FKONST /
&          1.E0,2.E0,3.E0,4.E0,5.E0,6.E0,
&          16.87675081E-1,32.17297297E-4,
&          9.E0,10.E0,11.E0,12.E0,
&          .2941176471E0,.4166666666E0,
&          .5862068965E0,.1416666666E1,
&          24.1196E-1,25.5384E-1,19.E0,
&          20.E0,14.68455698E-2/
C *****PODREGION 1*****
      DATA AGO
&/ 6.824687741E3 /
      DATA AG
&/ -5.422063673E2, -2.096666205E4,
& 3.941286787E4, -13.46655548E4,
& 29.70714308E4, -4.375647096E5,
& 42.95420834E4, -27.06701245E4,
& 9.926972482E4, -16.13816890E3,
& 7.982692717E0, -2.616571843E-2,
& 1.522411790E-3, 2.284279054E-2,
& 2.421647003E2, 1.269716088E-10,
& 2.074838328E-7, 2.174020350E-8,
& 1.105710498E-9, 1.293441934E1,

```

```

& 1.308119072E-5 /
DATA AK
&/ 8.438375405E-1, 5.362162162E-4,
& 1.72E0, 7.342278489E-2,
& 9.951717740E-2, 6.537154300E-1,
& 1.15E-6, 1.5108E-5,
& 1.4188E-1, 7.002753165E0,
& 2.995284926E-4, 2.04E-1 /
DATA AGS
&/ 7.882573574E4, -20.19983322E4,
& 39.60952411E4, -5.469558870E5,
& 51.54505E4, -31.57818119E4,
& 11.34511141E4, -18.15544002E3 /
DATA A11A5,A18T2
&/ 39.72075236E-2, 4.3480407E-8 /
& ,A19T3,A21T3
&/ 3.317131494E-9, 3.924357216E-5 /
& ,A22T4,A14T2
&/ 24.19050535E-14, 4.568558108E-2 /
& ,A15T10,A16T19
&/ 24.21647003E2, 24.12460567E-10 /
& ,A22T20,A21A12
&/ 120.9525268E-14, 2.668562907E-6 /
& ,A22T21,A3M1
&/ 127.0001531E-14, .72E0 /
C*****PODREGION 2*****
DATA IN
&/ 2,3,2,2,3,2,2,2 /
DATA IL
&/ 1,1,2 /
DATA FZ
&/ 13.E0, 3.E0, 0.E0,
& 18.E0, 2.E0, 1.E0,
& 18.E0, 10.E0, 0.E0,
& 25.E0, 14.E0, 0.E0,
& 32.E0, 28.E0, 24.E0,
& 12.E0, 11.E0, 0.E0,
& 24.E0, 18.E0, 0.E0,
& 24.E0, 14.E0, 0.E0 /
DATA BGO
&/ 1.683599274E1 /
DATA BO,BOH,BOS
&/ 2.856067796E1, -5.438923329E1,
& 4.330662834E-1, -13.09542339E-1,
& 25.69554617E-2, 8.661325668E-1,
& -19.64313509E-1, 34.26072823E-2 /
DATA BG
&/ 6.670375918E-2, 1.388983801E0,
& 0.0E0,
& 8.390104328E-2, 2.614670893E-2,
& -3.373439453E-2,
& 4.520918904E-1, 1.069036614E-1,
& 0.0E0,

```

```

& -5.975336707E-1, -8.847535804E-2,
& 0.0E0,
& 5.958051609E-1, -5.159303373E-1,
& 2.075021122E-1,
& 1.190610271E-1, -9.867174132E-2,
& 0.0E0,
& 1.683998803E-1, -5.809438001E-2,
& 0.0E0,
& 6.552390126E-3, 5.710218649E-4,
& 0.0E0 /
DATA B9
&/ 1.936587558E2, -1.388522425E3,
& 4.126607219E3, -6.508211677E3,
& 5.745984054E3, -2.693088365E3,
& 5.235718623E2 /
DATA BK
&/ 4.006073948E-1, 0.0E0,
& 8.636081627E-2, 0.0E0,
& -8.532322921E-1, 3.460208861E-1 /
DATA BTN
&/ 7.633333333E-1, 15.266666666E-1,
& 22.9E-1, 30.53333333E-1,
& 38.166666666E-1, 45.8E-1 /
DATA XTBK
&/ 5.608503527E0, 0.0E0,
& 1.640855509E0, 0.0E0,
& -46.07454377E0, 9.342563925E0 /
DATA FI1 / 4.260321148E0 /
DATA FL
&/ 1.574373327E1, -3.417061978E1,
& 1.931380707E1 /
DATA FL3T2 / 3.862761414E1 /
TO=(T+TK)/TC1
PO=P/PC1
IF(NR.GT.3)GOTO 50
C*****PODREGION 2*** PARA***
10 X=EXP((FKONST(1)-TO)*BTN(1))
XHZ(3,2)=X
XHZ(2,2)=X*X
XHZ(2,1)=X*XHZ(2,2)
XHZ(3,1)=XHZ(2,1)*XHZ(2,1)
XHZ(1,6)=XHZ(3,1)*XHZ(3,1)
XHZ(2,6)=XHZ(1,6)/X
XHZ(2,3)=XHZ(1,6)/XHZ(2,2)
XHZ(1,1)=XHZ(1,6)*X
XHZ(2,4)=XHZ(1,6)*XHZ(2,2)
XHZ(2,8)=XHZ(2,4)
XHZ(1,2)=XHZ(1,6)*XHZ(3,1)
XHZ(1,3)=XHZ(1,2)
XHZ(2,7)=XHZ(1,2)
XHZ(1,7)=XHZ(1,6)*XHZ(1,6)
XHZ(1,8)=XHZ(1,7)
XHZ(3,5)=XHZ(1,7)

```

