

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

مدرسة الوطنية للتكنولوجيا
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

1e5

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE DE TURBINE A VAPEUR A AUBES EXTRALONGUES

Proposé par :
A. Gahmousse

Etudié par :
R. Bennacer

Dirigé par :
A. Gahmousse

PROMOTION : **Juin 89**

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE DE TURBINE A VAPEUR A AUBES EXTRALONGUES

Proposé par :
A. Gahmousse

Étudié par :
R. Bennacer

Dirigé par :
A. Gahmousse

PROMOTION : Juin 89

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قُلْ إِنَّ صَلَاتِي وَنُسُكِي

وَمَحْيَايَ وَمَمَاتِي لِلَّهِ رَبِّ

الْعَالَمِينَ ۝ لَا شَرِيكَ لَهُ ۝

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

- A mon père pour les soins qu' il a
prêté à ma formation et à mon éduca-
tion , lui qui m' a encouragé dans mes
études
- A ma mère qui s' est sacrifiée pour
me voir atteindre ce but
- A mon frère et à toutes mes sœurs
- A toute ma famille
- A tous mes amis

R . Bennacer

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes remerciements profonds
à tous ceux qui ont contribué à ma formation , et
dont l'aide et le soutien moral m'ont été très bé-
nèfiques , et surtout à Monsieur A. GAHMUSSE dont
les conseils m'ont été très utiles à la réa-
lisation de ce modeste travail . Qu'ils veuillent
bien trouver ici l'expression de ma gratitude .

R . Bennacer

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE
PROMOTEUR : Monsieur A.GAHMOUSSE
ELEVE INGENIEUR : Monsieur R.BENNACER

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

الموضوع : دراسة عنفة بخارية ذات جنبيحات طويلة
الملخص : هذا المشروع يهدف الى دراسة الشكل الالتوائي للجنبيحات
الطويلة تحديد تغييرات خصائصها الهندسية
بالأضافة الى درجة رد الفعل .
اعداد برنامج معلوماتي يسمح بالتحسين الاقصى
لمردودية الطابق (تحديد انخفاض الطاقة وزاوية
حقن البخار) و إيجاد الزوايا على مستوى الجزئين
الساكن و المتحرك دوارانيا اضافة الى تحديد
تغيير درجة رد الفعل على امتداد الجنيحة .
اجراء مقارنة النتائج العملية و النظرية .

SUJET : Etude du vrillage dans les turbines à vapeur à aubes
extralongues .

RESUME : Ce projet consiste en l'étude du vrillage des aubes
extralongues, la détermination de l'évolution des ca-
racteristiques géométriques et du degré de réaction .
Logiciel permettant l'optimisation du rendement d'éta-
ge (détermination des chutes d'enthalpie variables et
des angles d'injection de la vapeur optimum correspon-
dant) .
la détermination des angles au niveau du stator et du
rotor et l'évolution du degré de réaction le long de
l'aube , a été élaboré .
Finalement, la comparaison des résultats dans le cas
d'évolution avec et sans frottement .

SUBJECT : Study tendril of the steam turbine with long blades.

SUMARY : The aim of this project is to study the tendril of
a long blade and determine the geometrie characteri-
stics and the degré of reaction variations .
A computer program was written to allow the optimi-
zation of the stage efficiency, (Determination of the
variable enthalpy drop and the steam injection
optimum corresponding angle .
The stator and rotor angles also can be evaluated ,
as the degré of reaction along the blade .
Finally a comparaision of results was done for cases
with and without friction .

QUELQUES NOTATIONS UTILISEES

a	Célerite du son
B	Largeur de l'ailette
C	Vitesse absolue de la vapeur
C_p	Chaleur massique du fluide
D_m	Diamètre moyen
H	Enthalpie massique
h	Chute d'enthalpie au niveau d'une roue
K	Coefficient de recuperation
l	Longueur radiale d'aubage
M	Nombre de mach
\dot{m}	Débit massique de vapeur (kg/s)
N_{et}	Puissance d'étage
S	Section totale des tuyères (aubes)
s_t	section d'une tuyère
T	Travail reçu par l'arbre de la turbine
U	Vitesse circonférentielle
v	Volume spécifique (m^3/kg)
W	Vitesse relative
α	Angle formé par U & C
β	Angle formé par U & W
δ	Coefficient de transformation isentropique
ψ	Coefficient de perte de vitesse (tuyère)
ψ	Coefficient de perte de vitesse (roue mobile)
ξ	Rapport de vitesse périphérique et de vitesse absolue de vapeur
η	Rendement
X	Nombre de Parsons

S O M M A I R E

INTRODUCTION	1
I - HISTORIQUE	3
II- GENERALITES	4
1 - Principe de fonctionnement	4
2 - Eléments constitutifs d'une turbine	5
3 - Classification des turbines	6
4 - Moyens permettant d'améliorer le rendement ..	9
5 - Choix des cycles	10
III- L'ÉCOULEMENT DANS LES TUYÈRES ET DANS LES AIULETTES	
MOTRICES	13
a - Tuyères et aubes distributrices	13
b - Ailettes mobiles	14
IV- ANALYSE DES PERTES ET RENDEMENT D'ÉTAGE	19
A/ Pertes	
1 - Pertes internes	19
2 - Pertes externes	21
B/ Nombre de Parsons	22
V - ÉTUDE DU MODE DE CIRCULATION DE LA VAPEUR ET VRILLAGE	
DES AUBES	25
1 - Étages courants et semi-courants	25
2 - Étude des variations de quelques caractéris-	
tiques au niveau de l'étage	25
VI- CALCUL ET PROGRAMME INFORMATIQUE	33
1 - Évaluation du diamètre moyen	33
2 - Présentation des données de la turbine à	
étudiée	35
3 - Modélisation du problème	35
4 - Plan de calcul	39

5 - Resultats du programme et commentaire ...45
6 - Verification de l'écoulement subsonique .. 74
7 - Verification des aubages à la traction .. 75

CONCLUSION 78

ANNEXE

I - Programme informatique

II- Tableaux des resultats

INTRODUCTION :

Depuis la nuit des temps , l'homme voulût assurer son bien-
etre , C'est par la science que son rêve approche la réalité .

Il essaya de domestiquer l'énergie sous ses diverses formes
pour en tirer du travail ,car vite il remarqua que le travail
des bêtes domestiques était insuffisant pour assurer son total
bienetre .

La première forme d'énergie fût l'énergie fournie par les co-
mbustibles ,puis l'énergie électrique .

Il remarqua que la vapeur d'eau permet de fournir du travail
puis vint le moteur à combustion interne ,et enfin les combu-
stibles nucleaires .

Les turbines à vapeur conquerirent le marché et s'octoyèrent
le rôle de producteur massif d'énergie laissant les faibles pui-
ssances aux turbines à gaz .

La conception des turbines est un peu délicate ,ce qui rend
ces constructeurs très rares , il se heurtent surtout à la con-
ception des turbines basse pression ,où le volume massique de
la vapeur devient important ,nécessitant une grande section de
passage,donc des ailettes longues ,rendant leurs conception
fastudueuse .

dans ce present travail on essayera de faire une approche de ce
problème ,sans essayer de le contourner comme il a été fait pre-
cedemment ,en divisant le débit de vapeur d'eau ,en plusieurs
flux afin de limiter les longueur des aubes ,pour ne pas se

trouver en presence d'ailette vrillée ,qui est la conséquence du fait que les différents filets fluides se trouvent à des diamètres différents et ils doivent échanger la même quantité d'énergie avec l'arbre de la turbine .

Le rendement de la turbine s'est vu accru ,par l'utilisation de pression et température de vapeur élevée .

But de ce projet

Une étude a été faite pour une turbine à vapeur à un seul soutirage .Elle se constitue d'une turbine moyenne pression et d'une turbine basse pression ,l'étude concernant la turbine moyenne pression s'est basée sur la simplification de l' étude du filet fluide se trouvant au diamètre moyen .

Lorsque le volume massique devient important ,les longueurs des aubes deviennent importantes et cette simplification n'est plus valable ,vu la variation non négligeable de la vitesse d'entraînement .Ce problème se rencontre surtout au niveau des derniers étages des turbines basse pression .

L'étude précédente(10), a contourné ce problème en divisant le débit de vapeur en deux flux.Ceci revient à diviser la section de passage en deux . d'où la réduction de la longueur des aubes .

Dans ce présent travail ,on va faire l'étude approchée de la turbine basse pression sans diviser le débit en plusieurs flux ,et on la basera sur l'optimisation des étages,on essayera de déterminer l'évolution de la géométrie des aubes .

I- HISTORIQUE :

L'idée d'exploiter l'énergie de la vapeur a évolué avec le développement de la thermodynamique et la mécanique des fluides

La première réalisation qui a fait preuve d'un correct fonctionnement était la turbine monocellulaire et cela en 1883 par DE LAVAL , un an plus tard , PARSONS réussit lui aussi à faire marcher sa turbine . Ce nouveau né dans le monde des turbomachines permettra la production d'énergie électrique un peu partout .

Depuis quarante cinq ans , seulement , le progrès de l'aérodynamique et de la métallurgie des alliages réfractaires ont permis de construire des turbines dont les caractéristiques de vapeur sont élevées , ces machines présentent de bonnes puissances unitaires .

II- GENERALITES :

Les turbines à vapeur comme toutes les turbomachines sont des appareils à écoulement continu ,en négligeant les fluctuations de régulation ,pour un régime de fonctionnement donné ,l'état du fluide est invariable en un point que l'on se fixe dans l'espace interne de la turbine .Cette propriété leur permet de fonctionner avec des débits très importants et rend donc possible la réalisation de machine à grande puissance (pouvant dépasser un million de kilowatts),et cela avec un rendement élevé et avec la souplesse de réglage exigé par le fonctionnement des centrales électriques modernes . . . (1)

De plus les turbines à vapeur se pretent dans des conditions économiques ,à la production simultannée d'energie électrique et de chaleur .

Pour ces raisons ,ces machines jouent un rôle de tout premier plan dans la production d'énergie électrique au dépend de la chaleur fournie par des combustibles, classiques soient ils ou nucléaires

1- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT:

L'énergie peut se présenter, sous divers formes (aspect), parmi ceux que nous connaissons, l'énergie électrique ou magnétique , l'énergie mécanique, l'énergie chimique, l'énergie thermique . . etc Cette dernière forme d'énergie, est caractérisé par l'enthalpie qui englobe l'énergie de pression et de chaleur , emmagasiné dans ce cas par la vapeur qui traverse la turbine .

En créant une différence de pression et de température, on réalise une chute d'enthalpie entre la source chaude (générateur de vapeur) et la source froide (condenseur, atmosphère), la turbine placée entre les deux sources a pour rôle de transformer cette chute d'enthalpie en énergie mécanique de rotation avec un minimum de pertes .

Dans les turbines à vapeur, l'énergie calorifique de la vapeur est transformée en un travail mécanique de rotation du rotor de la turbine . Tout d'abord la vapeur se détend dans les tuyères où son énergie calorifique est transformée en partie en énergie cinétique. Ensuite ce courant de vapeur à grande vitesse s'écoule dans les rangées d'ailettes motrices ayant un profil courbe .

Il en résulte que les forces qui agissent sur les deux faces opposées de chaque ailette (intrados, extrados) sont inégales. La force qui agit sur l'intrados est de loin supérieure à celle qui agit sur l'extrados, si bien que la rangée ou grille d'ailettes fixée sur un disque du rotor tourne dans le sens où agissent les forces les plus élevées .

(2)

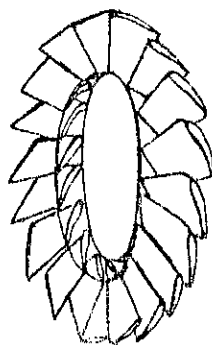
2- ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UNE TURBINE:

L'élément constitutif de la turbine à vapeur est la cellule comprenant :

- un distributeur fixe composé de tuyères ou d'aubages ayant pour but , la transformation totale ou partielle de l'énergie thermique emmagasinée par la vapeur lors de son passage à travers la chaudière , en énergie cinétique .

-une roue mobile solidaire de l'arbre et dont les ailettes situées à la périphérie ,ont pour but de transformer en énergie mécanique de rotation ,l'énergie cinétique et thermique mise à leur dispositions .

Les aubes sont des obstacles profilés plongées dans la vapeur(écoulement).L'ensemble fixe ou mobile d'obstacles généralement profilés est appelé grille d'aubes .Elles sont déduites les unes des autres par un déplacement géométrique périodique,utilisés pour guider l'écoulement du fluide ,et pour échanger avec lui du travail(efforts mécaniques) . (3)



Grille d'aubes plane circulaire

3- CLASSIFICATION DES TURBINES :

Les principaux critères sur lesquels on se base lors de la classification sont :

a- La forme de la veine à vapeur :

- les turbines axiales : le sens de l'écoulement de la vapeur se fait parallèlement à l'axe de la turbine .
- les turbines radiales : l'écoulement de la vapeur se fait dans le sens radiale , compris entre les plans perpendiculaires à l'axe de la turbine .

b- Par le nombre d'éléments qu'elles contiennent :

- turbine élémentaire (une seule roue), dite monocellulaire
- turbine à éléments multiples (plusieurs roues), multicellulaire

c- Le lieu où s'opère la transformation de l'énergie de pression

- turbine à action : la vapeur se détend uniquement dans les tuyères fixées dans un diaphragme fixe, ou bien fixées directement dans l'enveloppe ou corps de la turbine. la pression de la vapeur reste ensuite constante dans les canaux compris entre les ailettes motrices (voir fig 1-a-b-c)
- turbine à réaction : la vapeur se détend en partie dans les tuyères et en partie dans les canaux des ailettes motrices (voir 2-a-b-c)

N.B : En réalité les turbines à réaction comportent généralement une première cellule à action (étage de réglage), alors que les turbines à action opèrent dans leurs étages basse pression à un degré de réaction non négligeable.

On définit le degré de réaction comme étant le rapport de la chute d'enthalpie à travers les canaux compris entre les ailettes mobiles, et la chute d'enthalpie à travers tout l'étage

degré de réaction :

$$\xi = \frac{H^*}{H_{ad}}$$

sur figure (1-2), les vitesses sont tangentes aux profils des aubes pour éviter les chocs qui causent des pertes non négligeables.

fig:1

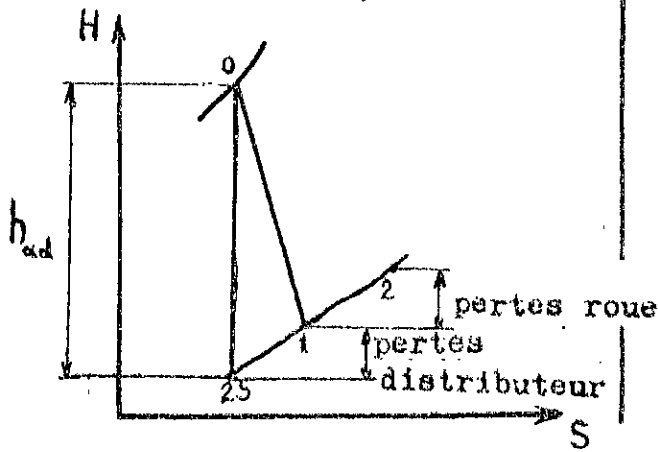
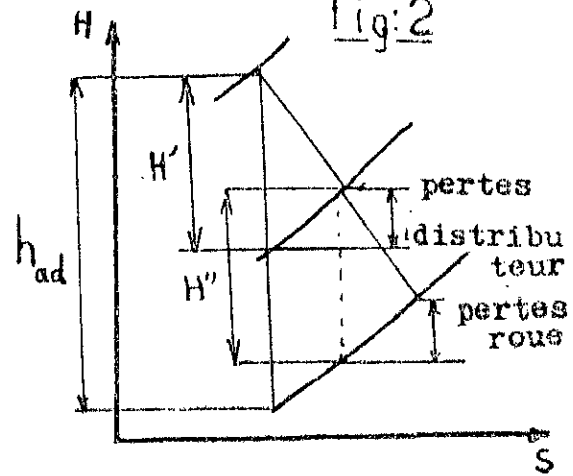
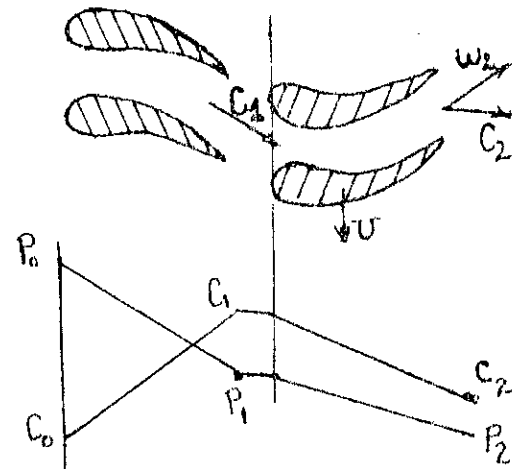
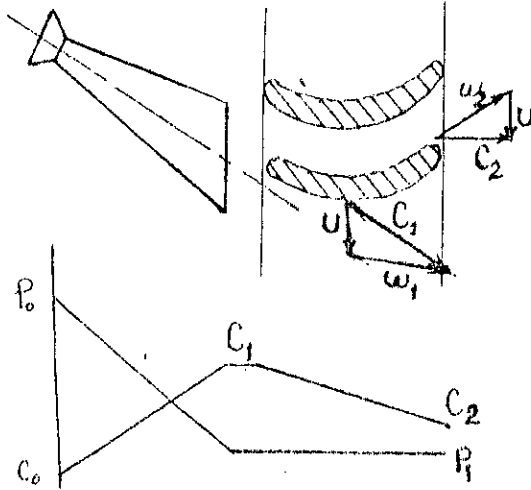


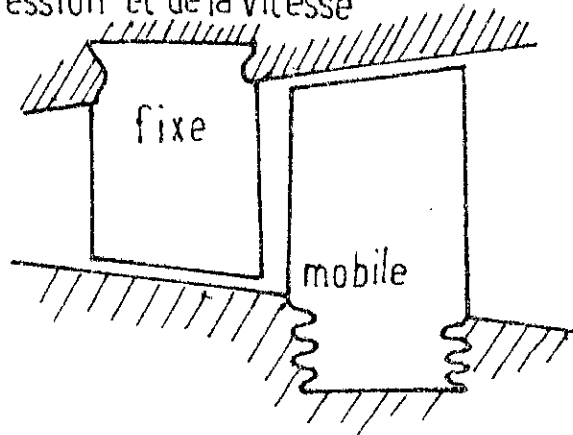
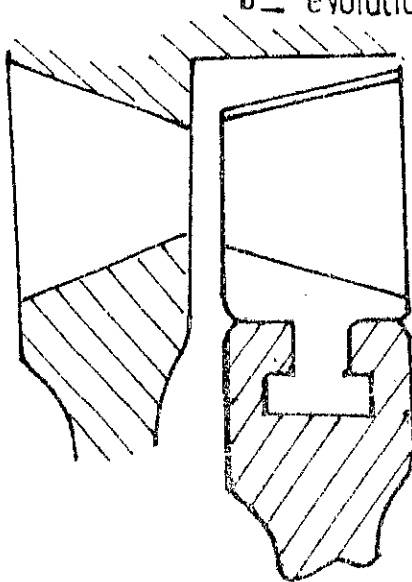
fig:2



a - representation de l'évolution de l'enthalpie à travers un étage



b - evolution de la pression et de la vitesse



c - dessin d'un étage

4- MOYENS PERMETTANT D'AMELIORER LE RENDEMENT DU CYCLE :

a- le moyen le plus évident est bien entendu de limiter les pertes

-Les pertes à l'écoulement dépendent de la vitesse de la vapeur, et surtout de la forme (pertes de charge singulières), et la longueur (pertes de charge linéaires) des canaux, qui doivent être tracés de manière à éviter frottements excessifs, chocs, déviation de jet, et décollements.

-En ce qui concerne la limitation de vitesse, on y remédie en fractionnant la chute d'enthalpie totale à travers cette turbine, sur un nombre plus important d'étages. Cette solution est limitée par le coût de la machine.

b- les autres moyens permettant l'amélioration du rendement sont les suivants :

-L'augmentation de la température et de la pression initiale de la vapeur (cycle de Hirn), et l'abaissement de la pression de sortie de la turbine, ce qui engendre une plus grande chute d'enthalpie.

-Après que la vapeur qui était surchauffée se soit détendue à travers une partie de la turbine, on lui fait subir une ressurchauffe pour améliorer le rendement du cycle (Hirn avec ressurchauffe)

- Avant que la détente de la vapeur ne s'achève on prélève un certain débit de vapeur qu'on utilise pour rechauffer l'eau qui sort du condenseur. Cette méthode permet la récupération d'une partie de l'énergie qui aurait été perdue dans le condenseur (Hirn avec régénération).

5- CHOIX DES CYCLES :

a- Cycle de Rankine : (voir figure 3-a,3-b)

L'eau décrit un cycle en circuit fermé mettant en présence les phases vapeur et liquide .

A-B:compression adiabatique (phase liquide)

B-C:échauffement isobare

C-D:vaporisation isobare

D-E:détente adiabatique

E-A:condensation isobare

Ce cycle n'est pas utilisé à cause de son faible rendement .

b- Cycle de Hirn : (voir figure 4-a,4-b)

La différence de ce cycle avec le cycle de Rankine réside dans le fait qu'il a une surchauffe (D-E)

le rendement de ce cycle est donné par :

$$\eta = \frac{\text{travail récupéré } W}{\text{chaleur dépensée } Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Q_1 : représente la chaleur dépensée

Q_2 : représente la chaleur cédée

Le but de la surchauffe est l'augmentation de Q_1 plus que Q_2 , d'où la diminution de Q_1/Q_2 , et par la même occasion l'augmentation du rendement de ce cycle , par rapport au cycle de Rankine .

La surchauffe est limitée car les contraintes admissibles des matériaux diminue avec l'augmentation de la température

c- Cycle de Hirn avec resurchauffe :(voir figure 5-a,5-b)

Elle consiste à surchauffer de nouveau et à pression constante la totalité du débit de vapeur qui a travaillé dans une partie de la turbines et à le réintroduire

dans cette dernière pour travailler à nouveau .

d- Cycle de Hirn avec soutirage : (voir figure 6-a, 6-b)

Ce procédé consiste à récupérer une partie de l'énergie qui aurait été perdue dans l'eau de refroidissement , en soutirant d'un ou de plusieurs étages intermédiaires de la turbine , de la vapeur et à s'en servir pour réchauffer le condensat .

On définit l'efficacité du soutirage par :

$$E = \frac{Q - Q'}{Q}$$

avec Q : chaleur à fournir sans
soutirage

Q' : chaleur à fournir avec
soutirage

Il suffit de voir pour quelle valeur d'enthalpie le soutirage serait fait pour que l'efficacité soit maximale.

e- Cycle Combiné :

On combine une turbine à gaz et une turbine à vapeur les gaz d'échappement de la turbine à gaz sont utilisés pour chauffer la vapeur de la turbine à vapeur .

a- diagrammes T-S

b- diagrammes H-S

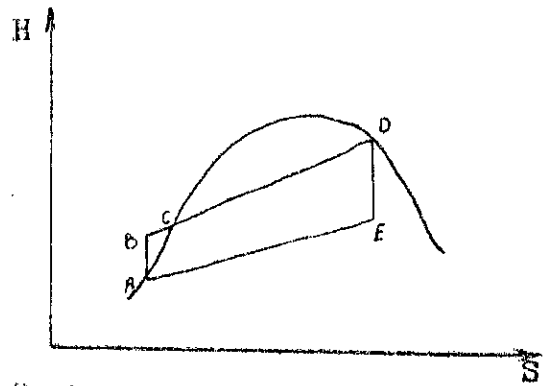
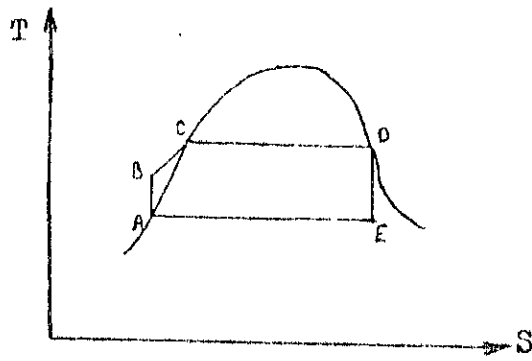


figure 3 : Cycle de Rankine

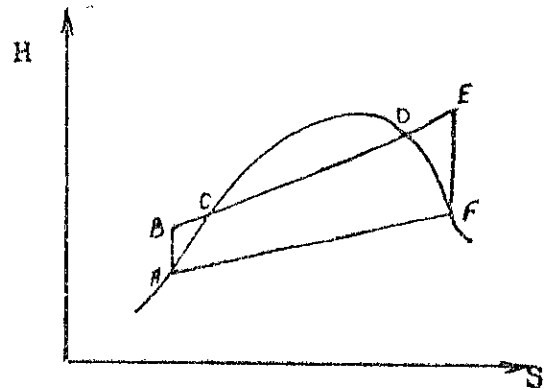
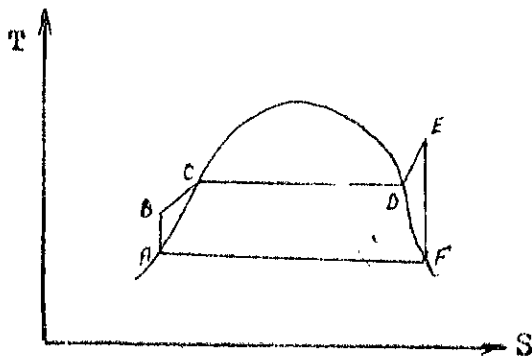


figure 4 : Cycle de Hirn

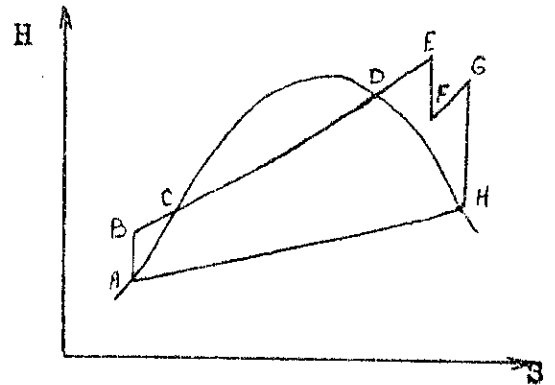
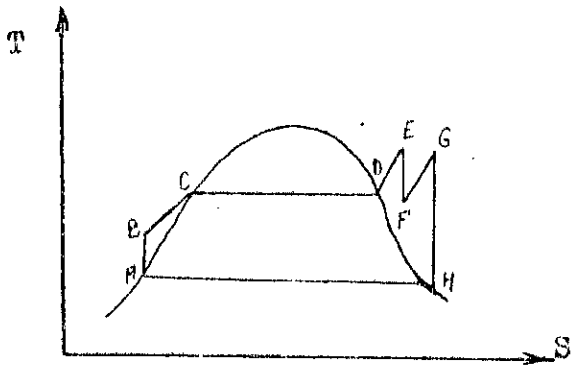


figure 5 : Cycle de Hirn avec ressurchauffe

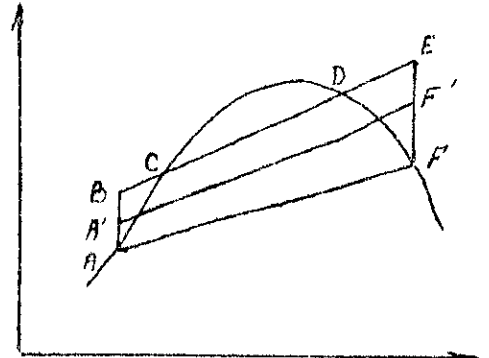
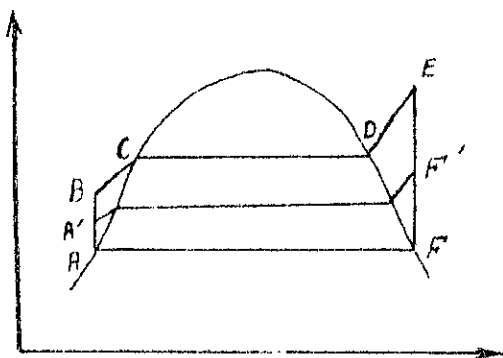


figure 6 : Cycle de Hirn avec soutirage

III-1. ECOULEMENT DANS LES TUYERES ET DANS LES AILETTES MOTRICES :

a - Tuyères et aubes distributeurs :

Les tuyères d'une turbine à vapeur peuvent se présenter sous forme de canaux incurvés ,réalisés à l'aide d'ailettes profilées qui sont fixées sur les diaphragmes .