```

XHZ (1, 4) = XHZ (1, 7) * X
XHZ (2, 5) = XHZ (2, 8) * XHZ (2, 8)
XHZ (1, 5) = XHZ (1, 2) * XHZ (2, 8)
HZA (1) = X * X
HZA (2) = HZA (1) * HZA (1)
HZA (3) = HZA (2) * HZA (2)
TCL (1, 1) = HZA (1) * HZA (2) * HZA (3)
HZA (1) = TCL (1, 1) * TCL (1, 1)
TCL (2, 3) = HZA (1) / X
TCL (1, 2) = TCL (2, 3) / HZA (3)
TCL (1, 3) = TCL (2, 3) * TCL (2, 3)
PL = (FL (3) * TO + FL (2)) * TO + FL (1)
PPL = (PO / PL) ** 10
POR = PC1 / P
HZ = POR * POR * POR
HZA (1) = HZ * POR
HZA (2) = HZA (1) * POR
HZA (3) = HZ * HZ
DO 12 M = 6, 8
M5 = M - 5
TB (M5) = ZERO
ILM = IL (M5)
DO 11 L = 1, ILM
11 TB (M5) = BK (L, M5) * TCL (L, M5) + TB (M5)
12 TB (M5) = TB (M5) + HZA (M5)
IF (NR . NE . 1) GOTO 22
C*****OBJETOSC***PARA***
13 VO = FI1 * TO / PO
SUM = ZERO
DO 15 MM = 1, 5
M = 6 - MM
INM = IN (M)
HZ1 = ZERO
DO 14 N = 1, INM
14 HZ1 = BG (N, M) * XHZ (N, M) + HZ1
IF (M . EQ . 1) GOTO 16
15 SUM = (HZ1 * FKONST (M) + SUM) * PO
16 VO = VO - SUM - HZ1
SUM = ZERO
DO 18 MM = 6, 8
M = 14 - MM
HZ = TB (M - 5)
HZ1 = ZERO
DO 17 N = 1, 2
17 HZ1 = BG (N, M) * XHZ (N, M) + HZ1
SUM = FKONST (M - 2) * HZ1 / (HZ * HZ) + SUM
IF (M . EQ . 6) GOTO 19
18 SUM = SUM * POR
19 VO = VO - SUM * HZA (2)
SUM = ZERO
DO 20 NN = 2, 7
N = 9 - NN
20 SUM = (B9 (N) + SUM) * X

```

```

SUM=SUM+B9(1)
VO=FKONST(11)*PPL*SUM+VO
DTFK1=VO*VC1
21  RETURN
C*****ENTALPIA LUB ENTROPIA*****
22  PDL=(FL3T2*TO+FL(2))*FKONST(10)/PL
    PPL=PO*PPL
    DO 24 M=6,8
    M5=M-5
    SUM=ZERO
    ILM=IL(M5)
    DO 23 L=1,ILM
23  SUM=XTBK(L,M5)*TCL(L,M5)+SUM
24  TC(M5)=SUM/TB(M5)
    IF(NR.EQ.3)GOTO 32
C*****ENTALPIA PARY*****
25  BT=BTN(1)*TO
    HO=BGO*TO
    SUM=(BOH(2)*TO+BOH(1))*TO
    SUM=(BO(3)+SUM)*TO*TO-BO(1)
    HO=HO-SUM
    SUM=ZERO
    DO 28 MM=1,5
    M=6-MM
    INM=IN(M)
    DO 27 N=1,INM
    HZ1=BG(N,M)*XHZ(N,M)
27  SUM=(FZ(N,M)*BT+FKONST(1))*HZ1+SUM
28  SUM=SUM*PO
    HO=HO-SUM
    DO 30 M=6,8
    M5=M-5
    SUM=ZERO
    DO 29 N=1,2
    HZ1=BG(N,M)*XHZ(N,M)
29  SUM=((FZ(N,M)-TC(M5))*BT+FKONST(1))*HZ1+SUM
30  HO=-SUM/TB(M5)+HO
    SUM=ZERO
    DO 31 NN=2,7
    N=9-NN
    HZ=(PDL+BTN(N-1))*TO+FKONST(1)
31  SUM=(HZ*B9(N)+SUM)*X
    SUM=(PDL*TO+FKONST(1))*B9(1)+SUM
    HO=PPL*SUM+HO+AO
    DTFK1=HO*PVC1
    GOTO 21
C*****ENTROPIA PARY*****
32  SO=-FI1*ALOG(PO)+ALOG(TO)*BGO
    SUM=ZERO
    DO 33 NN=3,5
    N=6-NN
33  SUM=(BOS(N)+SUM)*TO
    SO=SO-SUM-BO(2)

```

```

      HZA(1)=ZERO
      DO 35 MM=1,5
      M=6-MM
      INM=IN(M)
      DO 34 N=1, INM
34      HZA(1)=FZ(N,M)*BG(N,M)*XHZ(N,M)+HZA(1)
35      HZA(1)=HZA(1)*PO
      HZA(2)=ZERO
      DO 37 M=6,8
      M5=M-5
      SUM=ZERO
      DO 36 N=1,2
      HZ1=BG(N,M)*XHZ(N,M)
36      SUM=(FZ(N,M)-TC(M5))*HZ1+SUM
37      HZA(2)=SUM/TB(M5)+HZA(2)
      SO=(-HZA(1)-HZA(2))*BTN(1)+SO
      SUM=ZERO
      DO 38 NN=2,7
      N=9-NN
      HZ=PDL+BTN(N-1)
38      SUM=(HZ*B9(N)+SUM)*X
      SUM=PDL*B9(1)+SUM
      SO=PPL*SUM+SO-A1
      DTFK1=SO*PVTC1
      GOTO 21
C*****PODREGION 1 WODA*****
50      T2=TO*TO
      HZ=T2*T2
      T6=HZ*T2
      T7=T6*TO
      T10=HZ*T6
      T11=HZ*T7
      T17=T11*T6
      T18=T17*TO
      T19=T18*TO
      T20=T10*T10
      Y=-AK(1)*T2-AK(2)/T6+FKONST(1)
      Z=SQRT(AK(3)*Y*Y-FKONST(21)*TO+AK(5)*PO)+Y
      HZA(1)=EXP(-FKONST(13)*ALOG(Z))
      HZA(2)=AK(6)-TO
      HZA(3)=AK(7)+T19
      TB(1)=AK(8)+T11
      TB(2)=AK(10)+PO
      IF(NR.GT.4)GOTO 51
C*****OBJETOSC WODY*****
      VO=A11A5*HZA(1)+AG(12)
      VO=(AG(14)*TO+AG(13))*TO+VO
      VO=HZA(2)**10*AG(15)+AG(16)/HZA(3)+VO
      VO=VO-((A19T3*PO+A18T2)*PO+AG(17))/TB(1)
      HZ=AK(9)+T2
      VO=VO-(-FKONST(3)/TB(2)**4+AK(11))*AG(20)*T18*HZ
      HZ=A22T4*PO/T20
      VO=((AK(12)-TO)*A21T3+HZ)*PO*PO+VO

```

```

      DTFK1=VO*VC1
      GOTO 21
C*****ENTALPIA LUB ENTROPIA WODY*****
51    DY=-FKONST(7)*TO+FKONST(8)/T7
      TB(3)=( (AG(19)*PO+AG(18))*PO+AG(17))*PO/(TB(1)*TB(1))
      TC(1)=(FKONST(1)/TB(2)**3+AK(11)*PO)*AG(20)
      HZA(3)=HZA(3)*HZA(3)
      IF(NR.EQ.6) GOTO 53
C*****ENTALPIA WODY*****
      HO=AGO*TO
      SUM=ZERO
      DO 52 NN=3,10
      N=13-NN
52    SUM=(AG(N)+SUM)*TO
      SUM=SUM*TO-AG(1)
      HO=HO-SUM
      HZ=(FKONST(15)*Z-FKONST(16)*Y+FKONST(14)*TO*DY)*Z
      HZ=(-A3M1*Y*DY+AK(4))*TO+HZ
      HO=AG(11)*HZ*HZA(1)+HO
      HZ1=(FKONST(9)*TO+AK(6))*AG(15)*HZA(2)**9
      HZ1=-AG(14)*T2+AG(12)+HZ1
      HZ1=(FKONST(20)*T19+AK(7))*AG(16)/HZA(3)+HZ1
      HZ=(FKONST(12)*T11+AK(8))*TB(3)
      HO=HO-HZ
      HO=(FKONST(19)*T2+FKONST(17))*T18*TC(1)+HO
      HZ=A22T21*PO/T20
      HO=((A21A12+HZ)*PO*PO+HZ1)*PO+HO+AO
      DTFK1=HO*PVC1
      GOTO 21
C*****ENTROPIA WODY*****
53    SO=AGO*ALOG(TO)
      SUM=ZERO
      DO 54 NN=3,10
      N=11-NN
54    SUM=(AGS(N)+SUM)*TO
      SUM=AG(2)+SUM
      SO=SO-SUM
      HZ=FKONST(14)*Z-A3M1*Y
      SO=(HZ*DY+AK(4))*AG(11)*HZA(1)+SO
      HZ1=A15T10*HZA(2)**9
      HZ1=-A14T2*TO-AG(13)+HZ1
      HZ1=A16T19*T18/HZA(3)+HZ1
      HZ=FKONST(11)*T10*TB(3)
      SO=SO-HZ
      SO=(FKONST(20)*T2+FKONST(18))*T17*TC(1)+SO
      HZ=A22T20*PO/(T20*TO)
      SO=((AG(21)+HZ)*PO*PO+HZ1)*PO+SO-A1
      DTFK1=SO*PVTCL
      GOTO 21
      END

```