Les tuyères ont pour objet de transformer l'énergie thermique de la vapeur mise à leur disposition(ou une partie de cette énergie) en énergie cinétique et de donner au jet de vapeur ainsi formé une direction convenable pour attaquer les ailettes mobiles .

On distingue les tuyères convergentes ,tuyères divergentes ,et les tuyères convergentes-divergentes .

Dans les tuyères convergentes la vapeur ne peut se détendre que jusqu'à une pression qui correspond à la pression critique dans ce cas la vitesse de la vapeur à la sortie de la tuyère est égale à la vitesse du son dans la vapeur dans les conditions où se trouve celle ci ,le nombre de Mach est égal à un . Pour détendre la vapeur au dessous de cette pression critique on doit faire suivre le convergent ,d'un divergent .

Dans ce qui suivra ,on détermine les rendements d'étage .

On considère que la détente s'effectue sans pertes de chaleur avec l'extérieur .

De l'équation de Barré de saint-venant :

$$h_0 + \frac{1}{2} C_0^2 = h_1 + \frac{1}{2} C_{1t}^2$$

la valeur de la vitesse théorique de sortie de la tuyère après cette détente :

$$C_{1t} = \sqrt{2(h_0 - h_1) + C_0^2}$$

On introduit un coefficient φ , tenant compte du changement de vitesse

$$C_1 = \varphi \times C_{1t}$$

Les pertes dans la tuyère sont données par :

$$\Delta h_t = \frac{C_{1t}^2 - C_1^2}{2}$$

D'où
$$\Delta h_t = (1 - \varphi^2) \times \frac{C_{1t}^2}{2} = \xi_t \times \frac{C_{1t}^2}{2}$$

avec

ξ_t : facteur de perte d'énergie

φ : facteur de perte de vitesse

Δh_t : pertes dans la tuyère

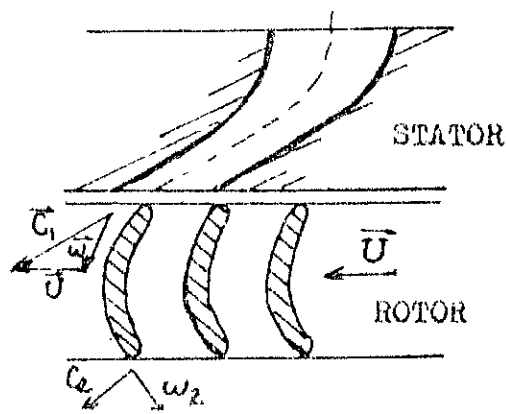
C_{1t} : vitesse théorique de la vapeur

C_1 : vitesse réelle de la vapeur

b- Dans les ailettes mobiles :

- Etage à réaction :

Théoriquement nous avons la même vitesse relative à travers la roue mobile $W_2 = W_1$



Dans le cas réel on se trouve en présence de pertes ,et la vitesse relative de sortie est inférieure à la vitesse relative d'entrée ,telle que :

$$W_2 = \Psi x W_1$$

avec Ψ :facteur de perte de vitesse dans les canaux des ailettes motrices

On determine ainsi les pertes dans les ailettes motrices (rotor)

par :

$$\Delta h_r = \frac{W_1^2 - W_2^2}{2} = (1 - \Psi^2) \frac{W_1^2}{2} = \frac{W_1^2}{2} x \zeta_r$$

avec : Δh_r :pertes dans l'ailette motrice

ζ_r :facteur de perte d'energie dans les ailettes motrices

Le rendement est défini comme suit :

$$\eta_u = \frac{T}{T_t}$$

avec : $T_t = C_t^2 / 2$,travail théorique

$T = U x (C_{1u} - C_{2u})$,travail reel

En se basant sur le triangle des vitesses,et après simplification ,on obtient :

$$\eta_u = 2 x \Psi^2 x (1 + \Psi) x \left(\frac{U}{C_1} x \cos \alpha_1 - \left(\frac{U}{C_1} \right)^2 \right)$$

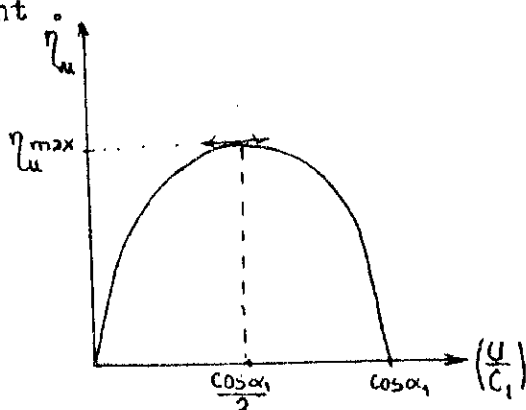
pour φ et Ψ constants le rendement est maximal pour $\frac{U}{C_1} = \frac{\cos \alpha_1}{2}$

le rendement maximal vaut :

$$\eta_u \text{ max} = \frac{1}{2} x \Psi^2 x (1 + \Psi) x \cos^2 \alpha_1$$

Il est clair que le rendement maximal prend une meilleur valeur pour des angles plus petits , mais à cause des phénomènes

physiques α_1 est limité inférieurement par une valeur qu'on détermine expérimentalement



Tracé du rendement pour un étage à action $\eta_u = f\left(\frac{U}{C_1}\right)$

- Étage à réaction :

Dans l'étage à réaction, la vitesse relative de sortie W_2 est supérieure à la vitesse relative d'entrée W_1 , par suite de la détente supplémentaire dans les ailettes mobiles.

La vitesse théorique relative de sortie est donnée par :

$$W_{2t} = \sqrt{2x(h_1 - h_2) + W_1^2}$$

par suite des frottements, la valeur réelle de cette vitesse est donnée par

$$W_2 = \psi \times W_{2t}$$

Les pertes dans les ailettes motrices d'un étage à réaction

sont exprimées par :

$$\Delta h_r = \frac{W_{2t}^2 - W_2^2}{2} = \left(\frac{1}{\psi^2} - 1\right) \times \frac{W_{2t}^2}{2}$$

$$\Delta h_r = \zeta_r \times \frac{W_{2t}^2}{2}$$

avec : Δh_r : pertes dans l'ailette motrice

ζ_r : facteur de perte d'énergie dans les ailettes motrices

Le rendement est défini comme :

$$\eta_u = \frac{T}{T_{dis}}$$

avec : $T = U \times (C_{1u} - C_{2u})$

$T_{dis} = T + (1 - \phi^2) \times \frac{C_{1t}^2}{2} + (1 - \psi^2) \times \frac{W_{2t}^2}{2}$, travail disponible

Pour une simplification d'étude , on considère un aubage symétrique :

$w_2 = v_1$, et on prend $\varphi = \psi$

après simplification, le rendement d'étage est donné par :

$$\eta_u = \frac{1}{1 + \frac{1 - \varphi^2}{\varphi^2 \times (2 \cos \alpha_1 \times \frac{U}{C_1} - (\frac{U}{C_1})^2)}$$

le rendement maximal est atteint pour $\frac{U}{C_1} = \cos \alpha_1$

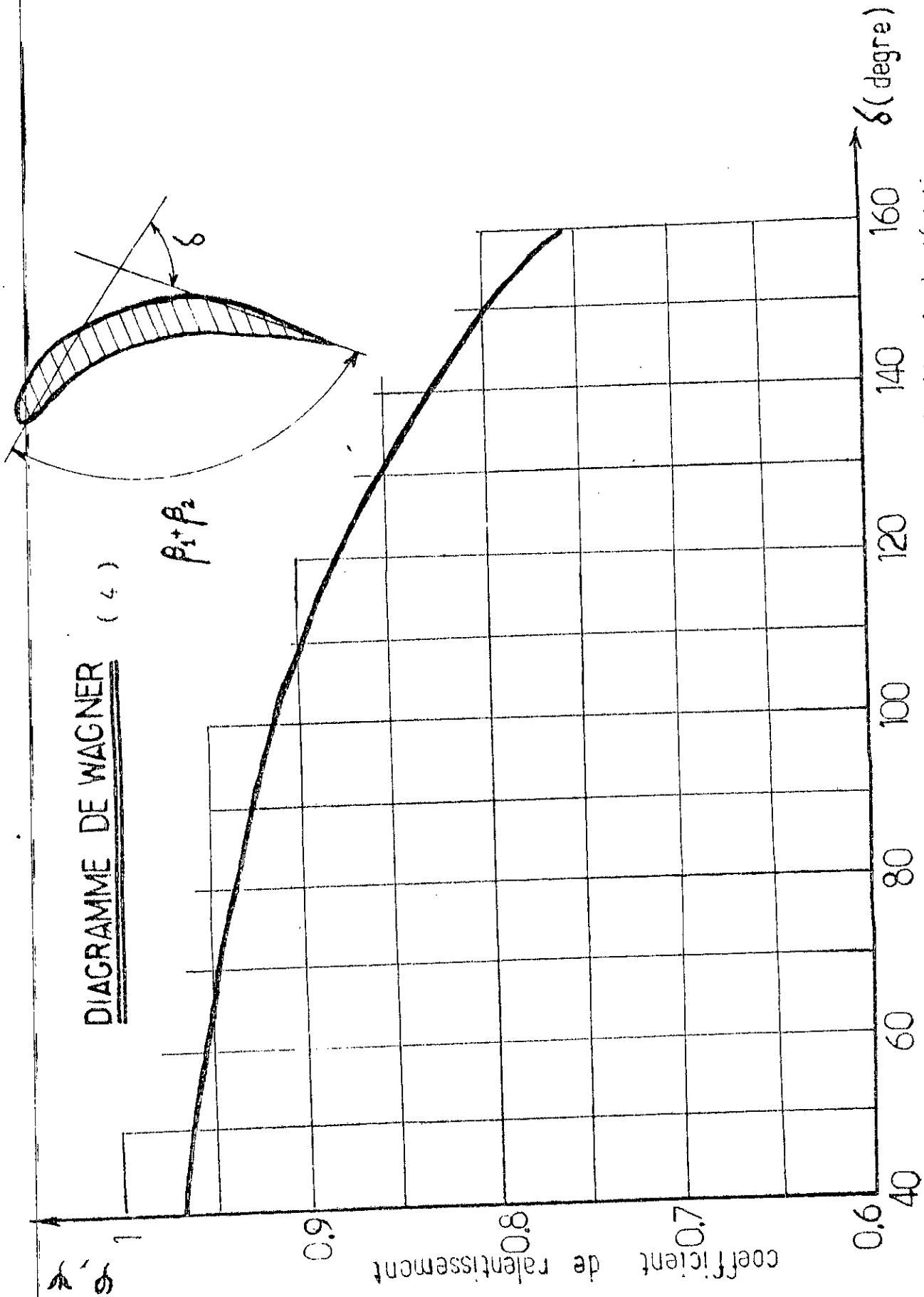
IL vaut

$$\eta_{u \max} = \frac{\cos^2(\alpha_1)}{\cos^2(\alpha_1) + \frac{1 - \varphi^2}{\varphi^2}}$$

En comparant le rendement de l'étage à action et celui de l'étage à réaction on remarque que le rendement maximal de l'étage à action est atteint pour des valeurs de C_1 plus importantes que les valeurs pour lesquelles le rendement de l'étage à réaction atteint son maximum .

Si on s'intéresse à optimiser le rendement , le choix d'étages à action nous permet d'avoir moins d'étages constituant la turbine qu'avec un choix d'étage à réaction.

Dans le cas réel, l'étude n'est pas aussi simple car les facteurs de pertes de vitesses, sont aussi fonction de l'angle d'injection de la vapeur, seul l'expérience nous permet de trouver la valeur de l'angle d'injection α_1 pour lequel le rendement est maximal, ou l'utilisation de l'outil informatique appliqué à une modélisation du problème .



coefficient de ralentissement en fonction de l'angle de déviation

IV- ANALYSE DES PERTES ET RENDEMENT D'ETAGE :

A/ La turbine à vapeur présente de différentes pertes affectant le travail utile fourni par le fluide ,on s'intéressera particulièrement dans cette étude aux pertes de la turbine fonctionnant dans des conditions auxquelles elle a été adaptée .

On classe habituellement les pertes en pertes externes et internes

1-Pertes internes :

a- pertes par frottement dans les distributeurs :

$$\Delta h_d = \left(\frac{1}{\psi^2} - 1 \right) \times \frac{C_1^2}{2}$$

b- pertes par frottement dans les roues mobiles :

$$\Delta h_r = \left(\frac{1}{\psi^2} - 1 \right) \times \frac{W_1^2}{2}$$

c- pertes par injection partielle :

les turbines affectées par cette perte sont les turbines avec une roue Curtis en tête de turbine. Car on a la possibilité de l'injection partielle

o pertes par frottement du fluide sur le disque :

$$\Delta h_1 = 3 \cdot 10^{-7} \cdot D^{1,4} \cdot U^{2,8} / (\dot{m} \cdot v) ; \text{ kcal/kg} \quad (4)$$

o pertes par frottement des ailettes qui ne sont pas soumises au jet

$$\Delta h_2 = 1,35 \cdot 10^{-5} \cdot D^{0,7} \cdot 1 \cdot U^{2,8} \cdot (1-\theta) / (\dot{m} \cdot v) ; \text{ kcal/kg} \quad (4)$$

o pertes par injection partielle

$$\Delta h_3 = \delta \times h_t \quad \text{avec} \quad \delta = \theta \times (\theta^{-0,07} - 1) \quad (4)$$

l : hauteur radiale d'ailette (m)

U : vitesse circonférentielle (m/s)

v : volume massique (m³/kg)

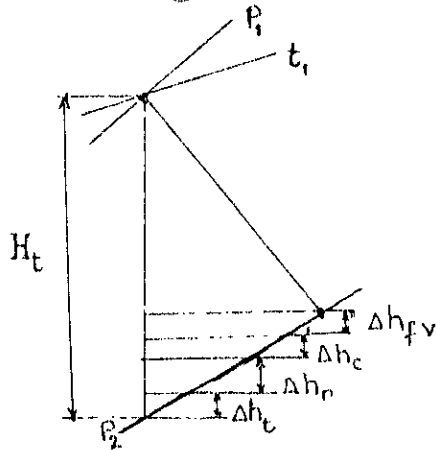
\dot{m} : débit masse (kg/s)

D : diamètre à mi-hauteur d'aube (m)

$\theta = \frac{\text{Arc d' injection}}{\text{longueur totale de la circonférence}}$

On a $\Delta h_{fv} = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3$

En reportant ces pertes sur le diagramme de mollier on trouve le point réel de sortie .



Représentation des pertes sur le diagramme Mollier

- rendement d'ailette relatif

$$\eta_u = \frac{H_t - (\Delta h_t + \Delta h_r + \Delta h_c)}{H_t}$$

- rendement relatif interne

$$\eta_i = \frac{H_t - (\Delta h_t + \Delta h_r + \Delta h_c + \Delta h_{fv})}{H_t}$$

a- pertes par frottement du disque :

Il est physiquement évident que la puissance nécessaire à l'entretien de la rotation de la roue dans un fluide ambiant , dépend de sa géométrie , de la vitesse de rotation et de la masse volumique du fluide .

Elle a pour expression $N_{fd} = K \cdot D^2 \cdot \rho \cdot U^3$ (5)

K dépend de . la forme du disque

. de l' état de surface

. des caractéristiques de la vapeur

STODOLA a déduit expérimentalement plusieurs formules l'une des plus utilisées est la suivante

$$N_{fd} = 3 \cdot 10^{-7} \cdot D^{1,7} \cdot U^{2,8} \cdot \rho \quad (\text{kcal/kg}) \quad (10)$$

e- pertes par humidité de vapeur :

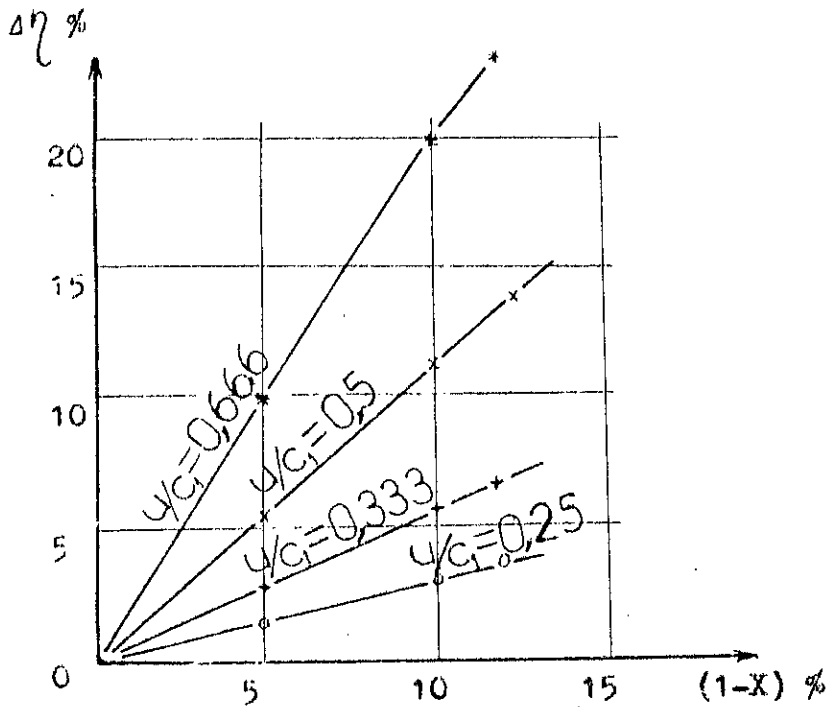
Dans une turbine à condensation , la détente est suffisamment poussée ce qui favorise à partir d'un certain point de la turbine , la saturation de la vapeur .

Les gouttelettes ainsi formées ont une vitesse beaucoup plus lente que celle de la vapeur , il en résulte un choc sur le dos de l'aube

accentuant les pertes .

La figure ci-dessous (ECHER-WYSS) (4), donne la chute de rendement d'étage provoquée par l'humidité de la vapeur en fonction de U/C .

Un bon drainage de l'eau condensée diminue sensiblement cette perte



Chute du rendement en fonction de l'humidité de vapeur (4)

f- pertes par vitesses restante (entre étage) :

Une orientation convenable de l'entrée de la grille fixe entraîne la récupération d'une fraction importante de l'énergie cinétique disponible à la sortie de l'étage précédent .

Au niveau d'un étage à réaction , la récupération est presque totale .

Elle est un peu plus faible pour un étage à action .

Les pertes par vitesse restante sont exprimées par la relation

$$\Delta h_{vr} = (1-k) \cdot C_2^2 / 2$$

K : coefficient de récupération
(0,92 - 0,95)

2 - PERTES EXTERNES :

a - pertes par frottement à l'admission :

Dans les conduites d'admission et au niveau des soupapes de réglages il existe des pertes dues principalement aux frottements à la vanne d'entrée qui sont évaluées par

$$\Delta P = (3+4)\% \cdot P_0 \quad (4)$$

P_0 : pression d'entrée de la turbine

b - pertes à l'échappement :

A la sortie de la turbine, la vapeur possède une vitesse de sortie non nulle, faute de quoi il ne pourrait y avoir écoulement de la vapeur dans la turbine. Cette vitesse qui se dissipe sous forme de remous dans le fond d'échappement entraîne une perte égale à

$$\Delta h_{cs} = C_s^2 / 2$$

c - pertes par fuites externes :

Elles sont dues aux fuites existant aux sorties de l'arbre à travers l'enveloppe, aux frottements des palliers et à l'entraînement des organes de régulation. Dans le cas des turbines à condensation où la pression à l'échappement est inférieure à celle de l'atmosphère, il est nécessaire d'éviter les rentrées d'air à travers le joint à labyrinthe, en envoyant de la vapeur sous une pression supérieure à celle de l'atmosphère.

B/ NOMBRE DE PARSONS :

Le nombre de parsons est utilisé dans la détermination du nombre d'étage constituant une turbine après avoir choisi le rapport des vitesses U/C . Il est aussi appelé facteur de qualité des turbines. Lors de la rotation de la roue, les aubes se trouvent soumises à des efforts centrifuges qui sont fonction de la vitesse périphérique U , d'où la nécessité de limiter cette dernière.

On la limite en assignant au diamètre de la turbine des valeurs non importantes.

Des triangles des vitesses on voit que la limitation de la vitesse periphérique va avec celle de la vitesse absolue ,en supposant que la vitesse relative est maintenue constante .

La vitesse absolue de la vapeur est modérée par le fractionnement de la chute d'enthalpie totale sur plusieurs étages

- Cas des turbines à action :

Considerons l'une des cellules de la turbine ,la vitesse d'injection est donnée par

$$C_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{ad} + (k \cdot C_2')^2} \cdot \varphi$$

H_{ad} : chute adiabatique par etage

C_2' : vitesse de sortie de l'étage précédent

k : coefficient de récupération

on suppose une récupération totale de l'énergie cinétique de l'étage précédent

$$k = 1$$

sachant que

$$C_2^2 = U^2 + W_2^2 - 2 \cdot U \cdot W_2 \cdot \cos \beta_2$$

$$\varphi = U / C_1$$

Après transformation l'équation s'écrit sous la forme

$$2 \cdot g \cdot H_{ad} = U^2 \left(\frac{1}{\varphi^2} \left(\frac{1}{\varphi^2} - \psi^2 \right) + 2 \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\varphi} \cdot \psi (1 + \psi) - (1 + \psi)^2 \right)$$

on fait un changement de variable pour écrire l'équation sous une forme plus simple

$$U^2 = X \cdot H_{ad}$$

X nombre de parsons ,il est fonction de $(\varphi, \alpha_1, \psi, \psi)$.

Celui ci est appelé facteur de qualité car il est exprimé avec les mêmes variables que le rendement utile .

Dans le cas où le diamètre est le même pour tous les étages

l'équation précédente peut s'écrire sous la forme :

$$Z \cdot U^2 = X \cdot H_{turbine}$$

La valeur moyenne de X pour les turbines à action est :

$$X = 2000$$

- Cas des turbines à réaction :

On considère un degré de réaction de $1/2$

Une étude analogue à celle vue ci-dessus pour le cas de la turbine à action à étages multiples conduit à

$$2.g.H_{ad} = 2.U^2 \cdot \left(\frac{1}{\varphi^2} \left(\frac{1}{\varphi^2} - 1 \right) - \left(1 - \frac{2}{\varphi} \cdot \cos(\alpha_1) \right) \right)$$

on introduit le nombre de Parsons, l'équation s'écrit

$$U^2 = X \cdot H_{ad}$$

la valeur moyenne de X pour les turbines à réaction est :

$$X = 2000$$

Le rendement d'étage est maximal pour des nombres de Parsons plus grand que la valeur moyenne . (6)

V- ETUDE DU MODE DE CIRCULATION DE LA VAPEUR :

La vapeur peut s'écouler de plusieurs manières à travers un étage. La plus utilisée est celle qu'on exposera plus loin où les étages sont dits courants .

1 - Étages courants et semi-courants :

Dans le cas des turbines multiétagées à écoulement axial ,il est intéressant de considérer des étages dans lesquels tous les filets fluides échangent la même énergie avec la machine, quelle que soit leurs distances de l'axe de rotation ,faute de quoi on aboutirait à de grandes variations inacceptables des énergies cinétiques ou des pressions suivant le rayon .

- les étages sont dits courants si cette condition de circulation constante est vérifiée dans les aubes fixes et mobiles .

-Ils sont dits semi-courants si cette condition n'est vérifiée que dans les aubes mobiles .

Cette condition devient primordiale dans le cas des turbines à aubes longues . Elles sont généralement dites à aubes longues si L/D est supérieur à $1/10$.

L : longueur radiale des ailettes

D : diamètre à mi-hauteur des ailettes (3)

2 - Etude des variations de quelques caractéristiques :

On établira les lois de variations des vitesses ,des angles de la pression ,ainsi que du degré de réaction en fonction du rayon .

a - Variation de la pression suivant le rayon :

Dans le cas réel ,la pression n'est pas uniforme suivant le rayon .

Considérons un élément fluide de masse dm ,avec une vitesse tangentielle C_u ,comme le montre la figure -7- .

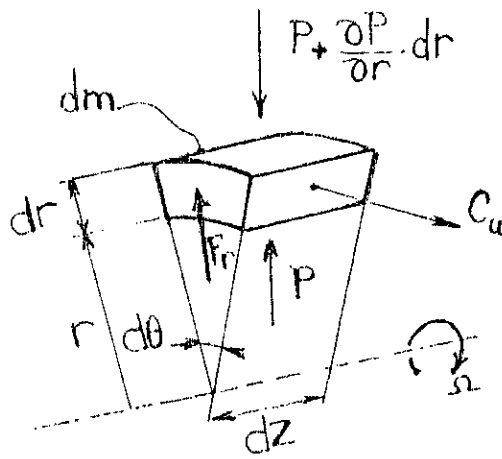


figure -7- équilibre de l'élément fluide

Cet élément fluide est soumis à la force radiale donnée par

$$F_r = dm \cdot \frac{C_u^2}{r}$$

Sommons les forces sur cet élément

$$(P + \frac{\partial P}{\partial r} \cdot dr) \cdot r \cdot d\theta \cdot dz - P \cdot r \cdot d\theta \cdot dz - F_r = 0$$

Après simplification et en tenant compte que

$$dm = \rho \cdot r \cdot d\theta \cdot dr \cdot dz$$

On obtient

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \cdot \frac{C_u^2}{r} \quad (7)$$

b- évolution des vitesses suivant le rayon :

Comme il est vu ci-dessus la pression croit avec le diamètre. En voulant maintenir un écoulement isentropique et irrotationnel, la vitesse sera astreinte à suivre une certaine distribution, qu'on déterminera.

L'écoulement est purement axial

$$C_r = 0$$

$$\text{rot}(C) = 0 \quad , \text{alors} \quad \frac{\partial C_{ax}}{\partial r} - \frac{\partial C_r}{\partial r} = 0$$

On trouve $C_{ax} = \text{constante}$

$$C_{ax} : \text{vitesse axiale} \quad (7)$$

$$\text{De l'équilibre d'un élément fluide} \quad \frac{\partial P}{\partial r} = \rho \cdot \frac{C_u^2}{r} \quad ; -1-$$

$$\text{De l'équation d'énergie} \quad \frac{P_t}{\rho_t} = \frac{P}{\rho} + \frac{\gamma-1}{2 \cdot \gamma} \cdot C^2 \quad ; -2-$$

l'indice t exprime les caractéristiques totales.

$$\text{On a} \quad C^2 = C_{ax}^2 + C_u^2$$

On dérive -2- par rapport au rayon en tenant compte du fait que les propriétés totales se conservent dans le cas de la détente

isentropique .

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{P}{\rho} \right) = - \frac{\gamma - 1}{2 \cdot \gamma} \frac{\partial}{\partial r} (C_u^2)$$

$$P \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (P) = - \frac{\gamma - 1}{2 \cdot \gamma} \frac{\partial}{\partial r} (C_u^2) \quad ; -2'-$$

de l'isentropie $\frac{1}{\rho} = P^{-1/\gamma} \cdot \frac{P_t^{1/\gamma}}{\rho_t}$; -3-

en combinant ces équations on a

$$\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{C_u^2}{r} = \frac{\gamma - 1}{2 \cdot \gamma} \frac{\partial}{\partial r} (C_u^2) + \frac{C_u^2}{r}$$

après transformation la dernière équation peut s'écrire

$$\frac{\partial C_u^2}{C_u^2} = \frac{-2 \partial r}{r}$$

on intègre du rayon intérieur r_1 au rayon r

On obtient $\ln \left(\frac{C_u}{C_{u1}} \right)^2 = \ln \left(\frac{r_1}{r} \right)^2$

les vitesses à la sortie du stator ont la distribution suivante

$$C_u = C_{u1} \cdot r_1 / r$$

$$C_r = 0$$

$$C_{ax} = \text{constante}$$

Ayant trouvé la distribution des vitesses et en se basant sur les triangles des vitesses , on détermine l'évolution des angles (théorique)

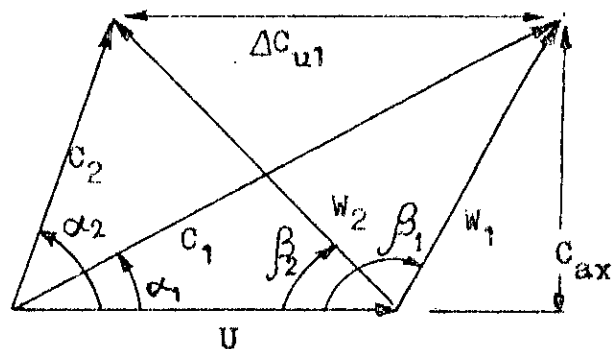
c- Evolution des angles suivant le rayon :

En se fixant un certain travail $T = U_1 \cdot \Delta C_{u1}$; pour $r=r_1$ (action)

$$\text{On a } C(r)^2 = C_{ax}^2 + C_u(r)^2$$

$$W_1(r)^2 = U(r)^2 + C_1(r)^2 - 2 \cdot U(r) \cdot C_1(r) \cdot \cos(\alpha_1(r))$$

$$C_u(r) = C_u(r_1) \cdot r_1 / r$$



triangles des vitesses pour $r=r_1$

$$* \operatorname{tg}(\alpha_1(r)) = \frac{C_{ax}}{C_u(r)}$$

$$\alpha_1(r) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{C_{ax}}{C_{u1} \cdot r_1} \cdot r \right)$$

$$* \operatorname{tg}(\beta_1(r)) = \frac{C_{ax}}{U(r) - C_u(r)}$$

$$\beta_1(r) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{C_{ax}}{U(r) - C_{u1} \cdot r_1 / r} \right)$$

avec $U(r) = \Pi \cdot N \cdot r / 30$

N : vitesse de rotation de l'arbre (tour/mn)

$$* \operatorname{tg}(\beta_2(r)) = \frac{C_{ax}}{\Delta C_u(r) + w_1(r) \cdot \cos(\beta_1(r))}$$

avec : $\Delta C_u(r) = T/U(r)$

$$w_1(r) = (U(r)^2 + C_{ax}^2 + C_{u1}(r)^2 - 2 \cdot U(r) \cdot C_{u1}(r) \cdot \cos(\alpha_1(r)))^{1/2}$$

Dans le cas des $\beta(r)$ négatifs, on considère les nouvelles valeurs

$$\beta(r) = 180 + \beta_1(r)$$

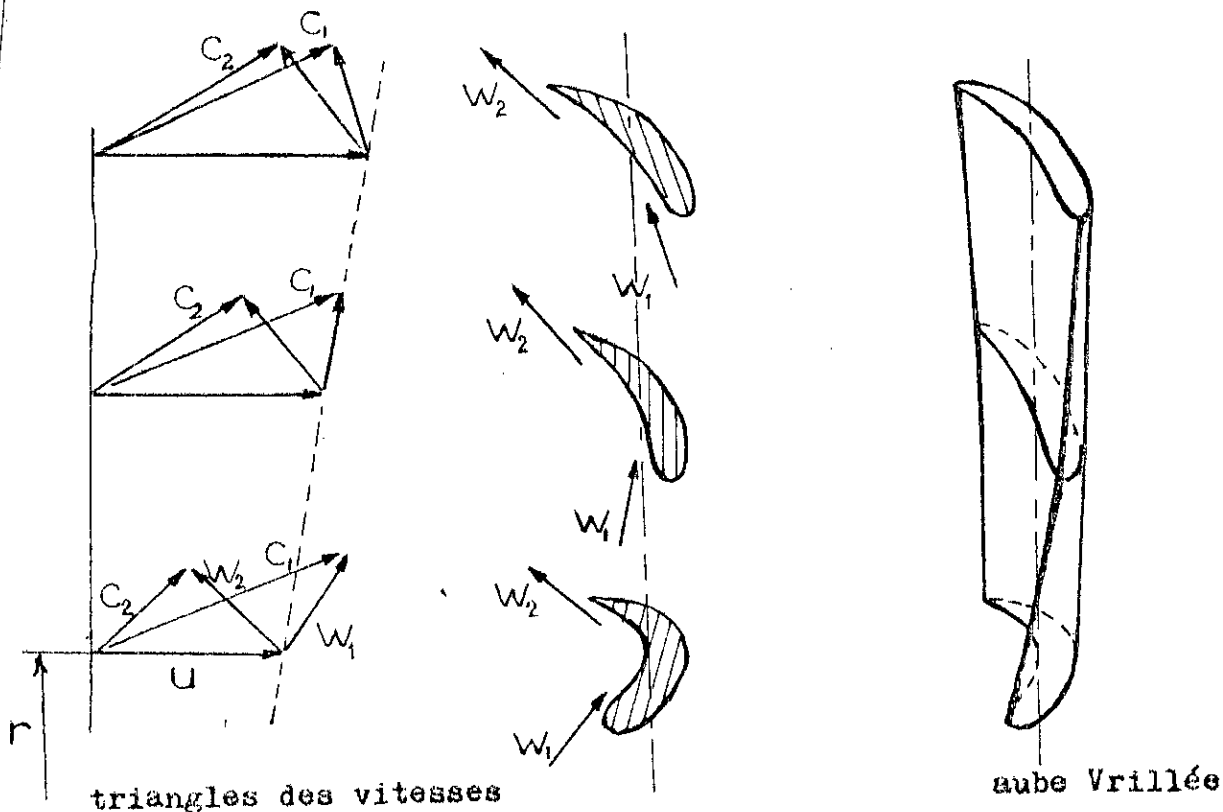
CONSEQUENCE de l'évolution des angles :

comme il est naturel de faire effectuer à chaque filet fluide traversant l'étage, le même travail spécifique, ce filet disposera, quelque soit le cylindre sur lequel il circule, sensiblement de la même chute d'enthalpie statique.

La construction des triangles des vitesses indique l'évolution que doit suivre le profil des aubes mobiles ci-dessous.

Il est défini par l'intersection de ces aubes avec des cylindres successifs de rayon r croissant.

On dit qu'il s'agit d'une ailette torse ou vrillée (6)



triangles des vitesses
aux différents rayons

aube Vrillée

d- On essayera de voir ,de quelle maniere le degré de réaction evolue le long du diamètre .

On a vu que la distribution des vitesses ,pour vérifier l'irrotationnalité, doit répondre à ces deux conditions

- * $r \cdot C_u = \text{constante}$; -1-
- * $C_{ax} = \text{constante}$; -2-

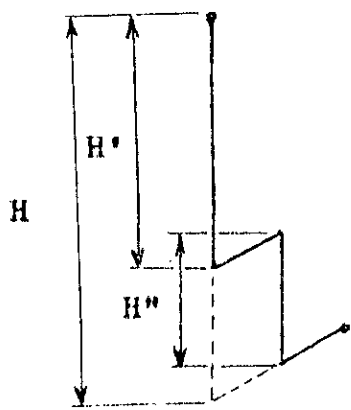
De ces relations ,il est facile de déduire la variation du degré de réaction ,avec le rayon .

Pour un point quelconque
situé au rayon r.Nous avons

$$\xi = \frac{H''}{H}$$

avec $H'' = \frac{1}{2} (W_2^2 - W_1^2)$

$$H = U \cdot \Delta C_u$$



Des triangles des vitesses $w_2^2 - w_1^2 = 2 \cdot U \cdot \Delta C_u - (C_1^2 - C_2^2)$

$$\xi = 1 - \frac{C_1^2 - C_2^2}{2 \cdot U \cdot \Delta C_u}$$

Les variations du volume massique étant compensés par celles des longueurs des aubes ,on peut écrire $C_1^2 - C_2^2 = C_{u1}^2 - C_{u2}^2$ il en résulte

$$1 - \xi = \frac{C_{u1} + C_{u2}}{2 \cdot U}$$

Or d'après -1- les grandeurs C_{u1} et C_{u2} ,ainsi que leur somme sont inversement proportionnelles à r ,tandis que la vitesse circonferentielle U est proportionnelle à r .Par consequent, dans un écoulement irrotationnel ,la variation du degré de réaction avec le rayon est regie par la relation suivante

$$(1 - \xi) \cdot r^2 = \text{constante} \quad (8)$$

Nos calculs ,seront faits pour un degré de réaction nul(action) juste à la base de chaque ailette .

AVANTAGES :

L'avantage principal de cette consideration est :

la presque uniformité d'état d'énergie des differents filets fluides .

- La minimisation des forces centrifuges par la distribution des vitesses le long du diamètre (attenuation de l'ecart de pression)
- L'uniformité de la distribution du travail echangé le long de l'ailette .

la distribution des efforts sur l'ailette,minimise le moment de flexion maximal .

INCONVENIENTS :

Du moment que le degré de réaction est évolutif,la trainé croit causant,ainsi une flexion composée de l'ailette .

Sur le rotor agissent des efforts axiaux nécessitant l'emploi de butées .

e - Conicité de l'ailette :

Du fait que la tension de traction due à la force centrifuge constitue la composante preponderante de la tension totale ,On peut l'utiliser dans la détermination des sections transversales de l'ailette .

La differentielle de la force centrifuge donne

$$dF = r \cdot \omega^2 \cdot S(r) \cdot dr = dm \cdot \omega^2 \cdot r$$

la contrainte locale au rayon R est :

$$\sigma = \frac{\int_{R_{ext}}^R \rho \cdot \omega^2 \cdot r \cdot S(r) \cdot dr}{S(r)} \quad ; -1-$$

De l'extrémité de l'ailette vers sa base la tension dans l'ailette croit et atteint son maximum au point de raccordement de l'ailette avec son pied .

En maintenant la contrainte de traction constante ,on peut atteindre des vitesses plus importantes pour la même longueur d'ailette .

$\sigma = \text{constante}$ on differentie -1-

$$\int \omega^2 \cdot r \cdot S(r) \cdot dr = -dS(r) \cdot \sigma$$

ω :vitesse angulaire (rd/s)

ρ :masse volumique du matériau (kg/ m³)

$$\frac{dS(r)}{S(r)} = \frac{\int \omega^2 \cdot r \cdot dr}{\sigma}$$

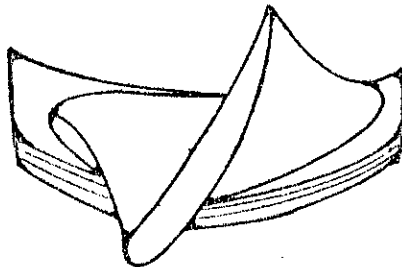
après intégration et en tenant compte que à $r=R$ on a $S(r)=S$

On aboutit à

$$S(r) = S \cdot \exp\left(\frac{\rho \cdot \omega^2}{2 \cdot \sigma} (R^2 - r^2)\right) \quad ; -2-$$

Les ailettes terminales ,basse pression ,possèdent une section transversale qui varie approximativement selon l'équation -2-

On remarque que la variation de la section de l'ailette ne dépend que du matériau choisi (ρ/σ), vitesse de rotation (ω) et de la géométrie de l'ailette (R, r) . (9)



ailette à section variable (vue de dessus)

VI - CALCUL ET PROGRAMME INFORMATIQUE

- Evaluation du diamètre moyen :

Pour cette présente étude on considère le cas où l'écoulement de la vapeur dans la turbine est subsonique .Le cas d'écoulement supersonique ferait une étude complètement différente .

Le rapport de pression qui permet d'avoir le nombre de Mach égale à un à la sortie de la tuyère est donné par

$$\frac{P_{cr}}{P_o} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

vapeur surchauffée $\gamma = 1.3$; $\frac{P_{cr}}{P_o} = 0.5457$

vapeur saturée $\gamma = 1.135$; $\frac{P_{cr}}{P_o} = 0.5774$

Determination de la pression à l'entrée de la tuyère P_o

Au passage de la vapeur dans les vannes (soupapes de réglage), on observe une perte de pression évaluée à :

$$P = 3\text{à}4 \% \text{ de la pression d'admission}$$

$$P_o = P_{adm} - P = (1 - 0.04) P_{adm}$$

$$P_{adm} = 2.3 \text{ bar}$$

$$P_o = 2.208 \text{ bar}$$

Dans notre cas la vapeur est surchauffée $p_{cr} = 1.205 \text{ bar}$

Du diagramme de mollier on determine la chute d'enthalpie correspondant à cette pression critique $h_{cr} = 32 \text{ Kcal/kg}$

La célérité du son dans ce milieu et dans ces conditions est de

$$a = 500 \text{ m/s}$$

On fixe l'angle d'injection pour évaluer la vitesse axiale de la vapeur

$$\alpha_1 = 11^\circ$$

La vitesse axiale vaudrait

$$C_{ax} = 96.76 \text{ m/s}$$

le volume massique de la vapeur au point de sortie de la turbine est de

$$v = 27.84 \text{ m}^3/\text{kg}$$

et le débit massique est fixé à

$$\dot{m} = 20.28 \text{ kg/s}$$

$$l \cdot D_m = \frac{\dot{m} \cdot v}{(\pi \cdot C_{ax})}$$

$$\text{D'où } l \cdot D_m = 1.86 \text{ m}^2$$

Sachant que

$$l = \frac{D_{ex} - D_{in}}{2}$$

$$\text{et } D_m = \frac{D_{ex} + D_{in}}{2}$$

en combinant ces équations on a

$$l \cdot D_m = \frac{D_{ex}^2 - D_{in}^2}{4}$$

le diamètre intérieur étant le diamètre extérieur du tambour. Il doit être supérieur à une certaine valeur, qu'on prendra égale à 0.5 m comme première approche du problème

$$\text{donc } D_{ex} = 2 \cdot \sqrt{1.86 + D_{in}^2}$$

$$\text{Diamètre extérieur } D_{ex} = 2.9 \text{ m}$$

$$\text{Diamètre moyen } D_m = 1.7 \text{ m}$$

$$\text{Diamètre intérieur } D_{in} = 0.5 \text{ m}$$

$$\text{La longueur radiale de l'aube } l = 1.2 \text{ m}$$

De ce résultat on peut conclure que le diamètre moyen doit être important. Il doit au moins être égal à 1.7 m, pour pouvoir utiliser un tambour sur lequel seront fixées les aubes.

Si ce diamètre moyen est maintenu pour tous les étages de la turbine, la longueur d'aubage au niveau du premier étage est de l'ordre de

$$l = 0.03 \text{ m}$$

Pour des angles d'injection plus importants on obtient des longueurs d'aubages plus faibles, ce qui nous pousse à choisir un diamètre plus faible (pour avoir des longueurs d'aubages acceptables).

Pour répondre à ces deux conditions , nous choisirons au début un diamètre non important permettant d'avoir des longueurs d'aubage acceptables aux niveau des premiers étages ,et ensuite on l'augmentera dès que le diamètre interieur prend des valeurs faibles ,ne permettant plus l'emploi de tambour .

On a élaboré un programme informatique permettant l'optimisation d'un étage de turbine, et la détermination de l'évolution de plusieurs caractéristiques à travers cet étage (la methode de calcul sera vue plus loin).

2-Présentation des données de la turbine à étudier

La turbine basse pression , recoit la vapeur à son entrée avec les caractéristiques thermodynamiques suivantes : (10)

$$t_0 = 241 \text{ } ^\circ\text{c}$$

$$P_0 = 2.3 \text{ bar}$$

$$H_0 = 705 \text{ Kcal/kg}$$

le debit massique étant de $\dot{m} = 20.28 \text{ kg/s}$

La vapeur sort au niveau du condenseur à une pression

$$P_s = 0.046 \text{ bar}$$

l'arbre tourne à $N = 3000 \text{ tr/mn}$

3- Modelisation du problème :

Dans les turbines à aubes extralongues on ne peut parler d'étage à action ,car les filets fluides éloignés de l'axe de rotation , opèrent à des degrés de réaction non negligeables .

A cause de la variation de pression suivant de pression suivant le rayon la détente ne peut s'operer uniformement sur toute la longueur de l'ailette , la vitesse d'entrée décroît avec l'augmentation du rayon . sachant que la vitesse axiale doit être constante pour éviter la création de tourbillons (6) ,l'angle d'injection de la vapeur croît avec l'accroissement du rayon .

L'angle de déviation des filets fluides change avec le changement du rayon à cause de la variation des triangles des vitesses .

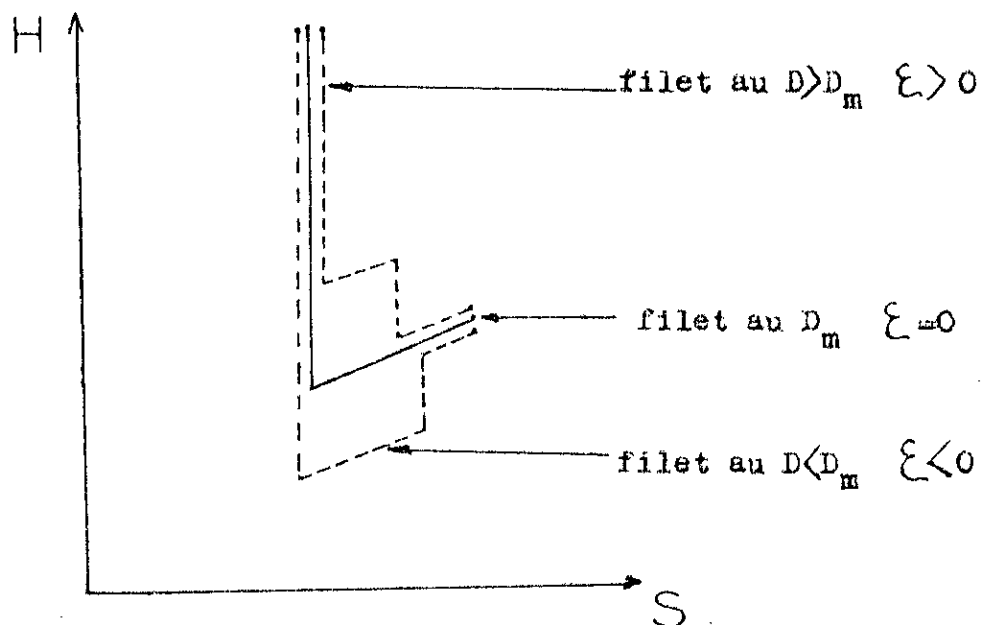
A cause des facteurs de pertes de vitesses dépendant de l'angle de déviation , le rendement n'est pas le même pour tous les filets fluides . Chaque filet fluide aura son propre rendement , à son passage à travers l'étage .

On essaiera de déterminer les rendements des filets fluides pour différents rayons (du rayon maximal au rayon minimal) .

On a pris le rendement d'étage comme étant la moyenne des différents rendements . Il est ensuite déterminé par intégration numérique (méthode de trapèze) .

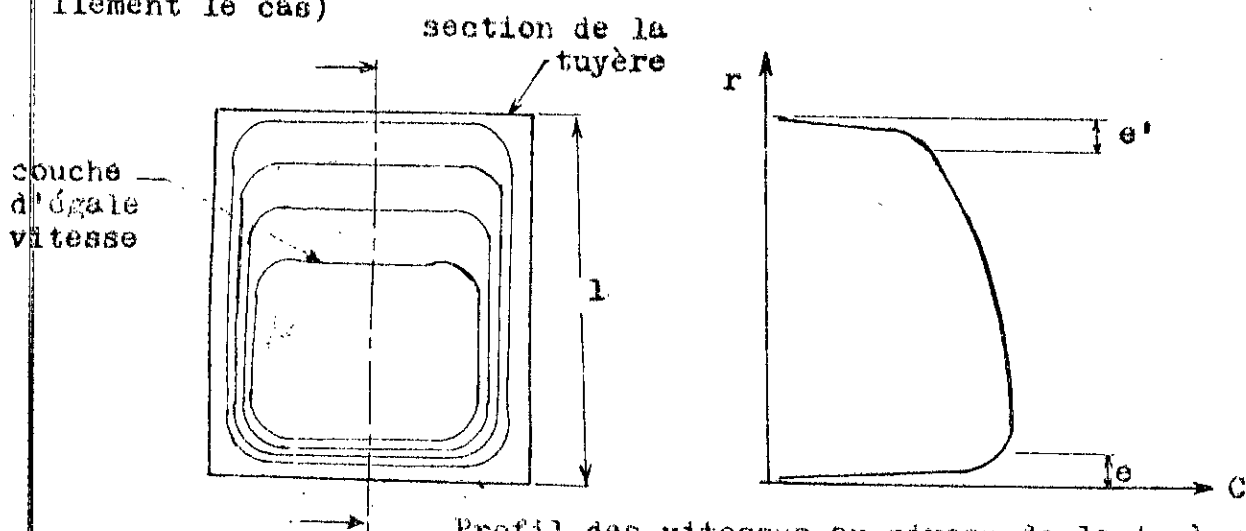
Dans le travail qui suivra (programme Informatique) , on a considéré que les étages sont à action (degré de réaction nul) à la base de l'ailette seulement , pour éviter une compression au niveau de la roue .

Dans le cas où l'étage est à action au niveau de son diamètre moyen, les filets fluides se trouvant à des diamètres supérieurs à ce dernier , opèrent à des degrés de réaction non nuls . Ceux qui se trouvent plus bas que le diamètre moyen , opèrent une compression au niveau du rotor afin de maintenir l'irrotationnalité de l'écoulement, faute de quoi on assiste à l'apparition de turbulence induisant des pertes considérables .



L'étude complexe de la couche limite ne relevant pas de ce projet est évitée .

On suppose que son influence est négligeable (ce qui n'est pas réellement le cas)



Profil des vitesses au niveau de la tuyère

Les épaisseur e et e' sont négligées devant la longueur radiale de l'aube l .