```

      REAL FUNCTION DTFK2(K,A,B)

```

```

COMMON /TPDTF/ T,PC /H2H1DT/ H2C,H1C
COMMON /C1TPWF/ TC1,PC1,VC1,HC1,SC1,TK
GOTO (1,2,3,4,5,6,6,7,7,7,8,9),K
C*****T(S,P) PARA PRZEGRZANA*****
1      H=HSPD(A,B)
31     DTFK2=THPD(H,B)
      RETURN
C*****H(S,P) PARA PRZEGRZANA*****
2      DTFK2=HSPD(A,B)
      T=THPD(DTFK2,B)
      RETURN
C*****T(H,P) PARA PRZEGRZANA*****
3      H=A
      GOTO 31
C*****V(H,P) PARA PRZEGRZANA*****
4      T=THPD(A,B)
      DTFK2=DTFK1(1,T,B)
      RETURN
C*****S(H,P) PARA PRZEGRZANA*****
5      T=THPD(A,B)
      X1=-5.11+1.92*ALOG(A-2020.)-.4614862*ALOG(B)
      Y1=HSPD(X1,B)
      GOTO 34
C*****T(S,P) H(S,P) PARA WILGOTNA LUB PRZEGRZANA*****
6      IF(B.GT.165.35)GOTO 17
      H2C=DTFK4(10,B)
      IF(A.GT.H2C)GOTO 17
C*****T(S,P) H(S,P) PARA WILGOTNA*****
      IF(K.EQ.6)GOTO 18
      DTFK2=DTFK4(6,T)+(T+TK)*A
29     H1C=DTFK4(2,T)
      RETURN
18     H1C=1.
      DTFK2=T
      RETURN
C*****T(S,P) H(S,P) PARA PRZEGRZANA*****
17     IF(K.EQ.6)GOTO 1
      GOTO 2
C*****T(H,P) V(H,P) S(H,P) PARA PRZEGRZANA LUB WILGOTNA*****
7      IF(B.GT.165.35)GOTO 19
      H2C=DTFK4(9,B)
      IF(A.GT.H2C)GOTO 19
      IF(K-9) 18,25,26
C*****V(H,P) PARA WILGOTNA*****
25     V1=DTFK4(1,T)
      V2=DTFK4(7,B)
      H1C=DTFK4(2,T)
      DTFK2=V1+(A-H1C)*(V2-V1)/(H2C-H1C)
      RETURN
C*****S(H,P) PARA WILGOTNA*****
26     DTFK2=(A-DTFK4(6,T))/(T+TK)
      GOTO 29
C*****T(H,P) V(H,P) S(H,P) PARA PRZEGRZANA*****

```

```

19      IF(K-9) 3,4,5
C*****H(T,S) PARA WILGOTNA*****
8       DTFK2=DTFK4(6,A)+(A+TK)*B
        PC=PT(A)
        T=A
        GOTO 29
C*****T(S,P)*****
9       X1=(((-1.405421)*A+(4.313320E-3*B+13.51008))*A
& +(-1.900882E-3*B+61.72482))*A
        Y1=DTFK1(6,X1,B)
34      X2=.99*X1
        DO 27 I=1,50
        IF(ABS(Y1-A)/A.LE.1E-5)GOTO 32
        IF(K.EQ.12) Y2=DTFK1(6,X2,B)
        IF(K.NE.12) Y2=HSPD(X2,B)
        HZ=Y1-Y2
        IF(HZ.NE.0.)GOTO 33
        X2=.99*X2
        GOTO 27
33      DTFK2=(X2-X1)*(Y1-A)/HZ+X1
        X1=X2
        X2=DTFK2
        Y1=Y2
        IF(ABS(X2-X1)/X1.LE.1E-3)GOTO 28
27      CONTINUE
        CALL ERRDTF
32      DTFK2=X1
28      RETURN
        END

```

```

REAL FUNCTION DTFK4(K,X)
COMMON /TPDTF/ T,P
COMMON /C1TPWF/ TC1,PC1,VC1,HC1,SC1,TK
DIMENSION A(12,6),V1(11),H1(10),S1(11),H2(11),S2(12),U1(7)
DIMENSION B(5,2),C(5,2),B1(5),B2(5),C1(5),C2(5)
DIMENSION GRD1(6)
EQUIVALENCE (SUM,A(12,1)),(M,A(11,2)),(MM,A(12,2)),
& (L,A(12,3)),(LL,A(12,4)),(XX,A(8,6)),(TT,A(9,6)),
& (SUM1,A(10,6)),(SUM2,A(11,6)),(KK,A(12,6))
DATA V1/
& .3155901296E0,      -.3592060636E-1,
& .2396625841E1,      -.3639240662E2,
& .4136745246E3,      -.2911342409E4,
& .1284466533E5,      -.3554355367E5,
& .5992507856E5,      -.5626661248E5,
& .2258558000E5 /
DATA H1/
& -.1654903957E-2,    .3917685214E2,
& -.2188690656E2,    .3756279695E3,
& -.3515858806E4,    .1958269621E5,
& -.6501332671E5,    .1274040873E6,
& -.1359376648E6,    .6112873019E5 /

```