Les calculs ne sont plus basés sur le nombre de Parsons , qui perd sa signification dans le cas de ces turbines à aubes longues (vu qu'il est basé sur l'étude simplificative au niveau du diamètre moyen de la turbine) . Cependant on l'utilisera pour évaluer les rapports de vitesse $\xi = U/C_1$, susceptibles de donner un rendement d'étage maximal

De l'étude théorique , on sait que la valeur de ξ donnant un rendement d'étage maximal , se situe au environ de 0.5 . Elle prend des valeurs d'autant plus grandes que la recuperation de vitesse entre étages est totale .

Dans notre recherche d'optimisation des paramètres des étages , au Lieu de choisir des chutes d'enthalpie , on choisira des rapports de vitesse circonférentielle et de vitesse d'injection de vapeur . Si on se fixe des chutes d'enthalpie , et on a augmentation du diamètre moyen , la valeur donnant un rendement d'étage maximal pourrait se trouver en dehors de l'intervalle fixé .

Le rendement étant fonction de U/C_1 et de α_1 , on choisit à l'intérieur des plages de ces deux facteurs, des valeurs pour lesquelles le calcul sera fait .

Les constructeurs utilisent un nombre de Parsons moyen de 2000 ,mais le rendement maximal est atteint pour des nombres plus importants .

On a
$$\sum U^2 = \chi . H$$

avec H : chute d'enthalpie à travers toute la turbine

Si on a les mêmes diamètres moyens et chutes d'enthalpie pour tous les étages ,on obtient

$$U^2 = \chi \cdot h_{et} \quad \text{car } h_{et} = H/Z$$

Z : nombre d'étage

vu que
$$C_1 = 91.5 \sqrt{h_{et}}$$

D'ou
$$U/C_1 = \sqrt{\chi} / 91.5$$

On considère le facteur de qualité $2000 < \chi < 3770$

$$0.4917 < U/C_1 < 0.671$$

L'angle d'injection est fixé par les constructeurs

$$10 < \alpha_1 < 25$$

on utilise dans ces intervalles 14 valeurs pour lesquelles le calcul sera fait

U/C_1	0.491	0.505	0.519	0.533	0.546	0.56	0.574	0.588	0.602	0.615	0.629	0.643	0.657	0.671
α_1	10	11	12	13	14	15.22	16.44	17.66	18.88	20.11	21.33	22.55	23.77	25

On cherchera pour quel couple (U/C_1 , α_1) le rendement de l'étage est le meilleur .

Pour nos calculs on a fixé un diamètre moyen de la turbine qui permet d'avoir des aubes de hauteur acceptable ,sans pour autant avoir une machine encombrante .

Les estimations économiques peuvent aider à avoir le meilleur diamètre, pour lequel, l'investissement à l'encombrement et la réalisation peuvent être amortis par le gain en rendement.

Un calcul pour un $(U/C_1, \alpha_1)$ est présenté afin de montrer la méthode sur laquelle est basé le programme informatique élaboré.

Ce programme permet de faire toutes les combinaisons de U/C_1 et de α_1 et réalisant le calcul pour chaque combinaison, l'organigramme sera vu plus loin.

4 - Plan de calcul :

Les données sont

$$U/C_1 = 0.6299$$

$$\alpha_1 = 25^\circ$$

$$D_m = 1.5 \text{ m}$$

$$U_m = \frac{\pi \cdot D_m \cdot N}{60}$$

$$U_m = 235.619 \text{ m/s}$$

$$C_{1t} = \frac{U_m}{(U/C_1)}$$

$$C_1 = 374.058 \text{ m/s}$$

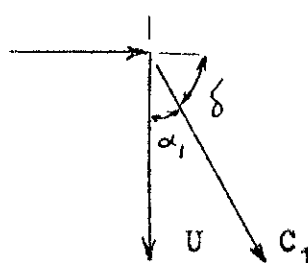
Cette vitesse est obtenue pour une chute d'enthalpie de

$$h = 16.712 \text{ Kcal/ kg}$$

La vitesse est plus petite à cause des pertes par frottement.

L'angle de déviation $\delta = \frac{\pi}{2} - \alpha_1$

$$\delta = 65$$



Du diagramme de Wagner on tire $\varphi = 0.936$

la vitesse axiale théorique

$$C_{axt} = C_{1t} \cdot \sin(\alpha_1)$$

$$C_{axt} = 158.083 \text{ m/s}$$

la vitesse axiale réelle $C_{ax} = \varphi \cdot C_{axt}$

$$C_{ax} = 147.966 \text{ m/s}$$

Du diagramme de Mollier on relève le volume massique de la vapeur après avoir subit une chute d'enthalpie

$$h = 16.712 \text{ Kcal/kg}$$

L'enthalpie après cette détente vaut

$$H_1 = H_0 - h \qquad H_1 = 688.288 \text{ Kcal/kg}$$

le volume massique de la vapeur à cette enthalpie est de

$$v_1 = 1.29 \text{ m}^3/\text{kg}$$

La hauteur d'aube est donnée par

$$l = \frac{\dot{m} \cdot v_1}{\pi \cdot D_m \cdot C_{ax}} \qquad l = 3.74 \text{ cm}$$

Les diamètres intérieur et extérieur valent

$$D_{in} = D_m - l \qquad D_{in} = 1.462 \text{ m}$$

$$D_{ex} = D_m + l \qquad D_{ex} = 1.537 \text{ m}$$

Pour expliquer la méthode de calcul on considèrera trois points (diamètre intérieur, diamètre moyen et le diamètre extérieur)

a - Calcul au niveau du diamètre intérieur :

Ce filet fluide opère un degré de réaction nul

Pour différencier entre les trois points fixés de l'aube, on utilise la notation vectorielle.

$$U(1) = \pi \cdot D_{in} \cdot N / 60 \qquad U(1) = 229.748 \text{ m/s}$$

$$\alpha_1 = 25^\circ$$

$$C_1(1) = \varphi \cdot C_{1t} \qquad C_1(1) = 350.118 \text{ m/s}$$

$$W_1(1) = \sqrt{U(1)^2 + C_1(1)^2 - 2 \cdot U(1) \cdot C_1(1) \cdot \cos(\alpha_1(1))} \qquad W_1(1) = 171.936 \text{ m/s}$$

$$\beta_1(1) = \pi - \sin^{-1}(C_{ax}/W_1(1)) \qquad \beta_1(1) = 120.617^\circ$$

$$\text{L'étage est à action à sa base} \qquad \beta_2(1) = 59.382^\circ$$

L'angle de déviation au niveau du rotor

$$\delta = \beta_1(1) - \beta_2(1) \qquad \delta = 61.235^\circ$$

il lui correspond du diagramme de Wagner un coefficient de frottement

$$\Psi_1 = 0.941$$

$$W_2(1) = \Psi_1 \cdot W_1(1) \qquad W_2(1) = 161.709 \text{ m/s}$$

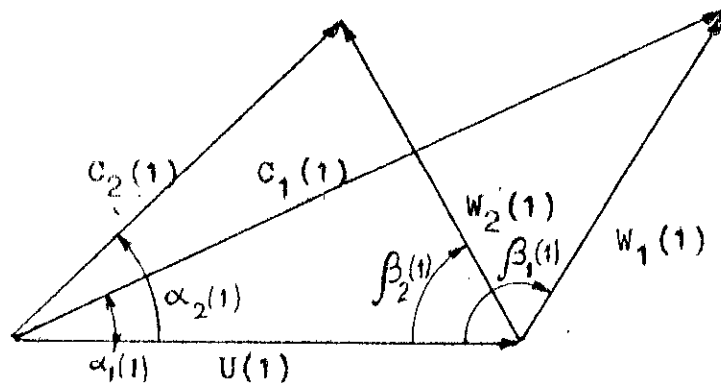
$$C_2(1) = \sqrt{U(1)^2 + W_2(1)^2 - 2 \cdot U(1) \cdot W_2(1) \cdot \cos(\beta_2(1))}$$

$$C_2(1) = 202.709 \text{ m/s}$$

$$\alpha_2(1) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{W_2(1) \cdot \sin(\beta_2(1))}{U(1) - W_2(1) \cdot \cos(\beta_2(1))} \right)$$

$$\alpha_2(1) = 43.355^\circ$$

30 m/s



Triangles des vitesses à la base de l'ailette

Le travail fourni par ce filet fluide, ce calcul de la manière suivante

$$T = U(1) \cdot (C_1(1) \cdot \cos(\alpha_1(1)) - C_2(1) \cdot \cos(\alpha_2(1)))$$

$$T = 39039.96 \text{ J/kg}$$

b - Calcul au niveau du diamètre moyen :

$$U(2) = \pi \cdot D_m \cdot N / 60$$

$$U(2) = 235.649 \text{ m/s}$$

$$C_{1u}(2) = C_{1u}(1) \cdot D_{in} / D_m$$

$$C_{1u}(2) = 330.423 \text{ m/s}$$

$$\alpha_1(2) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{C_{axt}}{C_{1u}(2)} \right)$$

$$\alpha_1(2) = 25.561^\circ$$

L'angle de déviation $\delta_2 = 64.439^\circ$, il lui correspond (du diagramme de Wagner) un facteur de perte de vitesse $\varphi_2 = 0.936$

$$C_1(2) = \varphi_2 \cdot \sqrt{C_{axt}^2 + C_{1u}(2)^2}$$

$$C_1(2) = 343.181 \text{ m/s}$$

$$W_1(2) = \sqrt{U(2)^2 + C_1(2)^2 - 2 \cdot U(2) \cdot C_1(2) \cdot \cos(\alpha_1(2))}$$

$$W_1(2) = 165.509 \text{ m/s}$$

$$\beta_1(2) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{C_1(2) \cdot \sin(\alpha_1(2))}{U(2) - C_1(2) \cdot \cos(\alpha_1(2))} \right) \quad \beta_1(2) = 116.536^\circ$$

$$C_{ax2} = C_2(1) \cdot \sin(\alpha_2(1)) \quad C_{ax2} = 139.165 \text{ m/s}$$

$$W_2(2) = \sqrt{C_{ax2}^2 + (U(2) - C_1(2) \cdot \cos(\alpha_1(2)) + T/U(2))}$$

$$W_2(2) = 166.675 \text{ m/s}$$

$$\beta_2(2) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{C_{ax2}}{U(2) - C_1(2) \cdot \cos(\alpha_1(2)) + T/U(2)} \right)$$

$$\beta_2(2) = 56.610^\circ$$

L'angle de déviation au niveau du rotor vaut

$$\delta = 59.922^\circ$$

Du diagramme de Wagner $\Psi_2 = 0.942$

$$W_{2t}(2) = W_2(2) / \Psi_2 \quad W_{2t}(2) = 176.937 \text{ m/s}$$

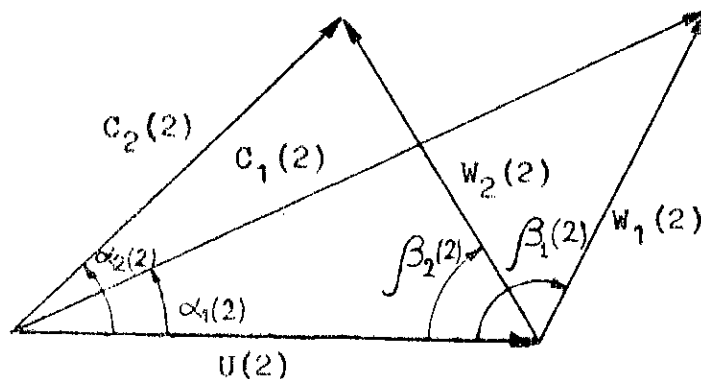
$$C_2(2) = \sqrt{U(2)^2 + W_2(2)^2 - 2 \cdot U(2) \cdot W_2(2) \cdot \cos(\beta_2(2))}$$

$$C_2(2) = 200.201 \text{ m/s}$$

$$\alpha_2(2) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{W_2(2) \cdot \sin(\beta_2(2))}{U(2) - W_2(2) \cdot \cos(\beta_2(2))} \right)$$

$$\alpha_2(2) = 44.037^\circ$$

$\xrightarrow{30 \text{ m/s}}$



Triangles des vitesses à mi-hauteur de l'ailette

Détermination du degré de réaction

$$\xi = \frac{h''}{h' + h''}$$

avec h' : chute d'enthalpie au niveau du stator

h'' : chute d'enthalpie au niveau du rotor

$$h'' = 0.5 \cdot (W_{2t}(2)^2 - W_1(2)^2)$$

$$h' = 0.5 \cdot (C_1(2)/\varphi_2)^2$$

$$\xi = 2.55 \%$$

c - Calcul au niveau du diamètre extérieur :

On écrira que les résultats car le calcul est similaire au calcul précédent

$$C_1(3) = 337.254 \text{ m/s}$$

$$C_2(3) = 198.072 \text{ m/s}$$

$$\alpha_1(3) = 26.061^\circ$$

$$\alpha_2(3) = 44.635^\circ$$

$$W_1(3) = 160.618 \text{ m/s}$$

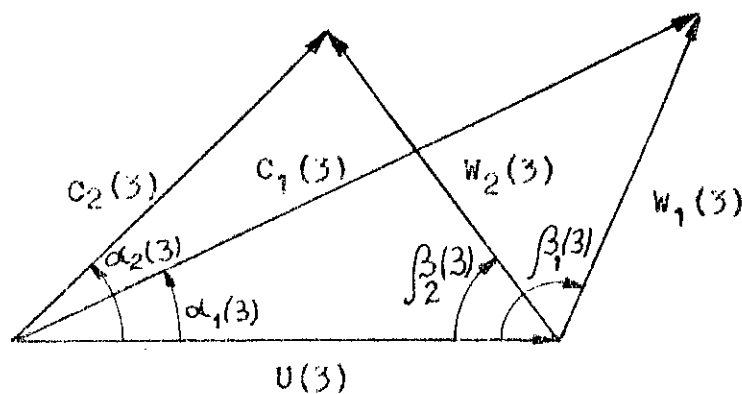
$$W_2(3) = 171.376 \text{ m/s}$$

$$\beta_1(3) = 112.708^\circ$$

$$\beta_2(3) = 54.296^\circ$$

$$U(3) = 240.959 \text{ m/s}$$

$$\xi = 3.04 \%$$



Triangles des vitesses au sommet de l'ailette

Détermination des rendements au niveau des trois points fixés de l'aube .

On suppose que le coefficient de récupération de vitesse entre étage est de $k = 92\%$, de telle manière que la vitesse de sortie n'est pas totalement perdue .

le rendement s'exprime par $\eta = \frac{\text{chute d'enthalpie réelle}}{\text{chute d'enthalpie théorique}}$

$$\eta_{u1} = \frac{h - (1/\psi_1^2 - 1) \cdot C_1(i)^2/2 - (1/\psi_1^2 - 1) \cdot W_2(i)^2/2 - (1-k) \cdot C_2(i)^2/2}{h}$$

rendement à la base de l'ailette

$$\eta_{u1} = 0.821$$

Rendement au niveau du diamètre moyen

$$\eta_{u2} = 0.828$$

Rendement au sommet

$$\eta_{u3} = 0.839$$

On remarque que plus on s'éloigne de l'axe de rotation plus le rendement du fillet fluide est meilleur .Ceci est dû à l'angle de déviation qui diminue avec l'augmentation du diamètre .

Pour évaluer le rendement de l'étage, (fonction du diamètre), une intégration graphique de celle-ci peut être faite ,ou simplement une approche par moyenne arithmétique des rendements aux différents diamètres .

$$\eta_{\text{étage}} = \frac{\eta_{u1} + \eta_{u2} + \eta_{u3}}{3}$$

$$\eta_{\text{étage}} = 0.829$$

les pertes par fuites internes sont données par

$$\sum_{fi} = 1.72 \cdot S^{1.4} / l$$

avec S : jeu radial (0.6-0.8) mm

dans notre cas $\sum_{fi} = 0.027$

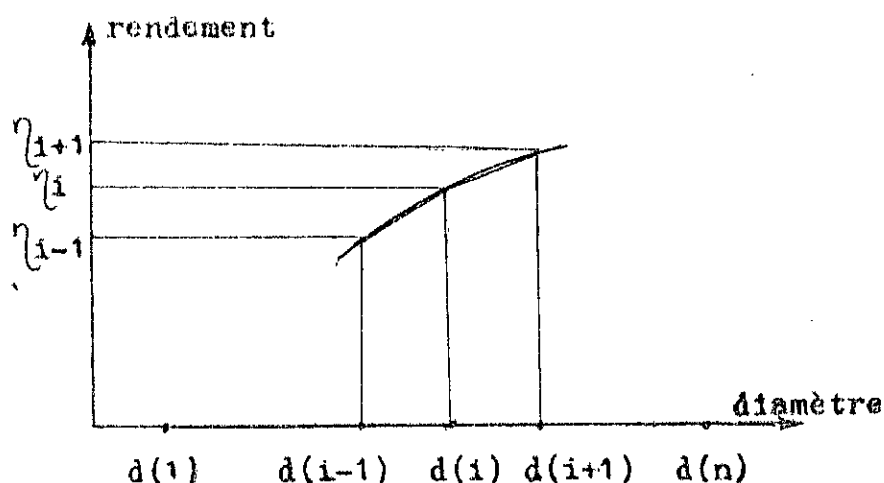
Le rendement de l'étage sera égal

$$\eta_{\text{étage}} = 0.802$$

Dans le programme informatique élaboré, le rendement moyen d'étage est déterminé par la méthode d'intégration des trapèzes, laquelle est explicitée brièvement ci-dessous.

Considérons n points sur l'aube localisés par des diamètres $d(i)$.

Le filet fluide se trouvant au diamètre $d(i)$, a un rendement η_i .



le rendement en fonction du diamètre

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(\eta_i + \eta_{i+1})}{2} \cdot (d(i+1) - d(i))$$

avec S : l'aire délimitée par la courbe du rendement du diamètre intérieur au diamètre extérieur.

Le rendement moyen de l'étage s'exprime par :

$$\eta_{\text{moy}} = \frac{S}{d(n) - d(1)}$$

ce rendement est corrigé par les pertes en rendement dues aux fuites internes et à l'humidité de la vapeur.

5- Résultats et commentaires :

Ayant fixé le diamètre moyen à 1.5 m, le rendement maximal du premier étage est égal à

$$\eta_1 = 0.828$$

IL est obtenu pour une chute d'enthalpie

$$h = 16.712 \text{ Kcal/kg}$$

et un angle d'injection

$$\alpha_1 = 25^\circ$$

L'évolution des angles et des vitesses suivant le diamètre au

niveau du premier étage est donnée aux tableaux (1-a) et (1-b)
On voit que le vrillage est négligeable , la plus grande variation d'angle ne dépasse pas 8 degrés .

La longueur radiale de l'ailette est majorée d'un recouvrement de deux millimètres par rapport à la longueur de la tuyère pour diminuer les pertes par fuites .

longueur de la tuyère est de $l_t = 3.74$ cm

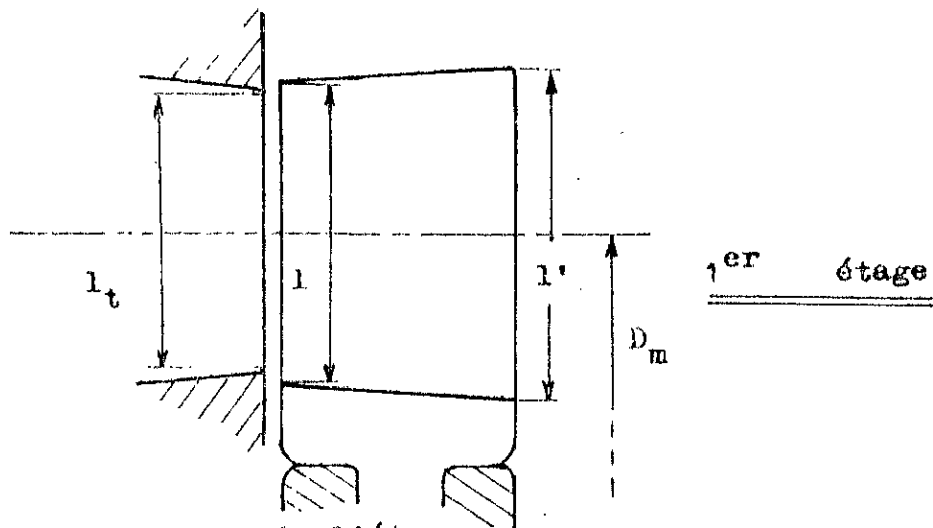
longueur de l'ailette $l = 4.14$ cm

La vitesse de sortie de cet étage est égale à $C_2 = 200.201$ m/s

La vitesse axiale de sortie $C_{ax} = 139.165$ m/s

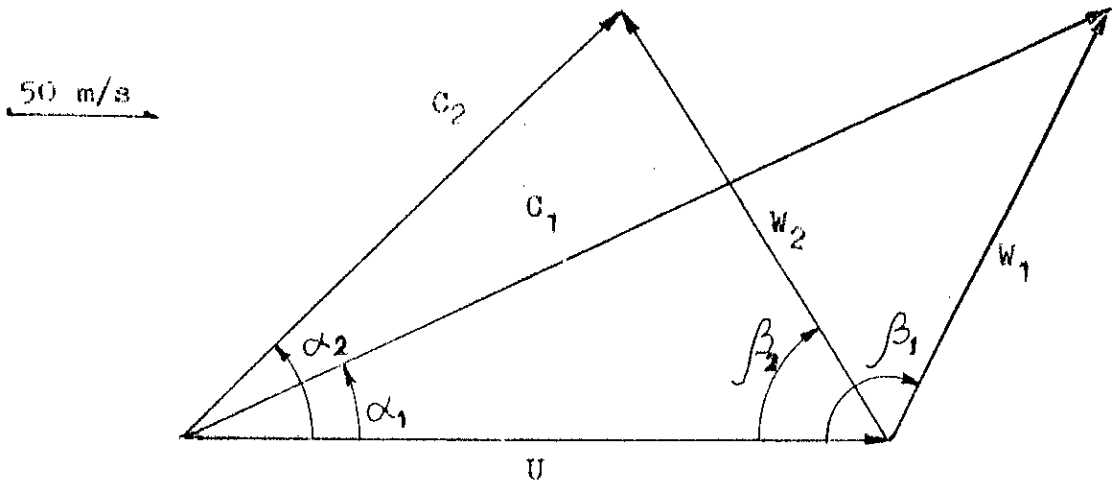
la longueur au bord de fuite est donnée par

$$l' = \frac{\dot{m} \cdot v}{\pi \cdot D_m \cdot C_{ax}} \qquad l' = 4.33 \text{ cm}$$



representation de l'étage

La variation des triangles de vitesse n'étant pas importante de la base à la tête de l'ailette , on représentera les triangles des vitesses seulement au niveau du diamètre moyen



Triangles des vitesses au premier étage (diamètre moyen)

Le travail reçu par l'arbre est de

$$T = 39039.96 \text{ Kcal/kg}$$

en tenant compte des pertes par frottement au niveau du stator et du rotor, perte par vitesses restantes, ainsi que les pertes par fuites internes. La chute d'enthalpie réelle vaut

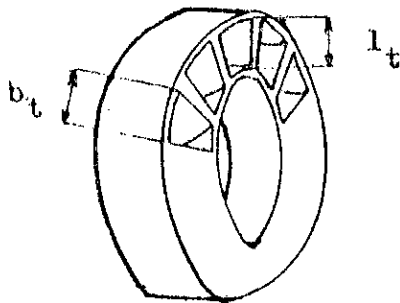
$$h_r = 13.8526 \text{ Kcal/ kg}$$

Determination du nombre de tuyères au niveau du premier étage.

La section d'injection de vapeur étant la couronne de diamètre moyen D_m , limitant la tuyère

la section totale de passage de la vapeur $s = 0.195 \text{ m}^2$

on adopte $b_t = (0.6 - 0.7) l_t$



la section de sortie, est la section minimale car on utilise des tuyères convergentes et elle vaut

$$s_t = b_t \cdot l_t \quad s_t = 11.9 \text{ cm}^2$$

le nombre de tuyères est donné par

$$Z = \frac{S}{s_t}$$

$$Z = 162 \text{ tuyères}$$

Détermination du nombre d'aubes

Le pas entre les ailettes est calculé à partir de la formule suivante

$$t = \frac{B}{2 \cdot \sin(\beta_1 + \beta_2)}$$

avec $t \geq 25 \text{ mm}$ (10)

B doit satisfaire aux deux conditions qui suivent :

- $B \geq 25 \text{ mm}$
- $B \geq 1/10$ (10)

$$Z_{\text{aube}} = \frac{\Pi \cdot D_{\text{in}}}{t}$$

$$Z_{\text{aube}} = 183.47$$

on corrige cette valeur $Z'_{\text{aube}} = 183$ d'ou $t' = 28 \text{ mm}$

Pour le deuxième étage les mêmes remarques qu'au niveau du premier étage peuvent être faites .

Voir les tableaux (2-a) et (2-b) ,resumé des évolution des angles et des vitesses suivant le diamètre qui fixe le cylindre sur lequel évolue le filet fluide .Même au niveau de cet étage , le vrillage peut être négligé ,ce qui nous permet de faire l'étude seulement au niveau du diamètre moyen .