```

DATA S1/
& -.6785743368E-3, .9202466330E2,
& -.1194517682E3, .2173387345E3,
& .4676361526E3, -.1008136153E5,
& .6185728234E5, -.2043498190E6,
& .3860518101E6, -.3926007257E6,
& .1673567598E6 /
DATA H2/
& .3567374099E2, .1739414792E2,
& -.2801525240E2, .6613183269E3,
& -.8966974519E4, .6718723890E5,
& -.3086805377E6, .8797038209E6,
& -.1516683940E7, .1448691008E7,
& -.5890879741E6 /
DATA S2/
& .8453699469E2, -.1598812786E3,
& .4759846681E3, -.1088680848E4,
& .9000660030E3, .3646679644E4,
& .2630070860E4, -.1528720393E6,
& .7238426463E6, -.1595330649E7,
& .1758861554E7, -.7842055818E6 /
DATA U1/
& .2295206797E-3, -.2617057106E-1,
& -.4533104003E2, .3331372969E2,
& -.3004205011E2, .2261148113E2,
& -.9075359582E1 /
DATA B1/
& 1.697093829E0, -5.617621757E-1,
& 5.269778157E-2, -1.008680326E-3,
& -2.676270860E-5 /
DATA B2/
& 2.698135410E3, 3.146565603E3,
& 1.629355003E3, 3.898210761E2,
& 3.62500388E1 /
DATA C1/
& 1.001961802E0, -3.962513478E-1,
& 5.442647575E-2, -2.728684863E-3,
& 0.0E0 /
DATA C2/
& 1.0E0, 1.215797854E0,
& 6.608333746E-1, 1.669207956E-1,
& 1.712577539E-2 /
DATA GRD1 /10.,9.,10.,10.,11.,6./
DO 1 I=1,11
A(I,1)=V1(I)
A(I,3)=S1(I)
A(I,4)=H2(I)
1 CONTINUE
DO 2 I=1,10
A(I,2)=H1(I)
2 CONTINUE
DO 3 I=1,12
A(I,5)=S2(I)

```

```

3      CONTINUE
      DO 4 I=1,7
      A(I,6)=U1(I)
4      CONTINUE
      DO 5 I=1,5
      B(I,1)=B1(I)
      B(I,2)=B2(I)
      C(I,1)=C1(I)
      C(I,2)=C2(I)
5      CONTINUE
      IF(K.GT.6) GOTO 33
      KK=K
      XX=X
55     TT=XX/TC1
      L=GRD1(KK)
      LL=L+1
      SUM=A(LL,KK)
      DO 100 MM=1,L
      M=LL-MM
100    SUM=SUM*TT+A(M,KK)
      GOTO (50,51,52,51,52,51),KK
50     DTFK4=SUM*VC1
      RETURN
51     DTFK4=SUM*HC1
      RETURN
52     DTFK4=SUM*SC1
      RETURN
33     IF(K.GT.8) GOTO 44
      KK=K-6
      SUM1=B(5,KK)
      SUM2=C(5,KK)
      XX=X-7.1877
      IF(K.EQ.7) XX=ALOG(X)
      DO 200 MM=1,4
      M=5-MM
      SUM1=SUM1*XX+B(M,KK)
200    SUM2=SUM2*XX+C(M,KK)
      DTFK4=SUM1/SUM2
      IF(K.EQ.7) DTFK4=DTFK4/X
      RETURN
44     XX=TP(X)
      KK=K-5
      T=XX
      GOTO 55
      END

      REAL FUNCTION DTFK5(K,H,S)
      COMMON /TPDTF/ TC,PC /H2H1DT/ H2C,H1C
      GOTO (1,1,7,7),K
1      HA=ALOG(H-2020.)
      X1=EXP((-5.11-S+1.92*HA)/.4614862)
      Y1=HSPD(S,X1)

```

```

      X2=.99*X1
      DO 11 I2=1,50
      IF (ABS (Y1-H) /H.LE.1.E-5) GOTO 3
      Y2=HSPD (S,X2)
      HZ=Y1-Y2
      IF (HZ.NE.0.) GOTO 12
      X2=.99*X2
      GOTO 11
12    DTFK5= (X2-X1) * (Y1-H) /HZ+X1
      X1=X2
      X2=DTFK5
      Y1=Y2
      IF (ABS (X2-X1) /X1.LE.1.E-3) GOTO 4
11    CONTINUE
      CALL ERRDTF
3     DTFK5=X1
4     TC=THPD (H,DTFK5)
      IF (K.EQ.2.OR.K.EQ.4) GOTO 15
      RETURN
7     IF (S.GE.5.21766) GOTO 9
8     TC=THSN (H,S)
      IF (K.EQ.4) GOTO 13
      DTFK5=PC
      RETURN
13    H2C=DTFK4 (4,TC)
      V2=DTFK4 (7,PC)
      V1=DTFK4 (1,TC)
      DTFK5=V1+ (H-H1C) * (V2-V1) / (H2C-H1C)
      RETURN
9     H2S=DTFK4 (8,S)
      IF (H-H2S) 8,8,1
15    PC=DTFK5
      DTFK5=DTFK1 (1,TC,PC)
      RETURN
      END

```