Pour ce qui est du calcul de cet étage la vitesse d'entrée C_1

est donnée par
$$C_1 = \sqrt{2 \cdot h + k \cdot C_2'^2}$$

C_2' : vitesse de sortie de l'étage précédent

Le même travail qu'a l'étage précédent sera fait pour les étages suivant ,les resultats seront resumés dans des tableaux

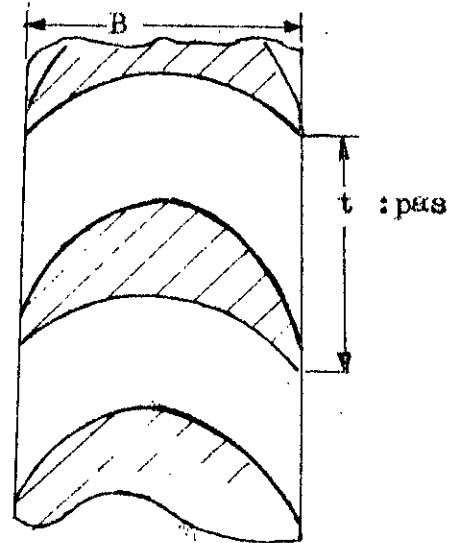
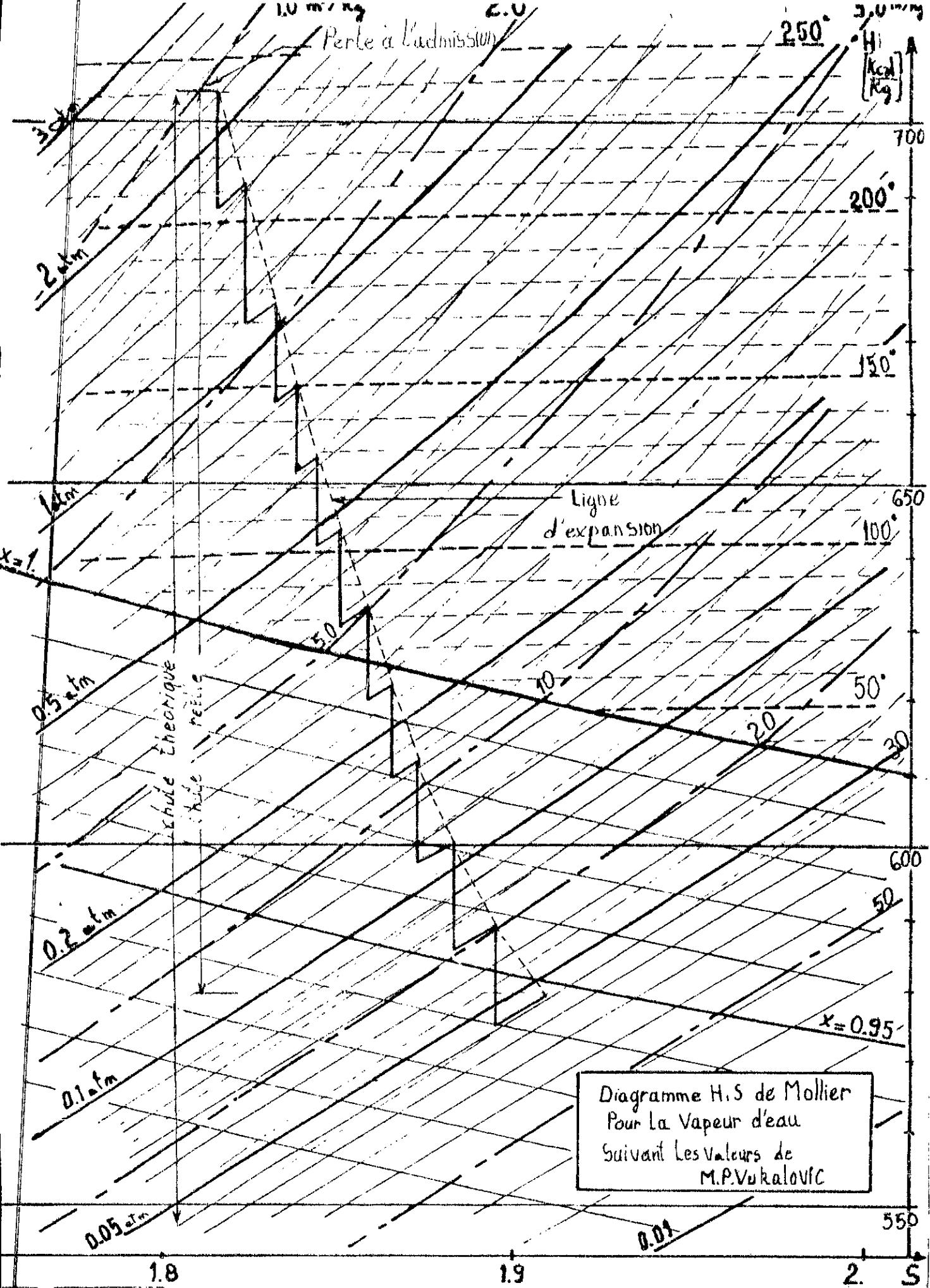


TABLEAU RECAPITULATIF

étage N°	chute Kcal/kg	pression atm	temper °K	volumé m ³ /kg	rendement d'étage	puissan KW	longueu m	D _m m
1	16.712	1.65	476	1.36	0.8288	791.73	0.038	1.5
2	17.294	1.11	443	1.69	0.8309	1393.86	0.049	1.5
3	14.407	0.84	418	2.38	0.8502	1078.67	0.079	1.5
4	11.885	0.62	398	2.92	0.8543	890.827	0.116	1.5
5	12.078	0.47	375	3.7	0.8572	908.014	0.146	1.5
6	12.322	0.33	351	4.8	0.8614	932.23	0.193	1.5
7	12.674	0.24	338	6.5	0.8470	990.361	0.303	1.5
8	13.589	0.168	329	8.89	0.8267	985.168	0.365	1.5
9	13.58	0.112	320	12.5	0.8039	971.478	0.473	1.5
10	16.00	0.071	313	19.8	0.7555	765.386	1.21	1.72
11	15.00	0.046	305	28.8	0.6974	689.884	1.60	2.3



Representation de la ligne d'expansion sur diagramme de Mollier pour la turbine étudiée

Les étages de la turbine ont tous été optimisés sauf les deux derniers (10,11), ceci est dû au fait que si on les optimise il restera une faible chute d'enthalpie (perdue), qui ne nécessitera pas un étage supplémentaire .

dans le cas où l'on optimise l'un des deux étage l'autre sera à écoulement supersonique .

Des deux tableaux récapitulatifs, on remarque la forte augmentation du volume massique à faible enthalpie , et de la longueur des aubes, le nombre réduit des tuyères et des aubes au niveau des derniers étages . Dans une finalité constructive, on procéderait à un soutirage qui aura pour rôle de réduire la section de passage de la vapeur (longueur des aubes). Dans notre présent travail, on laissera les données ainsi , pour voir de quelle manière évoluent les différentes caractéristiques le long d'une aube longue .

Détermination du rendement de la turbine :

du diagramme de Mollier $H_{en} = 705 \text{ Kcal/kg}$

en chutant isentropiquement, l'enthalpie de sortie est de :

$$H_{sis} = 548 \text{ Kcal/kg}$$

l'enthalpie de sortie réelle : $H'_B = 580 \text{ Kcal/kg}$

le rendement de la turbine est donné par :

$$\eta_t = \frac{H_{en} - H'_B}{H_{en} - H_{sis}} \quad \eta_t = 0.796$$

Le rendement calculé ci-dessus est basé sur des données prises du diagramme de Mollier (ligne d'expansion réelle), elles sont calculées à partir du rendement moyen d'étage (hypothèse fixée) .

On vérifiera l'exactitude du rendement trouvé, par le calcul d'un nouveau rendement mais cette fois-ci à partir des travaux recueillis sur l'arbre (les travaux fournis par étage étant constants le long de l'aube) .

La somme des travaux reçu par l'arbre est égale à

$$T_t = 512.71 \text{ Kcal/kg}$$

$$\eta_t = \frac{\text{travail reçu}}{\text{chute théorique}}$$

$$\eta_t = 0.781$$

de la comparaison des deux rendements trouvés ,on voit que notre hypothèse d'utilisation du rendement moyen d'étage dans la détermination du point de sortie ,apres chaque étage ,sur le diagramme de Mollier ,est une assez bonne approximation (erreur relative de 1.9 %)

Dans cette verification le coefficient d'auto-surcharge n'est pas pris en consideration .

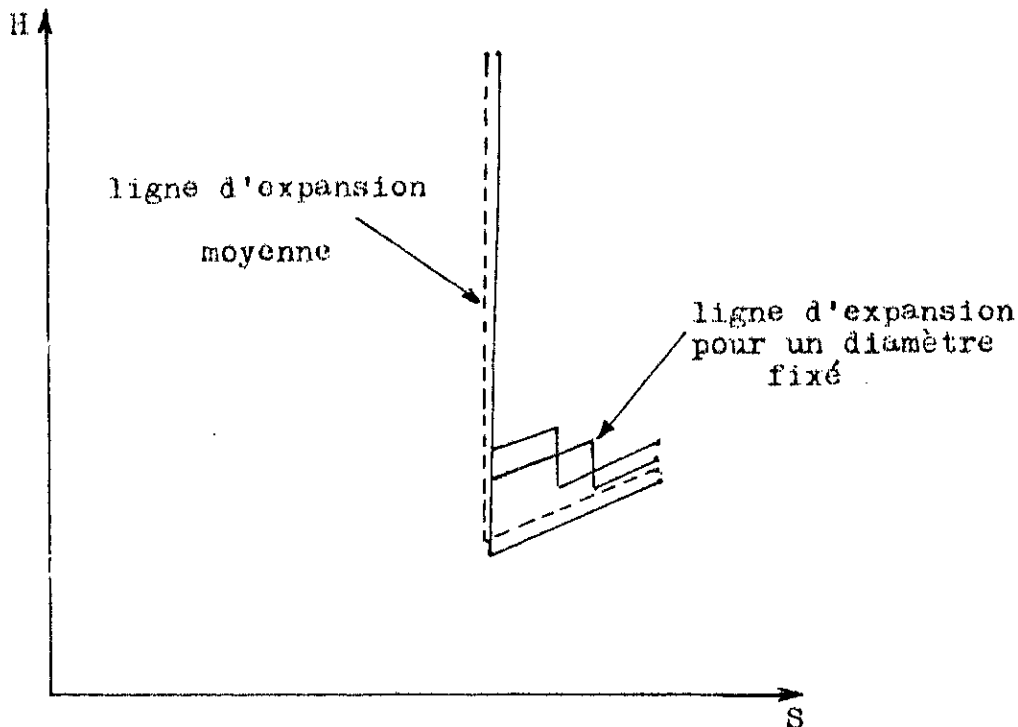
La puissance de cette turbine basse pression est de

$$N_t = 10397.7 \text{ KW}$$

REMARQUE :

En se basant sur le principe de conservation d'énergie , le fluide s'étant détendu d'une même chute d'enthalpie et ayant échangé la même quantité de travail avec l'arbre de la turbine , les différents filets fluides devraient sortir de l'étage avec la même vitesse , ce qui n'est pas le cas (voir tableaux de 1 à 11-b) . Ceci est dû au fait qu'avec l'augmentation du diamètre , l'angle de déviation diminue , entraînant ainsi une augmentation du rendement , par conséquent les différents filets fluides nécessitent une chute d'enthalpie décroissante avec l'accroissement du diamètre pour fournir le même travail et vérifier l'irrotationnelité de l'écoulement , causant ainsi une variation de la vitesse à la sortie de l'étage

N.B : avec l'augmentation du diamètre on a une augmentation du degré de réaction



Evolution des filets fluides aux différents diamètres d'un étage

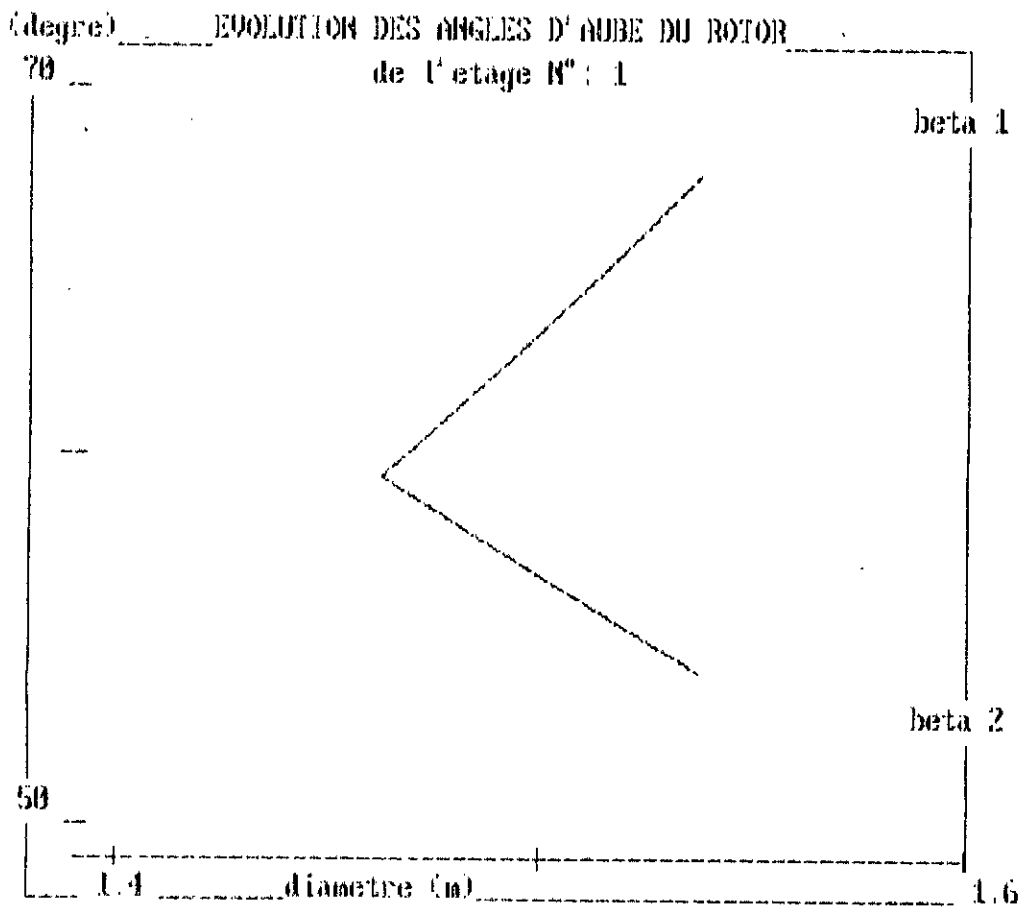
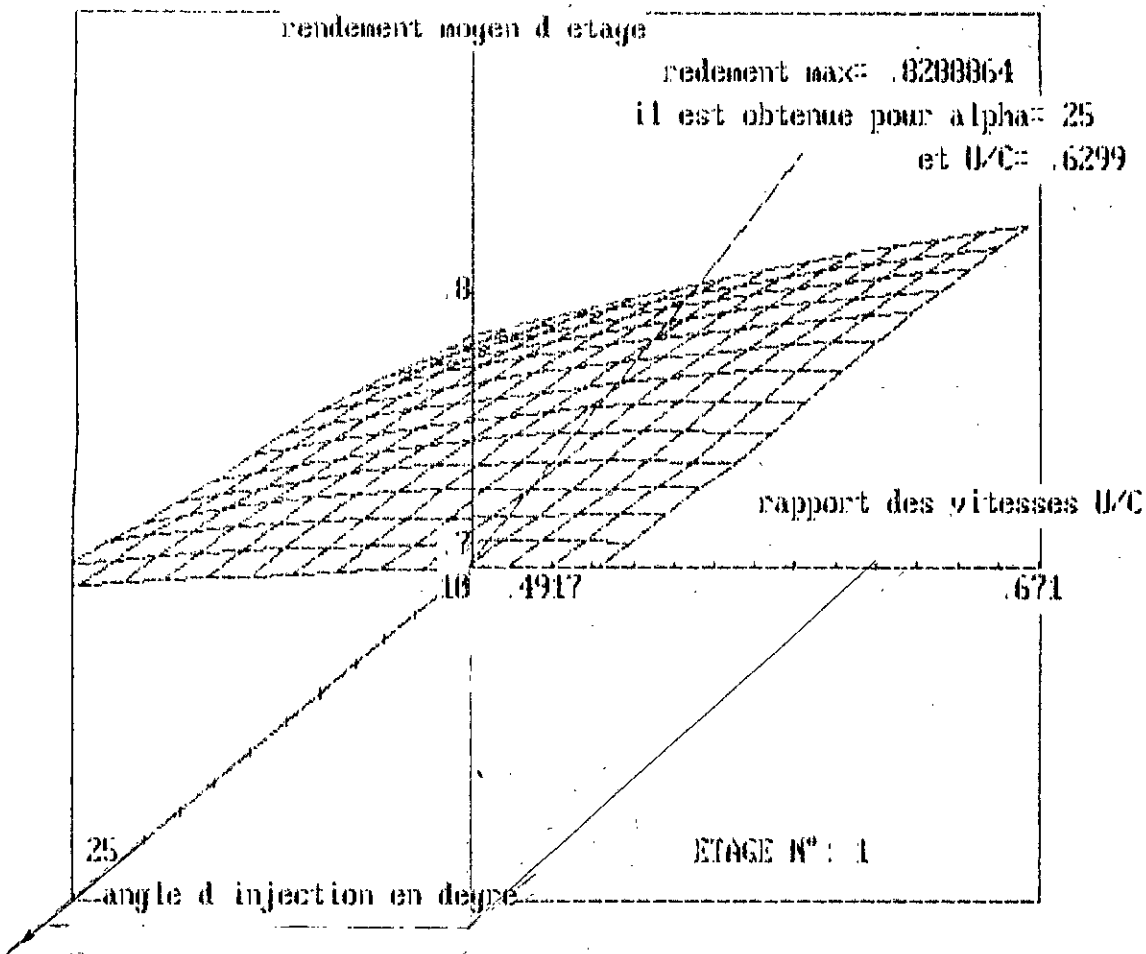
Dans notre travail on suppose que la différence d'état d'énergie des filets fluides aux différents diamètres ,à la sortie d'étage s'équilibre d'elle même (enthalpie moyenne de sortie),par suite de la conduction et aussi des interactions des filets fluides dues à la viscosité du fluide .

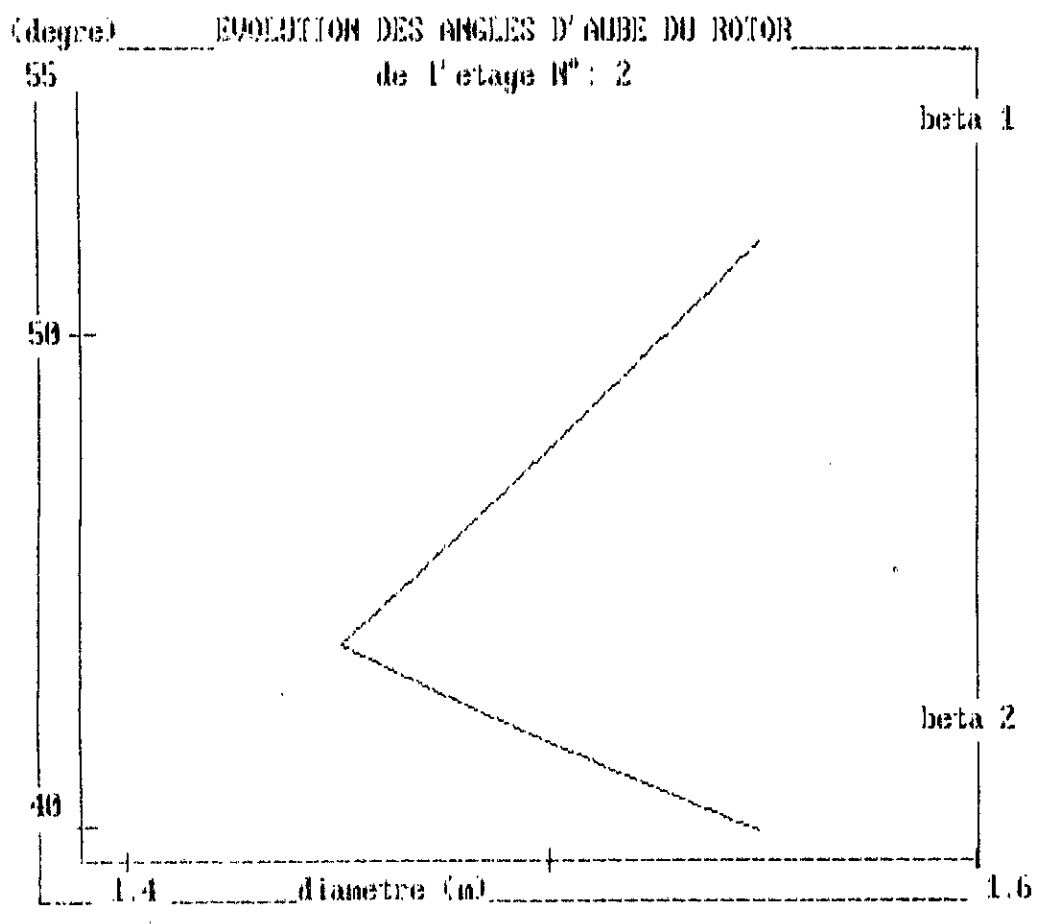
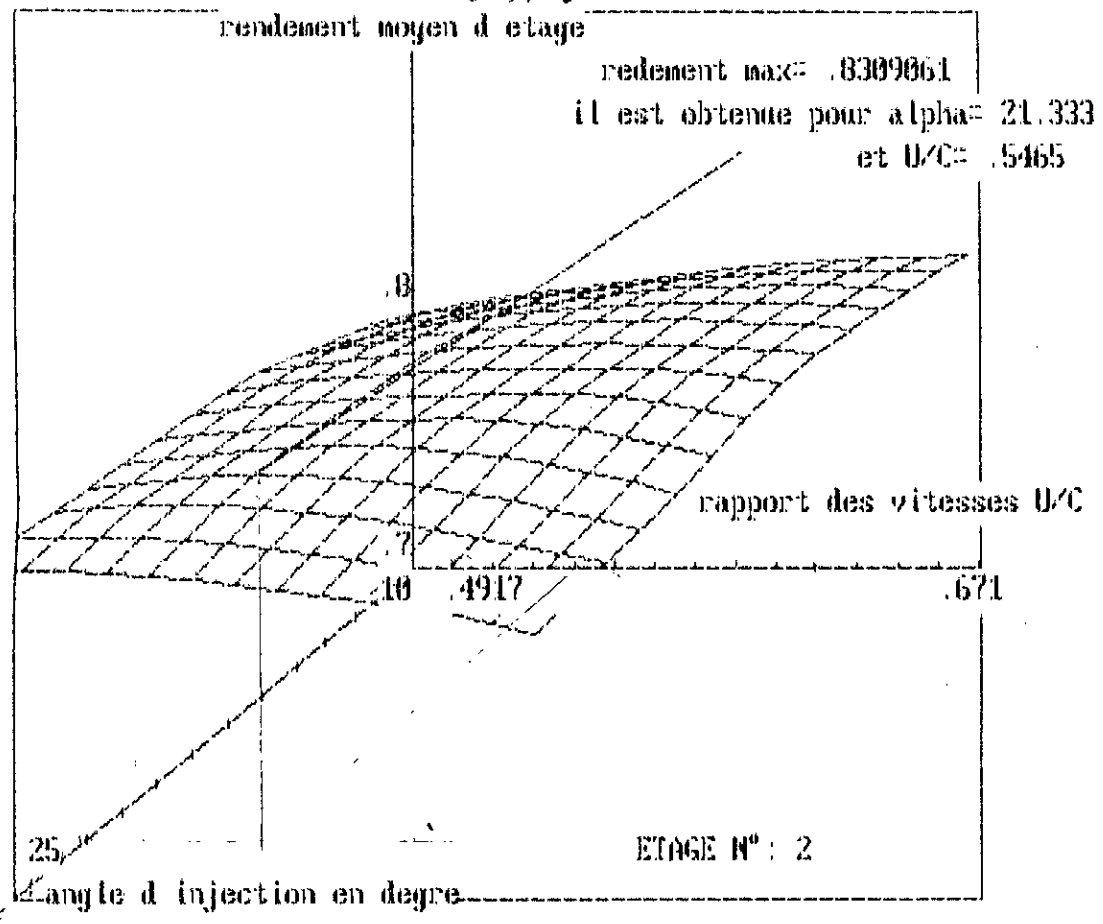
L'entrée d'un étage est la sortie ,de l'étage précédent ,que l'on détermine sur le diagramme de mollier ,par l'emploi du rendement moyen d'étage tenant compte des pertes d'énergie des filets fluides ,se trouvant aux différents diamètres .