```

      REAL FUNCTION THSN (H,S)
      COMMON /TPDTF/ TC,PC /H2H1DT/ H2C,H1C
      COMMON /C1TPWF/ TC1,PC1,VC1,HC1,SC1,TK
      X1=1.105* (H/S-TK)
      Y1=DTFK4 (6,X1)+S* (X1+TK)
      X2=.99*X1
      IF (X1.EQ.0.) X2=-1.
      DO 1 IZ=1,50
      IF (ABS (Y1-H) /H.LE.1.E-5) GOTO 3
      Y2=DTFK4 (6,X2)+S* (X2+TK)
      HZ=Y1-Y2
      IF (HZ.NE.0.) GOTO 2
      X2=.99*X2
      GOTO 1
2     THSN= (X2-X1) * (Y1-H) /HZ+X1
      X1=X2

```

```

X2=THSN
Y1=Y2
HZ=X2-X1
IF (X1.NE.0.) HZ=HZ/X1
IF (ABS (HZ) .LE.1.E-3) GOTO 4
1  CONTINUE
   CALL ERRDTF
3   THSN=X1
4   PC=PT (THSN)
   H1C=DTFK4 (2, THSN)
   RETURN
   END

```

```

REAL FUNCTION THPD (H, P)
REAL Q, R, RR, Z, SUD1, SUD2, A, A1, A2, A3, A4, TC1, XD, TK
COMMON /C1TPWF/ X, PC1, VC1, HC1, SC1, Y
COMMON /C2TPWF/ TC1, XD (4), TK
DIMENSION A (11, 7), B (8), C (8)
DIMENSION A1 (20), A2 (20), A3 (20), A4 (17)
EQUIVALENCE (SUM1, SUD1), (SUM2, SUD2)
DATA A1
&/ 4.305225118E-2, -7.723067516E-1,
& -1.522923808E1, 1.309388021E3,
& 1.096567780E5, -2.191339742E6,
& -3.533231226E8, 1.352258250E9,
& 4.982529836E11, -2.366220807E11,
& -2.486323813E14, -1.898384505E-1,
& -7.557601375E0, 1.547929230E3,
& 4.666063957E5, -3.264160468E6,
& -1.444940312E9, 3.005092661E8,
& 1.936991208E12, 1.236508815E13 /
DATA A2
&/ -9.720532701E14, -1.114074886E16,
& 4.332990354E1, 5.240288877E3,
& -1.574318876E4, -5.351226645E7,
& -4.095119172E8, 1.575769069E11,
& 1.992495287E12, -2.047353873E14,
& -3.838300890E15, 9.970384240E16,
& 2.372644496E18, -1.542049219E3,
& -2.569056295E5, -2.596716736E6,
& 2.158931E9, 2.861238456E10,
& -6.366144234E12, -1.053884296E14 /
DATA A3
&/ 8.309127135E15, 1.792965351E17,
& -4.033321573E18, -1.052358948E20,
& 2.287724037E4, 5.365978947E6,
& 1.060881335E8, -4.151300829E10,
& -7.297467145E11, 1.243469195E14,
& 2.368980195E15, -1.644929153E17,
& -3.759995751E18, 8.02540457E19,
& 2.135937313E21, -1.398366215E5,
& -5.132195246E7, -1.487687261E9,

```

```

&      3.857211984E11,      8.398007544E12 /
DATA A4
&/ -1.183336502E15,      -2.527197379E16,
&      1.592118850E18,      3.817635604E19,
&      -7.834726229E20,      -2.111485982E22,
&      2.571446674E5,      1.859909782E8,
&      7.102455086E9,      -1.394737585E12,
&      -3.634803818E13,      4.403905396E15,
&      1.045620876E17,      -6.035375187E18,
&      -1.524231111E20,      2.999858425E21,
&      8.244704692E22 /
DATA B
&/ -5.710515922E-4,      2.419948965E1,
&      -2.212342761E5,      8.289134683E8,
&      -1.591524899E12,      1.648795194E15,
&      -8.754204562E17,      1.866854438E20 /
DATA C
&/ 3.550081734E1,      9.962916254E3,
&      -4.258368267E7,      1.185488064E11,
&      -1.956581895E14,      1.852574416E17,
&      -9.271966533E19,      1.896945411E22 /
I=1
DO 1 K=1,2
DO 2 J=1,11
A(J,K)=A1(I)
I=I+1
IF(I.EQ.21)GOTO 3
2 CONTINUE
1 CONTINUE
3 A(10,2)=A2(1)
A(11,2)=A2(2)
I=3
DO 4 K=3,4
DO 5 J=1,11
A(J,K)=A2(I)
I=I+1
IF(I.EQ.21)GOTO 6
5 CONTINUE
4 CONTINUE
6 I=1
K=4
DO 7 J=8,11
A(J,K)=A3(I)
I=I+1
7 CONTINUE
I=5
DO 8 K=5,6
DO 11 J=1,11
A(J,K)=A3(I)
I=I+1
IF(I.EQ.21)GOTO 12
11 CONTINUE
8 CONTINUE

```

```

12      K=6
        I=1
        DO 14 J=6,11
          A(J,K)=A4(I)
          I=I+1
14      CONTINUE
        I=7
        K=7
        DO 15 J=1,11
          A(J,K)=A4(I)
          I=I+1
15      CONTINUE
        PO=P/PC1
        HO=H/HC1
        Q=EXP(.01*P**.3)-1.0311711E0
        R=HO-26.
        RR=1.E0/R
        IF(P.GE.0.26)GOTO 50
        SUM1=B(8)
        SUM2=C(8)
        DO 9 KK=1,7
          K=8-KK
          SUM1=PO*SUM1+B(K)
9          SUM2=PO*SUM2+C(K)
          Z=SUM1*(1.-(HO-SUM2)/(.4+HO-SUM2))
          GOTO 51
50      Z=.0E0
51      SUD2=.0E0
        DO 10 NN=1,7
          N=8-NN
          SUD1=.0E0
          DO 20 MM=1,11
            M=12-MM
20          SUD1=SUD1*Q+A(M,N)
10          SUD2=SUD2*RR+SUD1
          THPD=(SUD2*R+Z)*TC1-TK
          RETURN
        END

```

```

      REAL FUNCTION THPW(H,P)
      COMMON /C1TPWF/ TC1,PC1,VC1,HC1,SC1,TK
      DIMENSION B(7,8),B1(20),B2(20),B3(16)
      DATA B1
&/      -3.444174262E-5,      -8.146780446E-3,
&      -7.310113575E-4,      7.729951536E-4,
&      -3.357281163E-4,      3.601227690E-5,
&      5.349819785E-6,      2.585230596E-2,
&      4.851204925E-5,      2.298866218E-3,
&      -2.875478637E-3,      1.450975892E-3,
&      -2.705791877E-4,      6.490712155E-6,
&      2.499175501E-5,      2.399945375E-4,
&      -1.368731256E-3,      1.784325209E-3,

```

```

&      -9.675392509E-4,      2.144482146E-4 /
DATA B2
&/    -1.311066628E-5,      -2.477708316E-6,
&      -6.178011485E-5,      3.085386643E-4,
&      -4.162218770E-4,      2.386022183E-4,
&      -5.894248656E-5,      4.797764129E-6,
&      -3.754924903E-7,      6.825691491E-6,
&      -3.154292470E-5,      4.358800222E-5,
&      -2.602574119E-5,      6.893734105E-6,
&      -6.434285551E-7,      2.518490213E-8,
&      -3.373124856E-7,      1.478308144E-6,
&      -2.076036376E-6,      1.277027847E-6 /
DATA B3
&/    -3.546269337E-7,      3.581469782E-8,
&      -8.352932818E-10,      6.357046291E-9,
&      -2.5956497E-8,      3.679785426E-8,
&      -2.315865189E-8,      6.658834148E-9,
&      -7.08731721E-10,      -6.378507579E-13,
&      -6.027623527E-14,      5.931833896E-12,
&      -1.155299211E-11,      8.940257306E-12,
&      -3.136025878E-12,      4.148240446E-13 /
I=1
DO 1 K=1,3
DO 2 J=1,7
B(J,K)=B1(I)
I=I+1
IF(I.EQ.21)GOTO 3
2  CONTINUE
1  CONTINUE
3  B(7,3)=B2(1)
I=2
DO 4 K=4,6
DO 5 J=1,7
B(J,K)=B2(I)
I=I+1
IF(I.EQ.21)GOTO 7
5  CONTINUE
4  CONTINUE
7  B(6,6)=B3(1)
B(7,6)=B3(2)
I=3
DO 8 K=7,8
DO 9 J=1,7
B(J,K)=B3(I)
I=I+1
IF(I.EQ.17)GOTO 11
9  CONTINUE
8  CONTINUE
11 PO=P/PC1
HO=H/HCl
SUM2=.0
DO 10 MM=1,8
M=9-MM

```

```

SUM1=.0
DO 20 NN=1,7
N=8-NN
20 SUM1=SUM1*PO+B(N,M)
10 SUM2=SUM2*HO+SUM1
THPW=SUM2*TC1
RETURN
END

REAL FUNCTION HSPD(S,P)
REAL C,C1,C2,C3,C4,PO,SO,SUM1,SUM2,Q,R
REAL TC1,PC1,VC1,HC1,SC1,TK
COMMON /C2TPWF/ TC1,PC1,VC1,HC1,SC1,TK
DIMENSION C(12,4),C1(12),C2(12),C3(12),C4(12)
DATA C1
&/ 4.378106467E1, 9.166217127E1,
& 2.0272039E2, 1.213201248E2,
& -5.283971160E2, 5.660693979E2,
& 2.915670095E4, 7.260796018E4,
& -7.002861724E5, -2.825613205E6,
& 4.768340071E6, 2.393482967E7 /
DATA C2
&/ 8.874756374E-1, 5.018858106E0,
& 8.774288629E0, -8.128857837E0,
& 2.105749319E1, 6.812050541E2,
& 2.698765999E3, -1.055929824E4,
& -1.205965451E5, -1.807398936E5,
& 1.071540052E6, 3.011461969E6 /
DATA C3
&/ 2.337957563E-2, 1.114977505E-1,
& -1.384034875E-2, 3.669366799E-1,
& 8.561023559E0, 2.937538529E1,
& -1.298438161E2, -1.521397141E3,
& -3.16306707E3, 1.244005439E4,
& 4.946328881E4, 2.126123308E4 /
DATA C4
&/ 4.00388008E-4, 6.704666297E-4,
& 4.683198438E-3, 2.252723857E-2,
& 7.757582345E-3, 1.420279119E0,
& -8.289447074E-1, -1.069598773E2,
& -8.945499543E1, 2.112930033E3,
& 1.346787503E3, -1.447443850E4 /
DO 1 I=1,12
C(I,1)=C1(I)
C(I,2)=C2(I)
C(I,3)=C3(I)
C(I,4)=C4(I)
1 CONTINUE
PO=P/PC1
SO=S/SC1
Q=EXP(ALOG(PO)/20.E0)
Q=Q-.81725E0

```