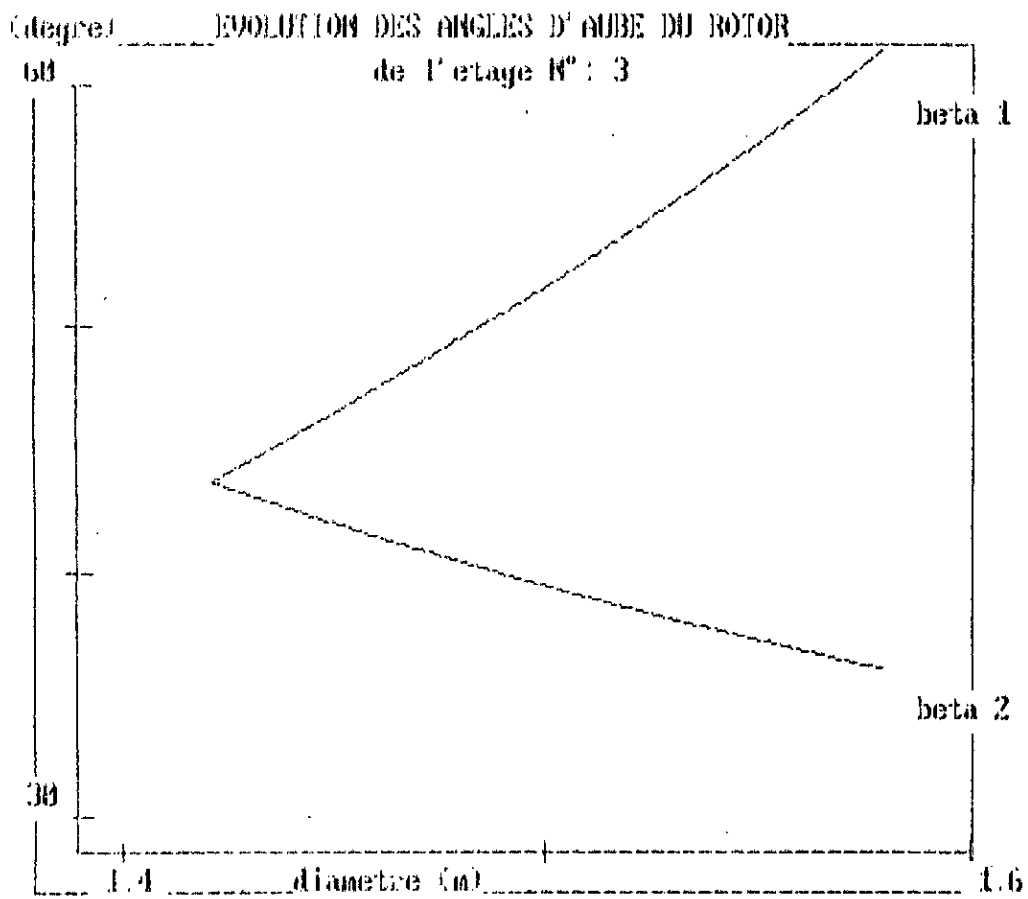
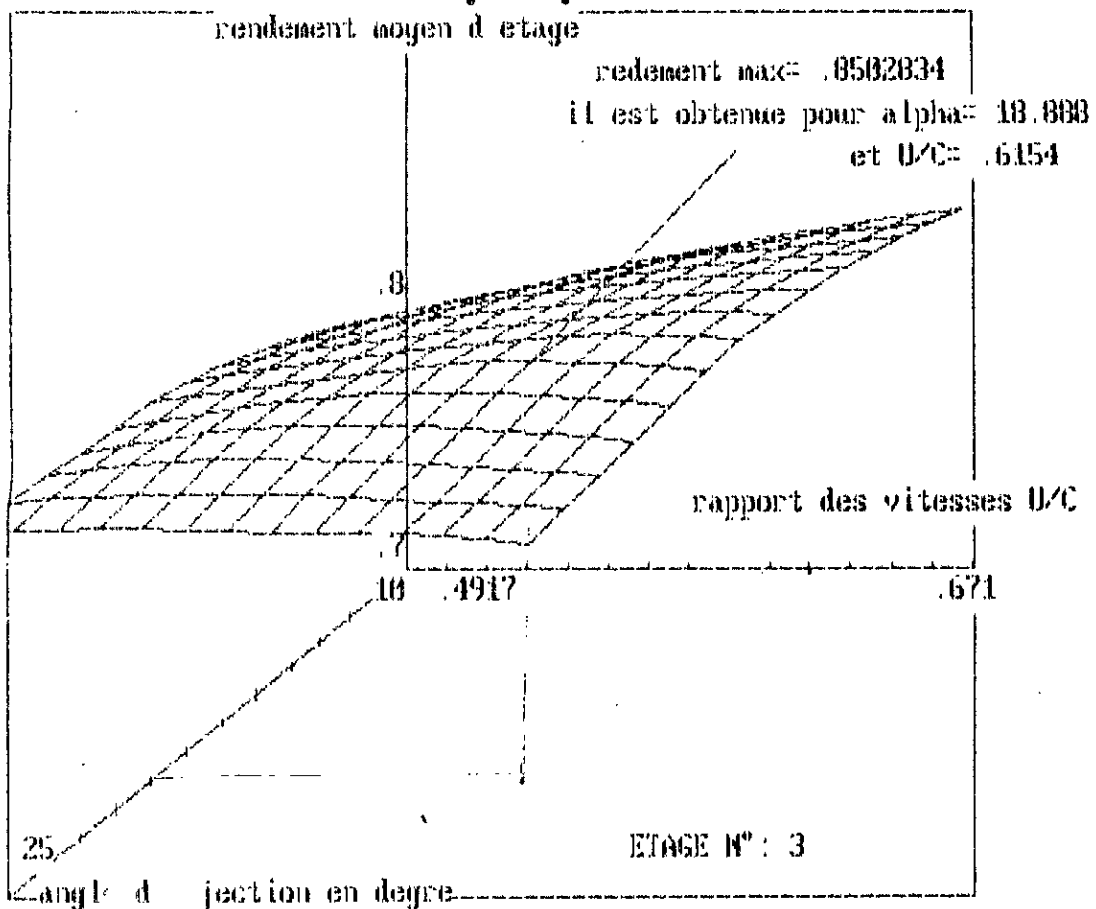
Dans une étude approfondie ,les angles d'entrées et de sorties des ailettes (rotor) subissent des corrections d'autant plus importantes que leurs longueurs sont grandes ,à cause des contraintes de dévissage(dûes à l'action du fluide sur l'aube) .

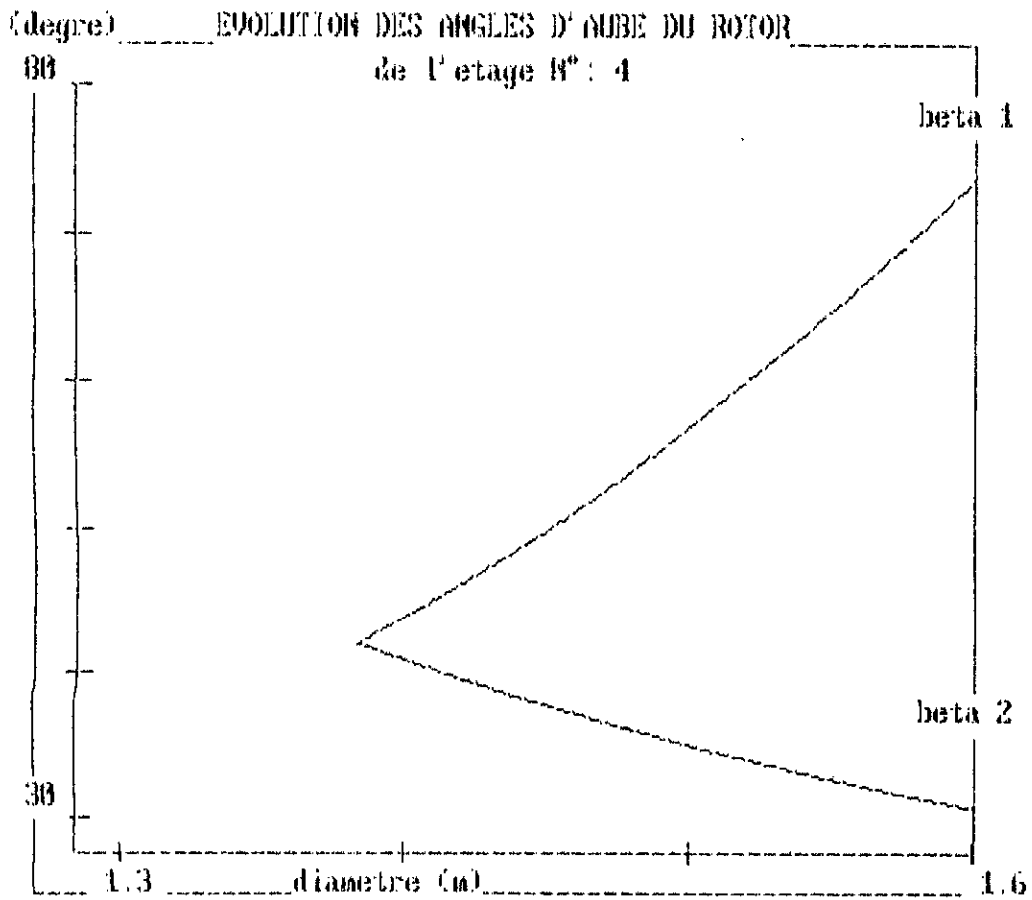
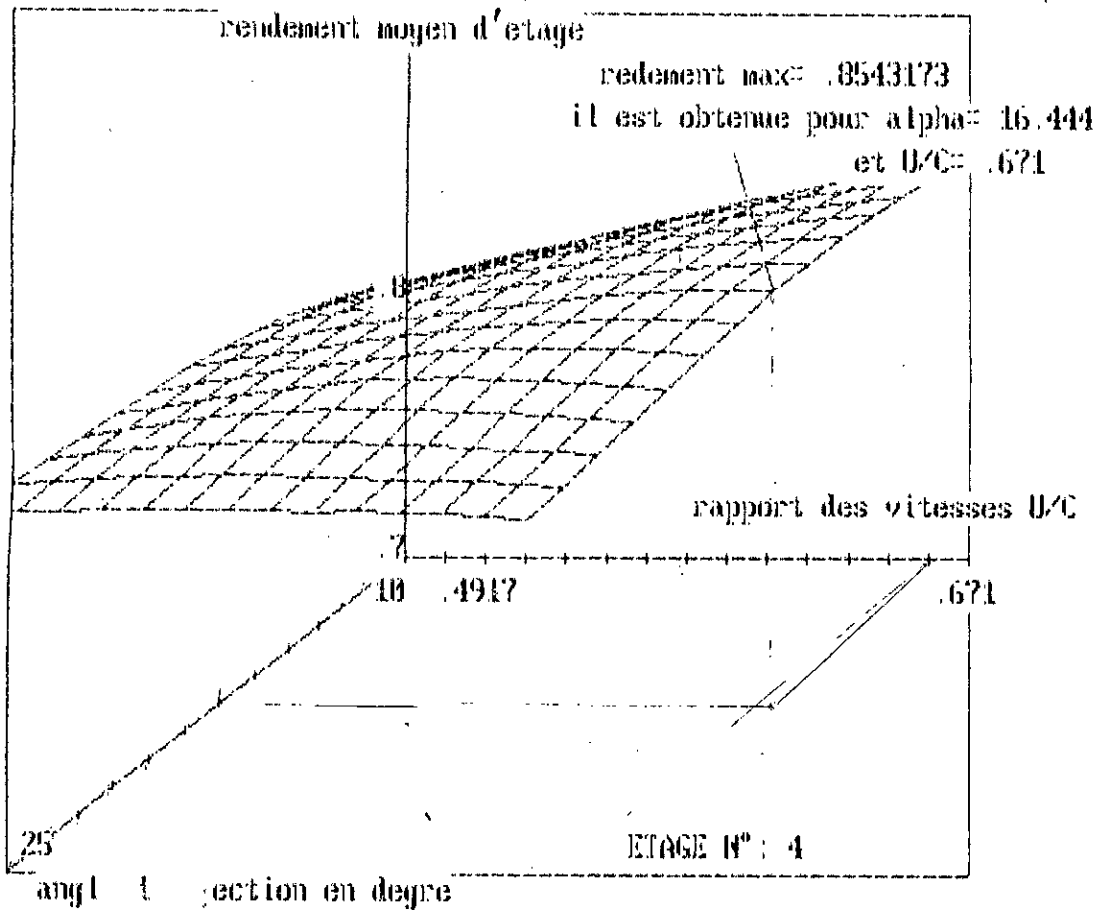
Au niveau des deux derniers étages ,on voit que la longueur des ailettes est très importante .On peut juger de son importance , par le rapport du diamètre extérieur et intérieur ,qui est en même temps le rapport des vitesses périphériques (base ,bout de l'ailette) .

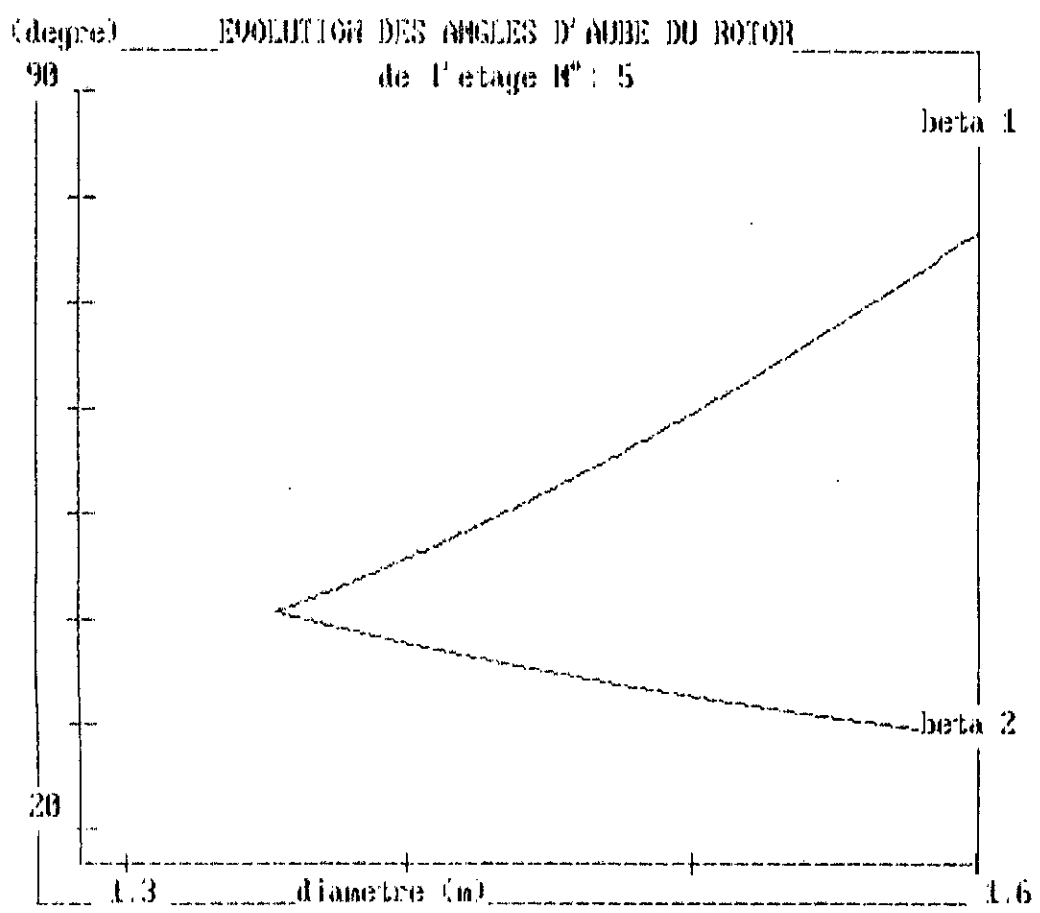
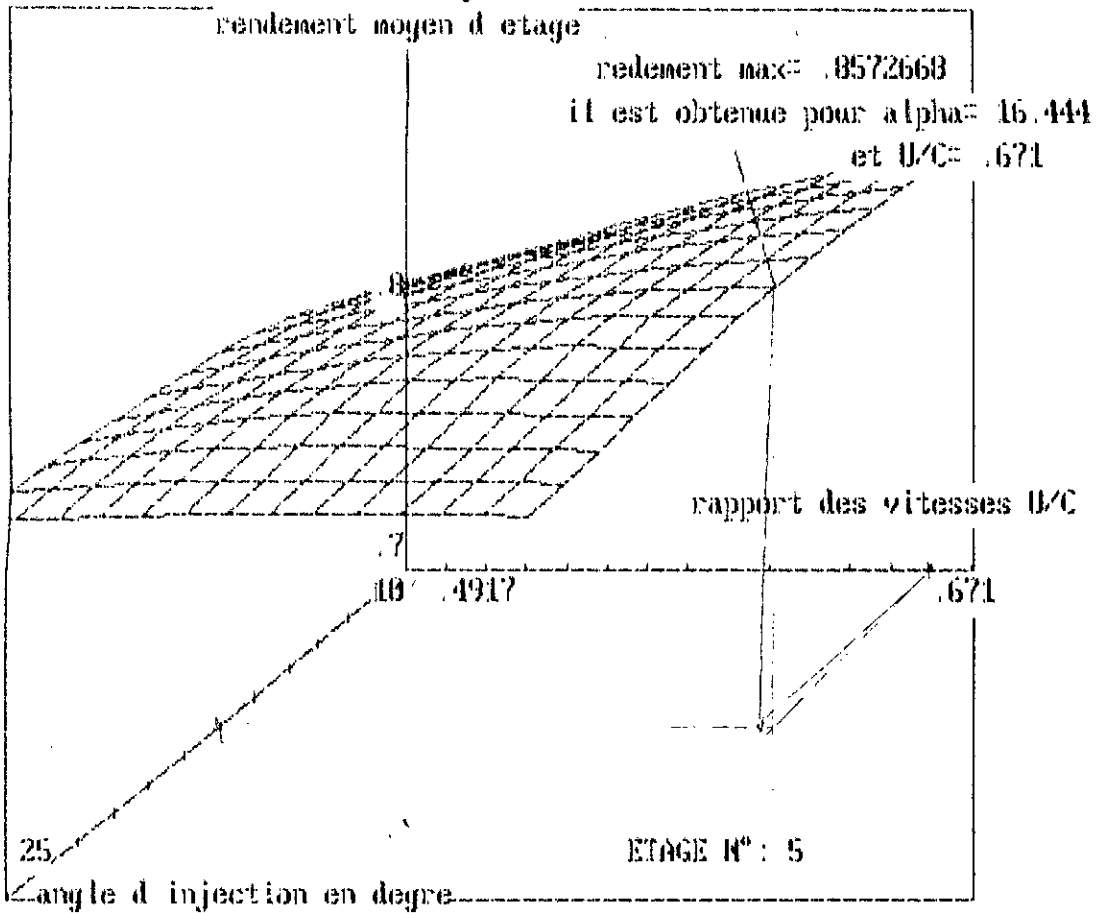
Pour cette étude on a opté exprés ,pour une solution exagérée , afin de mettre en relief les variations des différentes caractéristiques ,vitesse ,angle ,degré de réaction ,et vrillage.

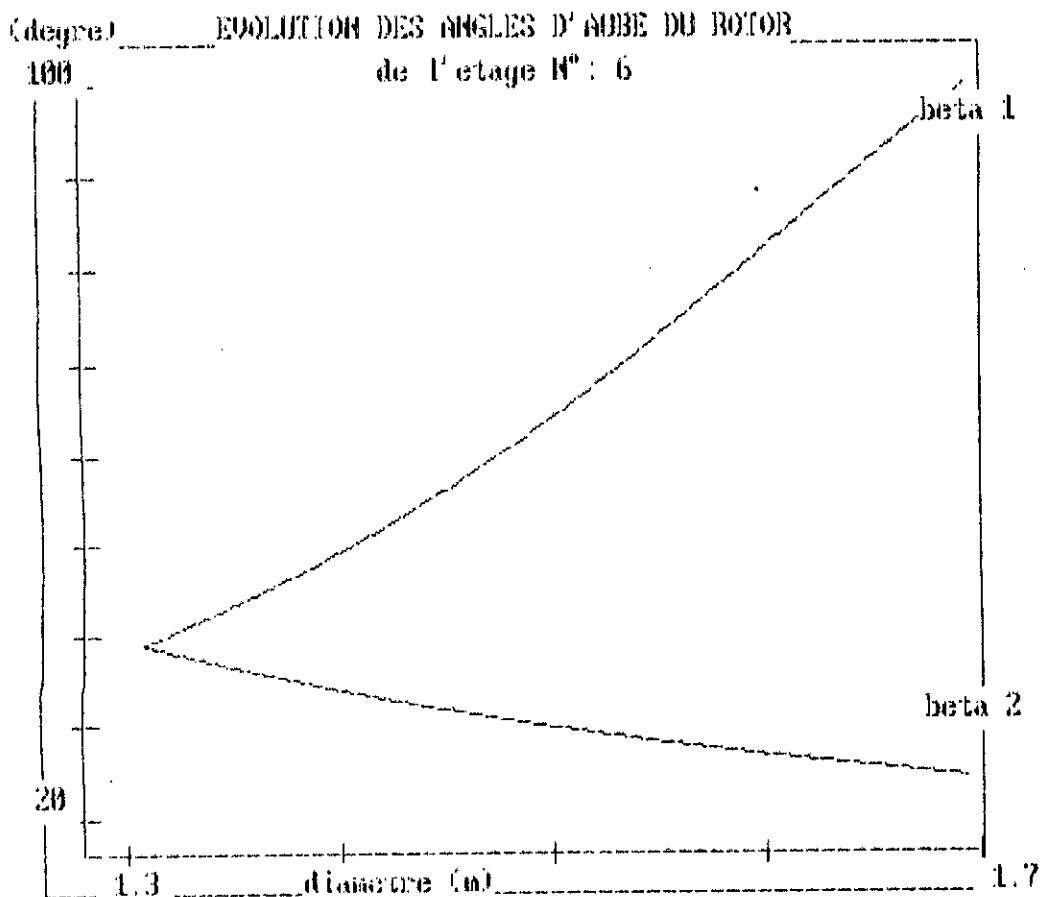
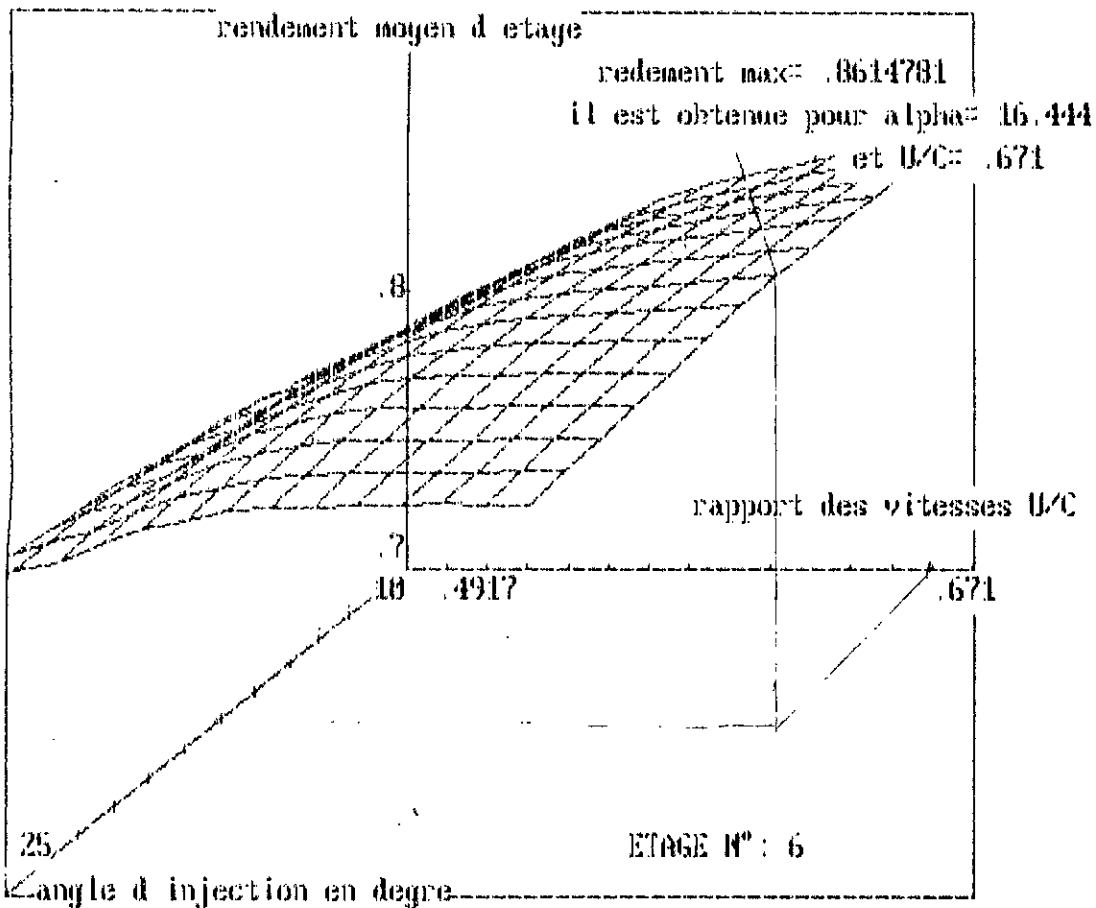