```

R=SO-70.E0
SUM2=.0E0
DO 10 MM=1,4
M=5-MM
SUM1=.0E0
DO 20 NN=1,12
N=13-NN
20 SUM1=SUM1*Q+C(N,M)
10 SUM2=SUM2*R+SUM1
HSPD=SUM2*HC1
RETURN
END

REAL FUNCTION VISK(K,T,P)
COMMON /C1TPWF/ TC1,PC1,VC1,HC1,SC1,TK
COMMON /H2H1DT/ H2C,H1C
DIMENSION A(5),B(3),C(3),D(3)
DATA A
&/ 2.414E2, 3.828209486E-1,
& 2.162830218E-1, 1.498693949E-1,
& 4.711880117E-1 /
DATA B
&/ 2.634511E2, 4.219836243E-1,
& 8.04E1 /
DATA C
&/ 5.861198738E2, 1.204753943E3,
& 4.219836243E-1 /
DATA D
&/ 1.113564669E2, 6.732080129E1,
& 3.205147019E0 /
TO=(T+TK)/TC1
IF(K.EQ.2)GOTO 1
HZ=(A(2)/(TO-A(3)))
H2C=DTFK1(4,T,P)
H1C=A(1)*10.**HZ*(1.+(P-PT(T))/PC1)*A(4)*(TO-A(5))*1.E-7
2 VISK=H1C*H2C
RETURN
1 H2C=DTFK1(1,T,P)
HZ=B(1)*(TO-B(2))+B(3)
IF(P.GT.1.)GOTO 3
H1C=HZ*1.E-7
GOTO 2
3 PS=VC1/H2C
IF(T.GT.340.)GOTO 4
H1C=(HZ-PS*(C(1)-C(2)*(TO-C(3))))*1.E-7
GOTO 2
4 SUM=((D(3)*PS+D(2))*PS+D(1))*PS
H1C=(SUM+HZ)*1.E-7
GOTO 2
END

```

```

REAL FUNCTION PT(T)
COMMON /C1TPWF/ TC1,PC1,VC1,HC1,SC1,TK
DIMENSION FK(9)
DATA FK
&/ -7.691234564E0, -2.608023696E1,
& -1.681706546E2, 6.423285504E1,
& -1.189646225E2, 4.16711732E0,
& 2.09750676E1, 1.0E9,
& 6.E0 /
TO=(T+TK)/TC1
SUM=.0
TM1=1.0-TO
DO 110 I=1,5
J=6-I
110 SUM=(FK(J)+SUM)*TM1
D1=(1.+(FK(6)+FK(7)*TM1)*TM1)*TO
D2=TM1/(FK(8)*TM1*TM1+FK(9))
BK=EXP(SUM/D1-D2)
PT=BK*PC1
RETURN
END

REAL FUNCTION TP(P)
IF(P.GT.221.2)GOTO 199
X=ALOG(P)
TP=((((-3.50535247E-2*X+4.111175708E-1)*X-2.593882099E0)*X
& -7.929713402E0)*X+1.051533370E2)/
& (((1.411239257E-4*X-4.201029562E-3)*X+5.392385437E-2)*X
& -3.756577128E-1)*X+1.055431157E0)
RETURN
199 CALL ERRDTF
STOP
END

REAL FUNCTION CSOUND(S,P)
COMMON /TPDTF/ TC,PC
COMMON /H2H1DT/ H2C,H1C
HZ=DTFK2(7,S,P)
T=TC
HSTR=H1C
IF(H1C.GT.0.)GOTO 1
V=DTFK1(1,T,P)
PS=1.05*P
TS=DTFK2(1,S,PS)
VS=DTFK1(1,TS,PS)
HZ=.4879016E-1
GOTO 3
1 V=DTFK2(9,HZ,P)
PS=.95*P
HZ=DTFK2(7,S,PS)
VS=DTFK2(9,HZ,PS)

```

```

3      HZ=-.5129329E-1
      PC=HZ/ALOG(V/VS)
      CSOUND=SQRT(1.E5*PC*P*V)
      TC=T
      H2C=V
      H1C=HSTR
      RETURN
      END

      BLOCK DATA
      REAL D
      COMMON /C2TPWF/ D(6)
      COMMON /C1TPWF/ TC1,PC1,VC1,HC1,SC1,TK
      DATA D
&/ 647.3E0, 221.2E0, 3.17E-3,
& 70.1204E0, .1083275143E0, 273.15E0 /
      DATA TC1,PC1,VC1,HC1,SC1,TK
&/ 647.3E0, 221.2E0, 3.17E-3,
& 70.1204E0, .1083275143E0, 273.15E0 /
      END

      SUBROUTINE ERRDTF
      COMMON /NTPDTF/ NR,TT,PP
      NT=0
      WRITE(NT,1)NR,TT,PP
      STOP
1     FORMAT(17HDAMPFTAFEL FEHLER/,I3,2(1H,,E20.8),1H/)
      RETURN
      END

```