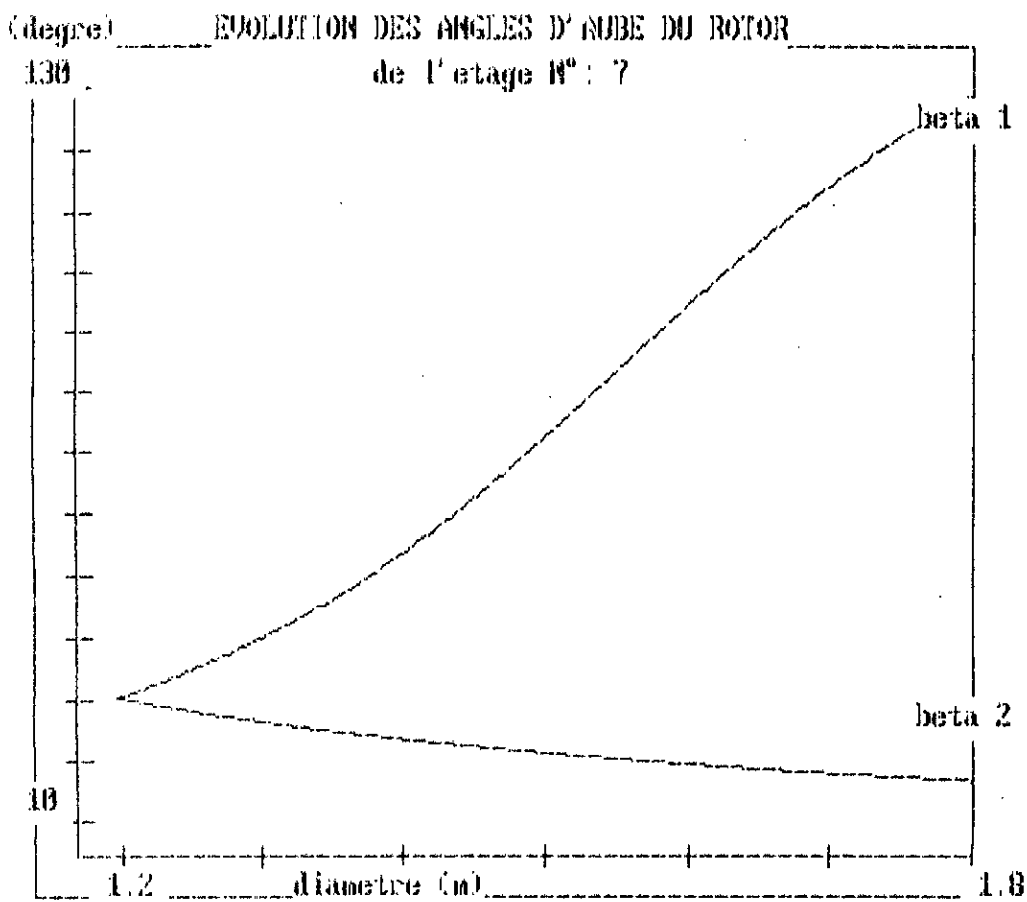
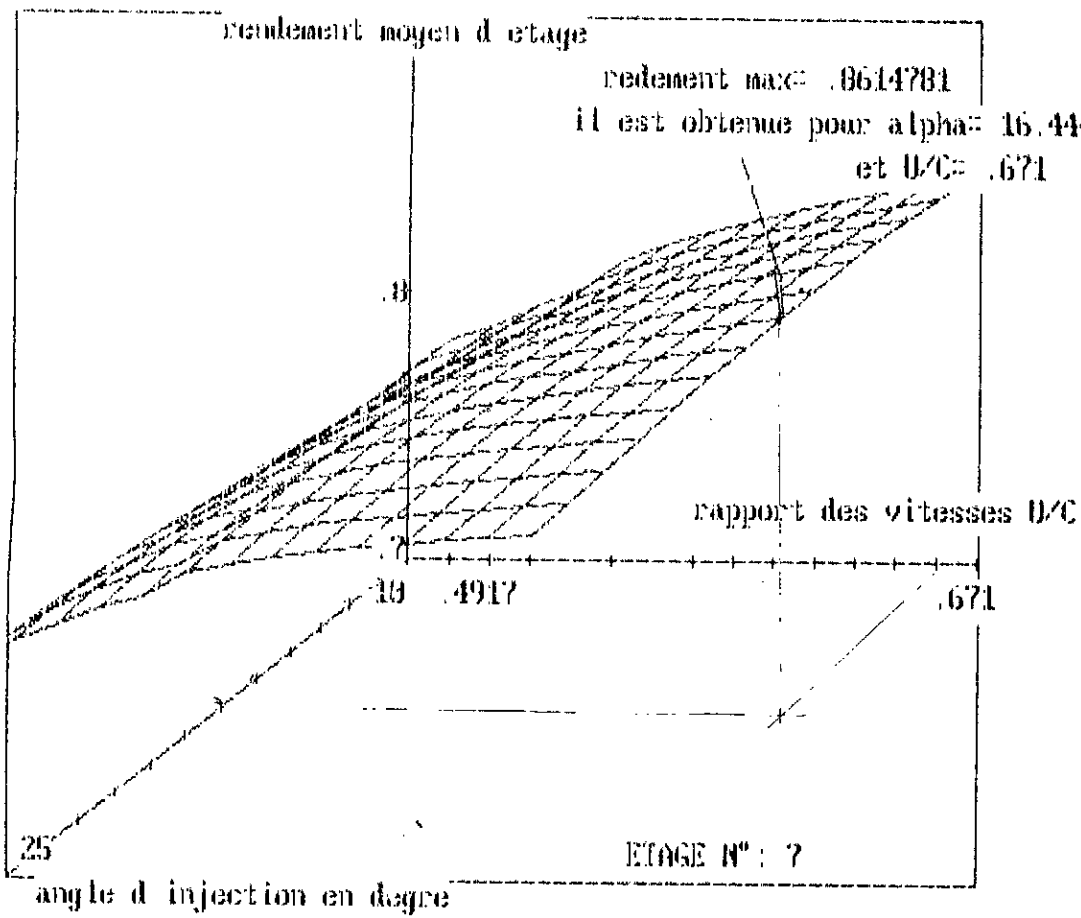


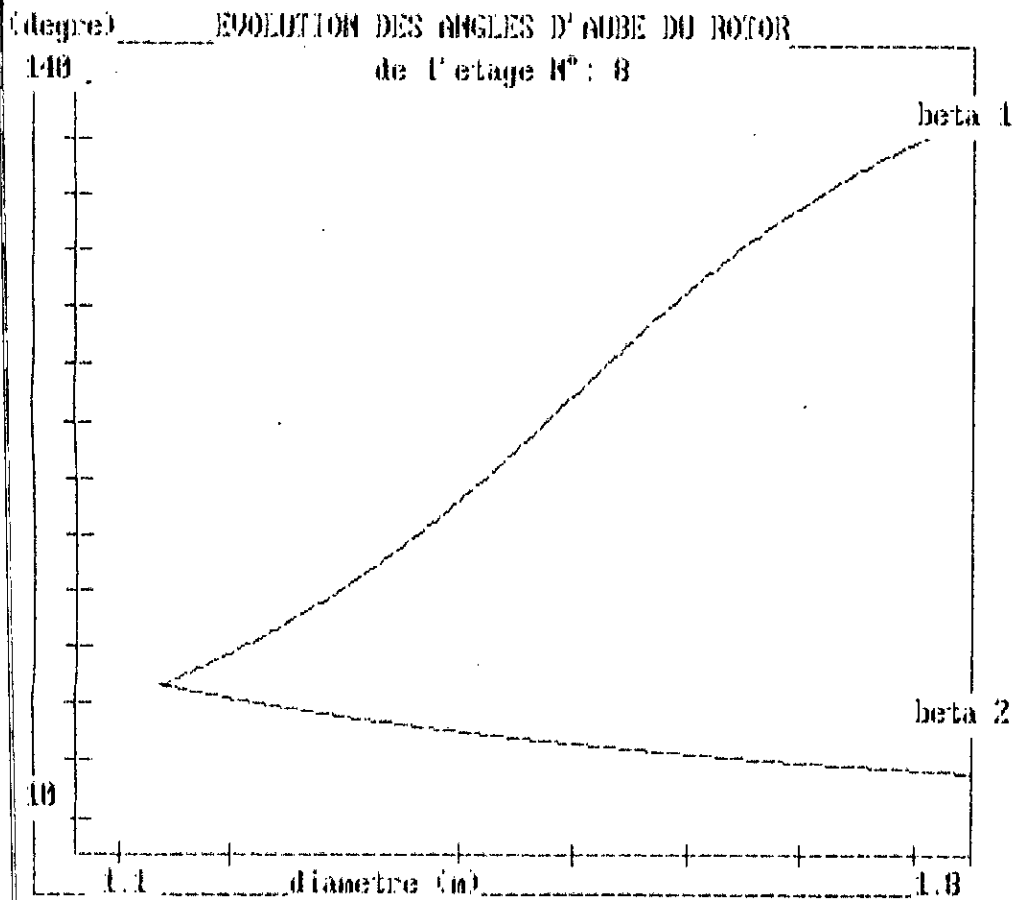
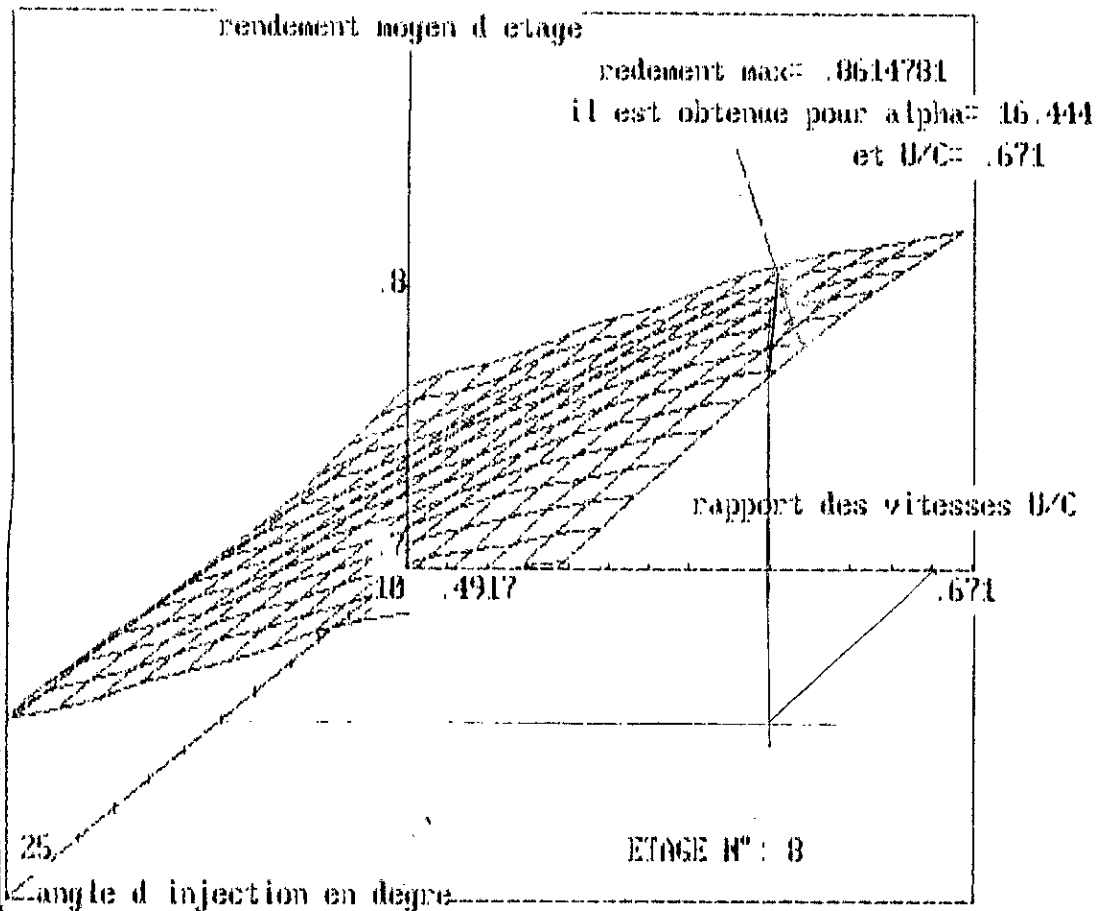


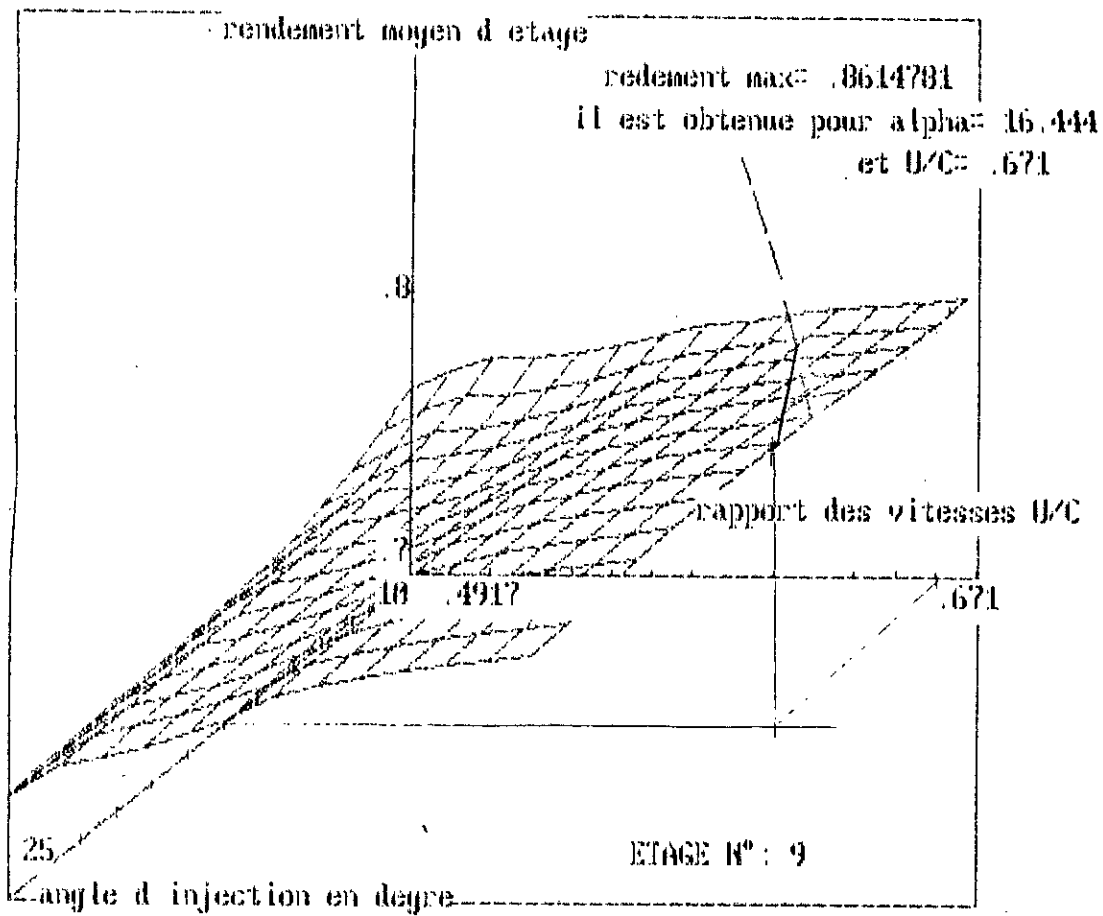




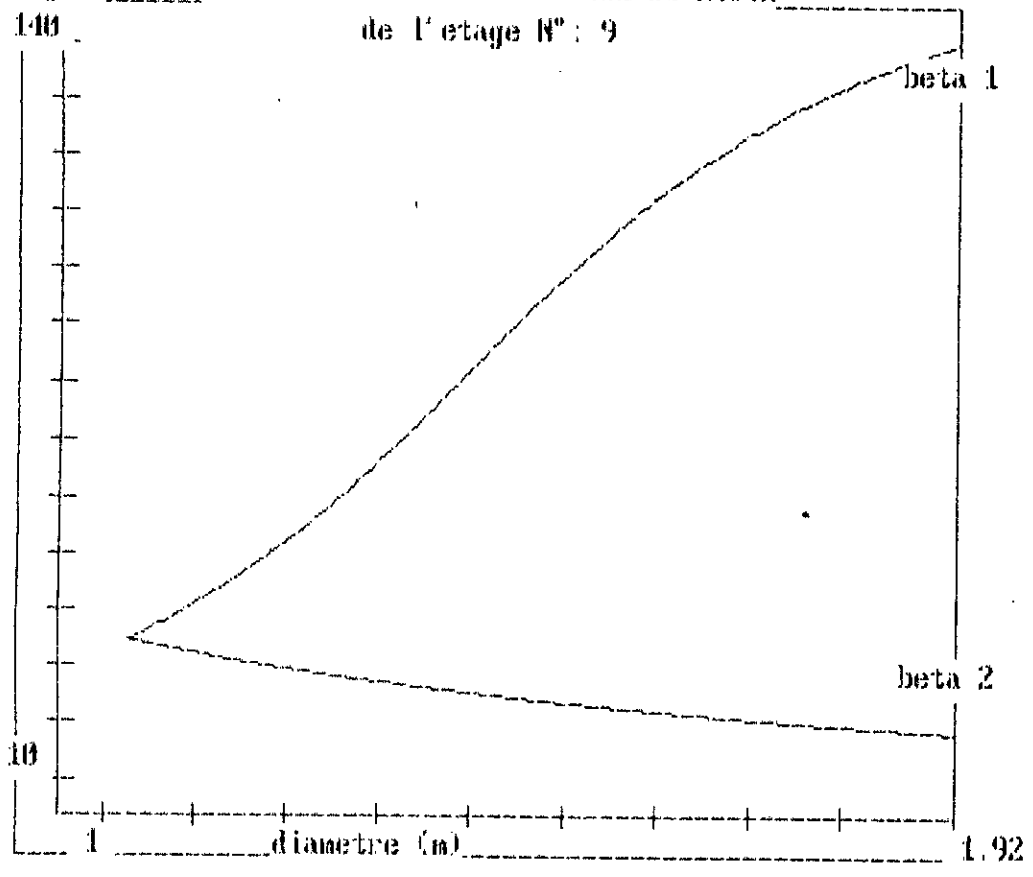




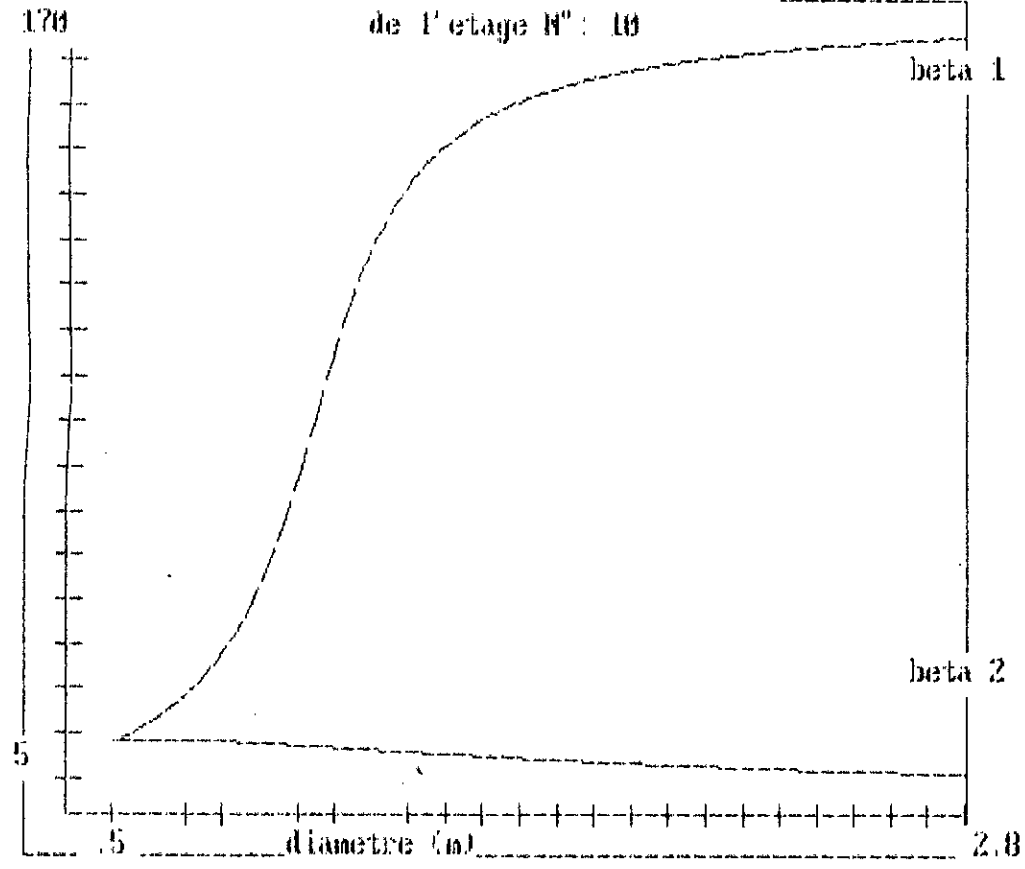




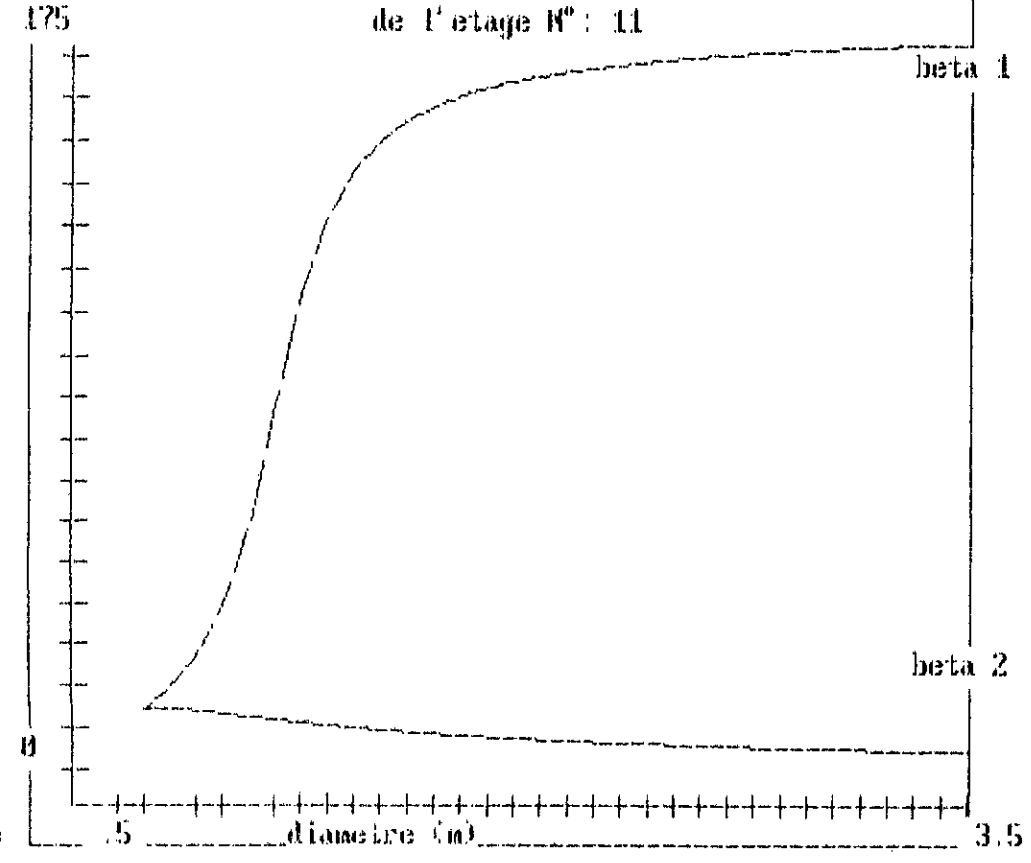
(degre) EVOLUTION DES ANGLES D'AUBE DU ROTOR
de l'etage N° : 9



(degré) EVOLUTION DES ANGLES D'AUBE DU ROTOR



(degré) EVOLUTION DES ANGLES D'AUBE DU ROTOR



Au niveau de tous les étages ,l'angle fixant le bord de fuite de l'ailette mobile ne varie pas fortement ,malgré les fortes variations du diamètre .Sa variation a pour rôle de maintenir la vitesse absolue de sortie à peu près constante suivant la longueur de l'ailette .

Des graphes donnant le rendement en fonction du rapport de la vitesse d'injection C_1 ,et de la vitesse peripherique U ,ainsi que l'angle d'injection α_1 (pages56à65) . On voit que le maximum est effectivement obtenue pour un ξ superieur à 0.5 lorsqu'il y a recuperation de la vitesse de sortie de l'étage précédent .

Pour ce qui est de la prediction de l'angle d'injection ,elle est plus difficile . Cependant on remarque qu'il a tendance à minimiser l'angle de déviation au niveau des tuyères toute en essayant de maintenir l'angle d'injection petit pour l'étage suivant .

Pour les étages optimisés on voit que $\xi = 0.671$ est le plus frequent ,mais ce ξ ne nous donne pas la même chute d'enthalpie au niveau de ces étages ,La vitesse d'injection est donnée par la chute d'enthalpie au niveau de cet étage ,et de la vitesse de sortie de l'étage précédent .

Dans le but de réalisation des ailettes par des machines outils à commande numérique ,ou pour une étude de structure détaillée , on detèrmine l'équation des angles d'entrées du rotor en fonction du diamètre . Ces angles présentent des variations importantes , A cet effet on utilise une approximation polynomiale basée sur la méthode des moindres carrées

$$\beta_1 = a_0 + a_1 \cdot D + a_2 \cdot D^2 + \dots + a_n \cdot D^n$$

Plus le degré n est important plus la précision est meilleure .

etage N°	COEFFICIENTS									
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
1	$-6,9914 \cdot 10^3$	-26,426	45,821	—	—	—	—	—	—	—
2	$-1,6169 \cdot 10^2$	-20,71	34,9968	—	—	—	—	—	—	—
3	$2,672 \cdot 10^2$	-42,82	51,597	—	—	—	—	—	—	—
4	0,15312	-72,903	73,986	—	—	—	—	—	—	—
5	0,3353	-75,266	76,807	—	—	—	—	—	—	—
6	0,673	-75,987	79,323	—	—	—	—	—	—	—
7	-0,2136	625,089	-1215,956	694,151	-32,389	-40,4415	—	—	—	—
8	0,3172	127,35	-130,411	-132,124	228,314	-68,957	—	—	—	—
9	-0,4683	257,317	-532,83	528,141	-565,417	601,919	-311,413	56,678	—	—
10	14,7	-238,956	496,54	-183,535	-18,009	1,0195	11,2168	-3,085	0,1724	—
11	0,2748	-244,48	549,83	-254,42	9,249	10,946	1,3834	-0,501	-0,1946	$3,96 \cdot 10^{-2}$

Degré de réaction :

On ne représentera pas les degrés de réaction au niveau des trois premiers étages, car leurs plus grande valeur ne dépasse pas 15 % (3/20), il devient important à partir du quatrième étage. Sur les diagrammes (voir pages 70 à 73) on a représenté l'évolution du degré de réaction théorique et réel (tenant compte des pertes), au niveau de chaque étage. Pour pouvoir les comparer. Avec l'augmentation du diamètre le degré de réaction réel s'éloigne du degré de réaction théorique, tout en restant inférieur à ce dernier.

Cette conséquence est due au fait que la variation du rendement des filets fluides va dans le même sens que celle du diamètre, nécessitant ainsi un degré de réaction inférieur à celui envisagé théoriquement.

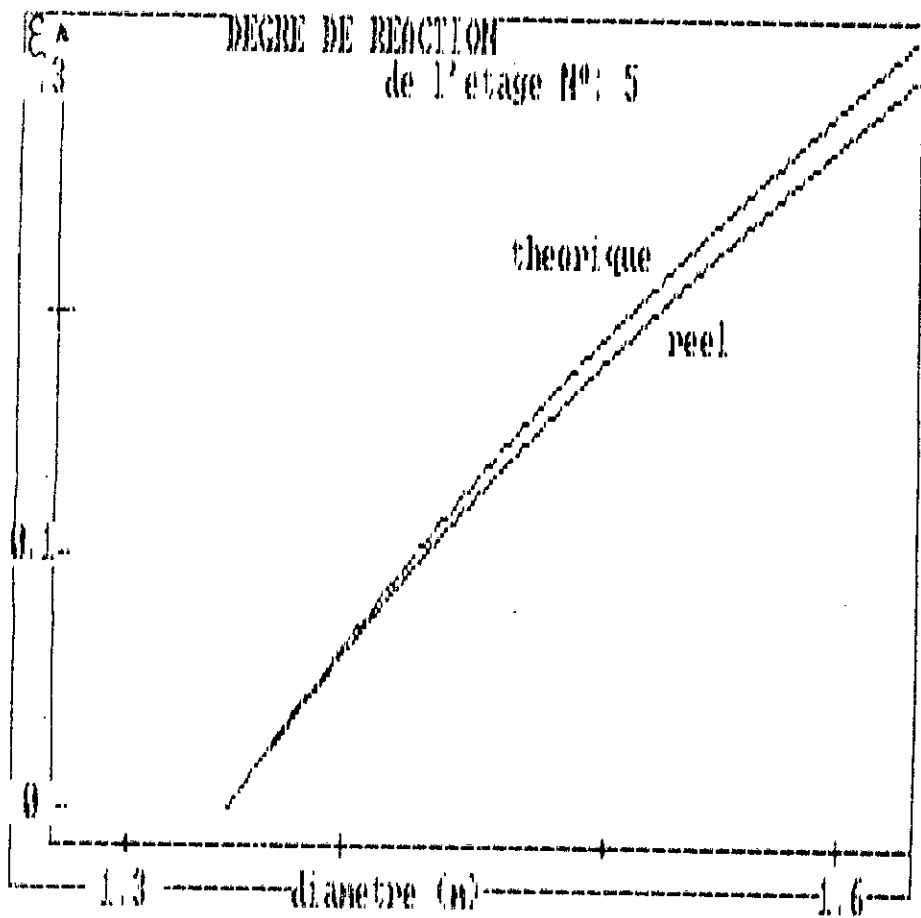
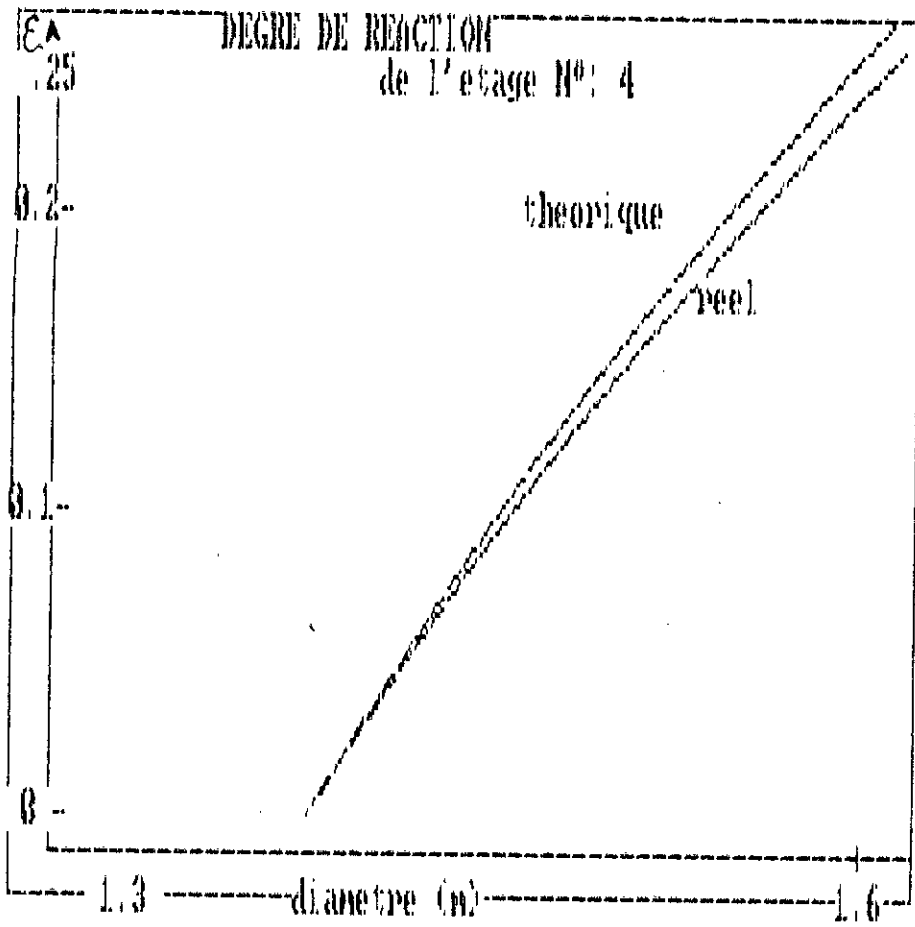
L'effort axial réel sur la roue, est inférieur à l'effort théorique (conséquence de la diminution du degré de réaction).

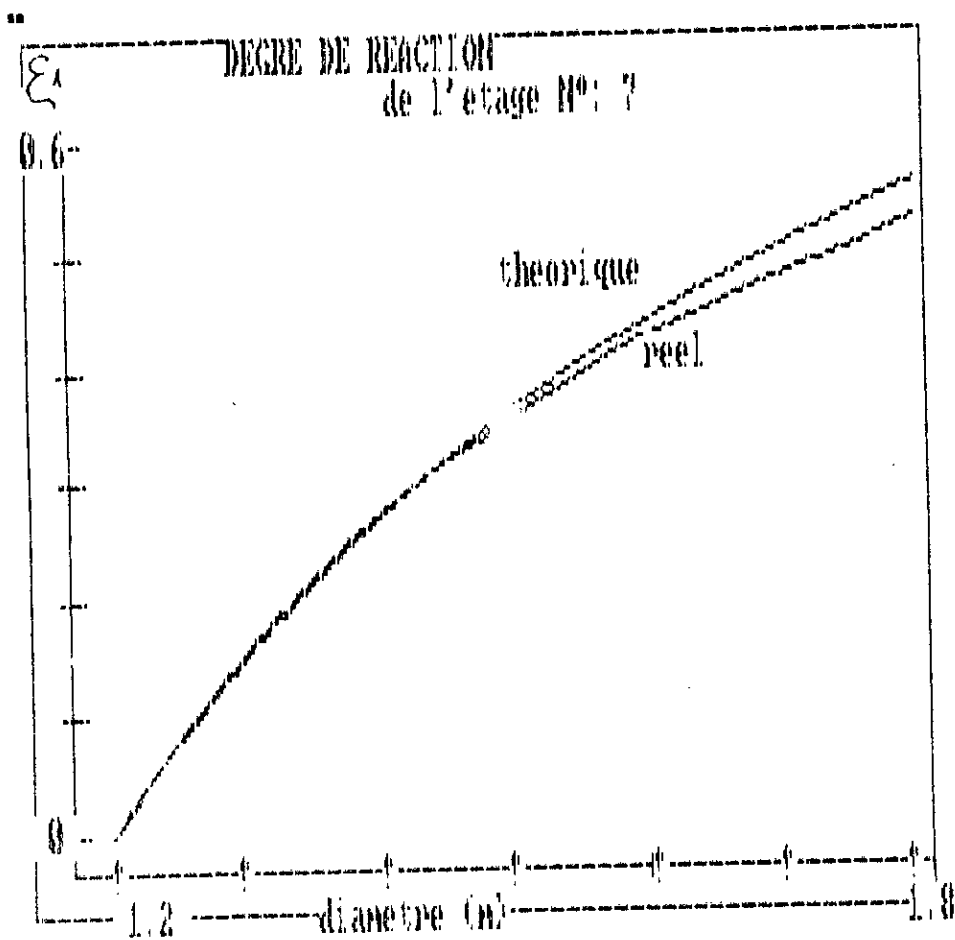
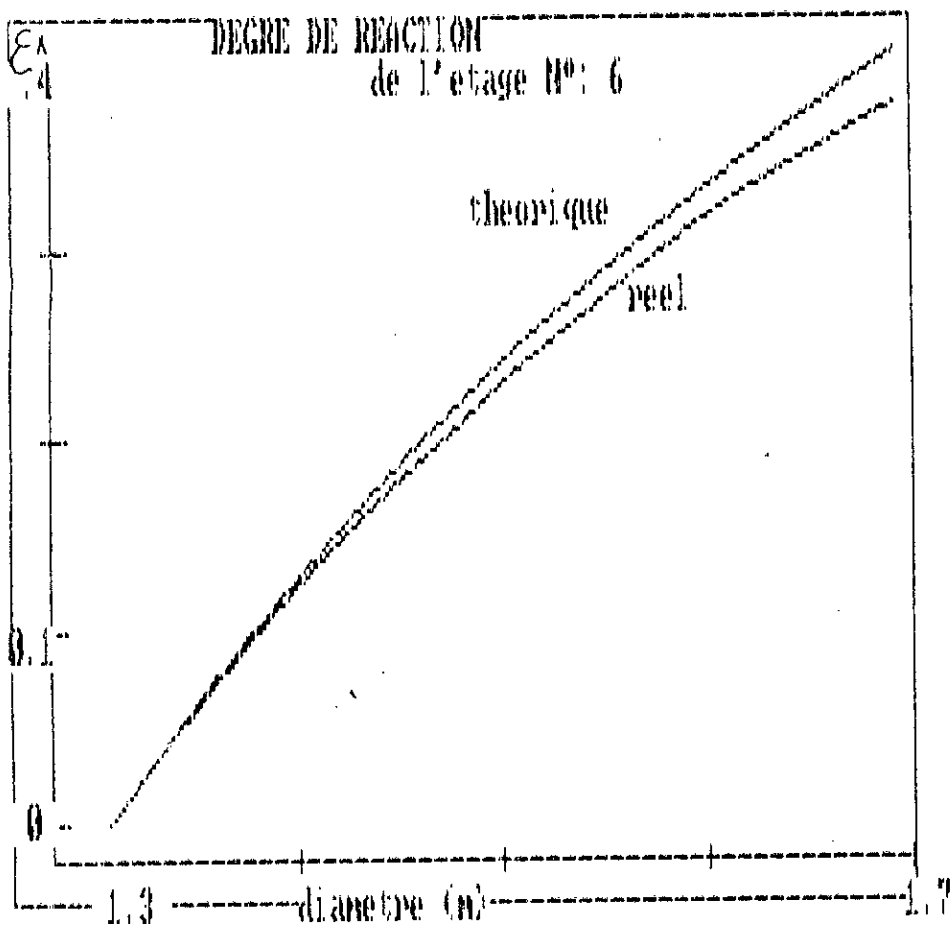
Exigence :

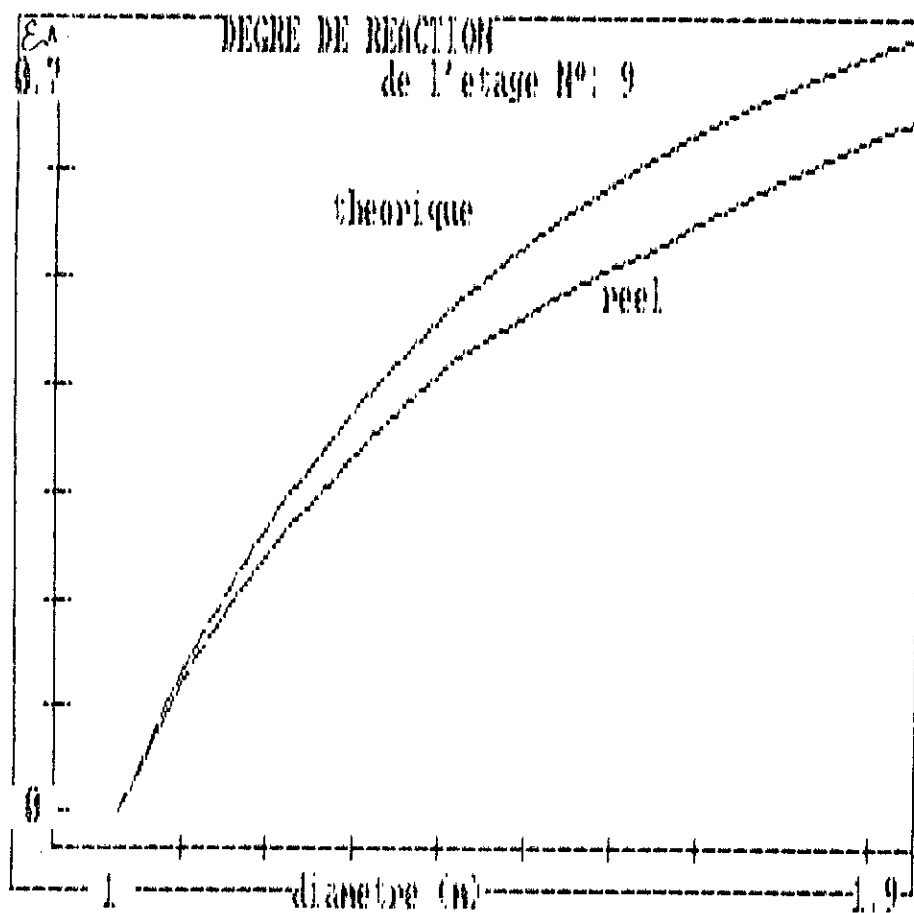
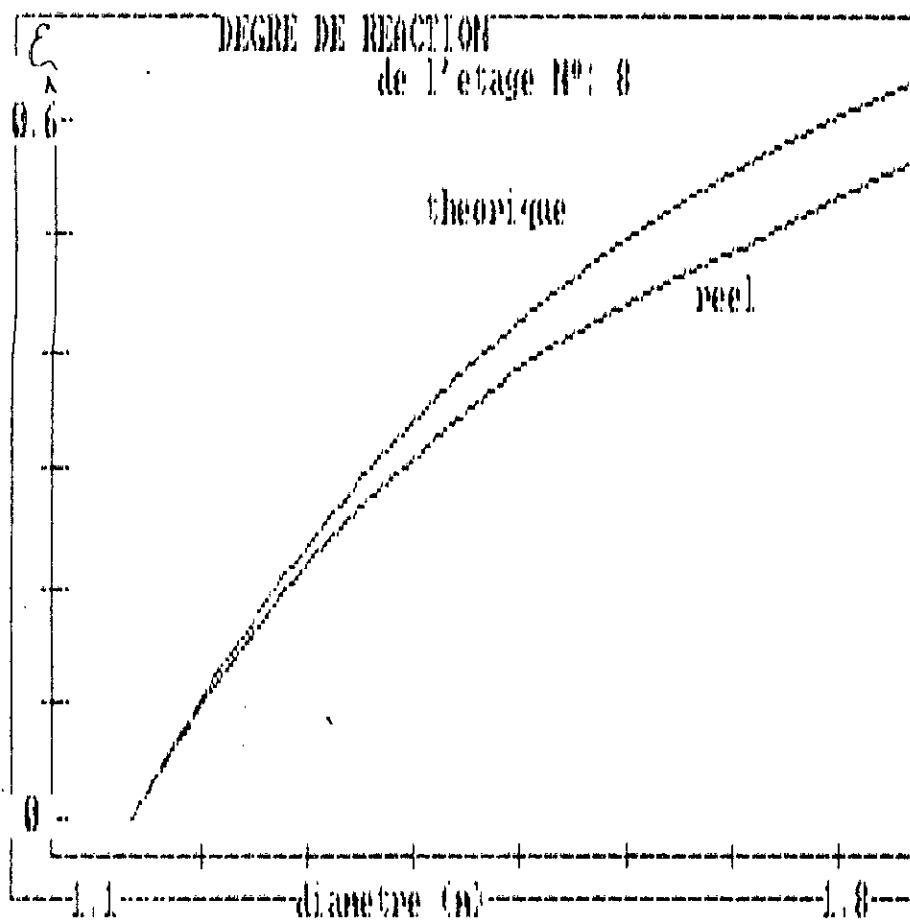
Dans le cas où l'on veuille adopter la solution de maintenir l'action (degré de réaction nul) sur toute la longueur de l'ailette, on assiste à une distorsion importante dans les énergies et les pressions des filets fluides suivant leurs positions de l'axe de la turbine. L'autre inconvénient est la vibration néfaste des aubes, qui est due à la distorsion de la pression le long de l'ailette.

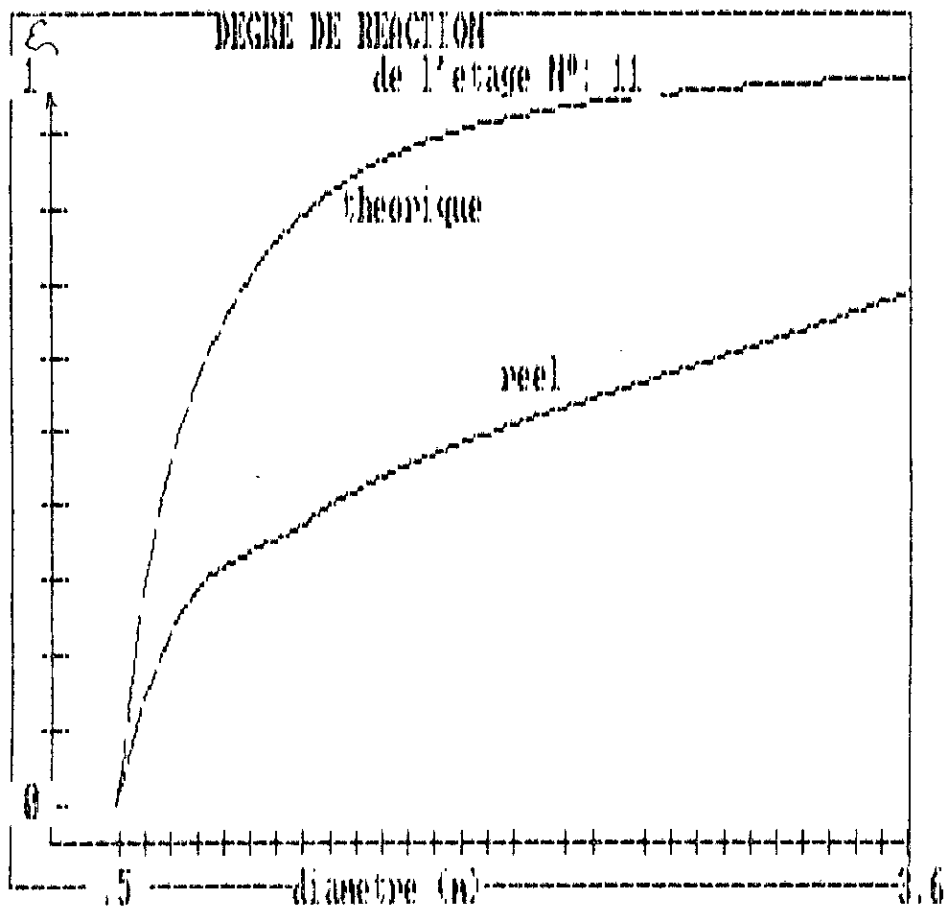
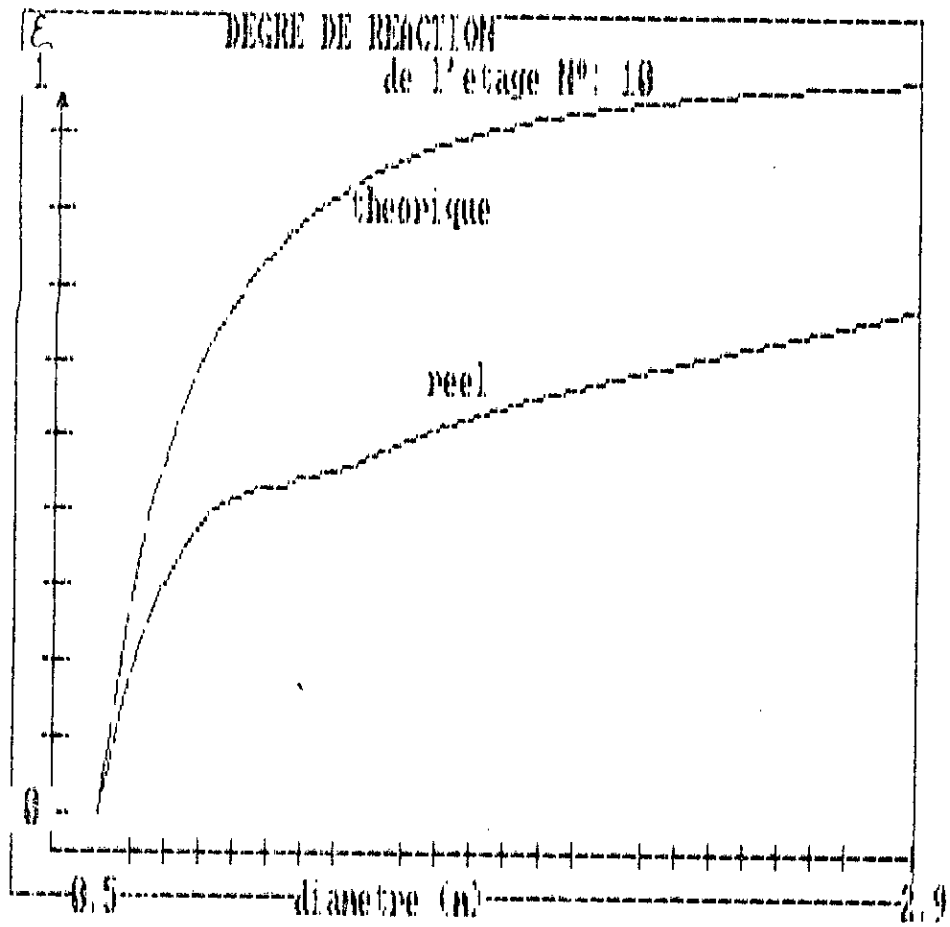
La solution évoquée ci-dessus limite la longueur des ailettes ; car pour être à action, il faut que la composante tangentielle de la vitesse absolue (C_{1u}), soit supérieure à la vitesse périphérique U . Si l'augmentation de U est importante, cette dernière condition n'est plus vérifiée.

L'avantage que présente cette solution est la minimisation des efforts axiaux sur le rotor ,impliquant la suppression de la butée ,en plus de la facilité de fabrication des ailettes (ne seront pas vrillées) .









6- Verification de l'écoulement subsonique :

Un calcul du nombre de Mach est fait à la sortie de chaque étage , pour verifier qu'il est toujours inferieur à un .

Ce calcul est fait à la base de chaque ailette où la vitesse de l'écoulement est la plus importante ,et la température est la plus basse ,par suite de la détente prononcée ,cette verification est surtout importante au niveau des derniers étages où les temperatures de sorties sont les plus basses .

Le nombre de Mach à pour expression $M = \frac{C}{a}$

avec C :vitesse absolue d'injection de la vapeur

a :celèrite du son dans la vapeur dans les mêmes conditions

On relève des tables thermodynamiques la chaleur specifique au voisinage du point ayant les caracteristiques thermodynamiques suivantes

$$T = 413 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$C_p = 1.997 \text{ KJ/kg } ^\circ\text{K}$$

$$C_v = 1.482 \text{ KJ/kg } ^\circ\text{K}$$

$$\gamma = 1.34$$

$$\text{on a } C_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot r$$

$$\text{donc } r = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot C_p \quad \text{ou} \quad r = C_p - C_v$$

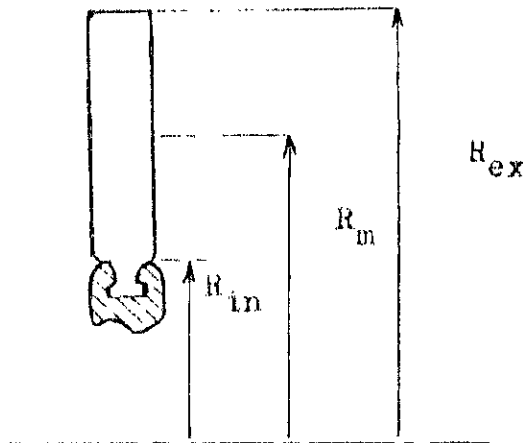
$$r = 515 \text{ J/kg } ^\circ\text{K}$$

Dans ces conditions la celerite du son est de

$$a = 500 \text{ m/s}$$

7- Verification des aubages à la traction :

Sous l'effet de la force centrifuge les aubes sont soumises à la traction .



On suppose que l'aube est à section constante le long du rayon .

Un élément dr de l'ailette est soumis à une force dF valant

$$dF = \rho . S . dr . \Omega^2 . r$$

l'effort est maximal à sa base et il vaut

$$F = \rho . S . \Omega^2 . \frac{R_{ex}^2 - R_{in}^2}{2} = m_a . \Omega^2 . R_m$$

la contrainte au niveau de la base $\sigma_b = \frac{F}{S}$

$$\sigma_b = \rho . l . \Omega^2 . R_m$$

m_a : masse de l'ailette

S : section de l'ailette

On considère un matériau de masse volumique $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ (11)

Cette contrainte doit être inférieure à la contrainte admissible du matériau choisi .

Dans le cas où l'on choisit l'acier Cr 70 (inoxydable)

$R_e = 40 \text{ daN/mm}^2$ à $300 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\sigma_{ad} = \frac{R_e}{2}$$

$$\sigma_{ad} = 20 \text{ daN/mm}^2$$

On vérifiera seulement les aubes des derniers étages les plus sollicitées , à cause de l'importance de leurs dimensions .

10^{ème} étage :

$$D_m = 1.72 \text{ m}$$

$$l = 1.21 \text{ m}$$

la contrainte au niveau de sa base est de

$$\sigma_b = 18.5 \text{ daN/mm}^2$$

$$\sigma_b < \sigma_{ad}$$

Les aubes du 10^{ème} étage résistent à la traction

11^{ème} étage :

$$D_m = 2.2 \text{ m}$$

$$l = 1.6 \text{ m}$$

la contrainte à la base de l'ailette vaut

$$\sigma_b = 31.27 \text{ daN/mm}^2$$

Les aubes du dernier étage ainsi conçues ne résisteront pas à la traction. On adopte alors une aube à section variable (conique).

on a

$$S(r) = S_b \cdot \text{Exp} \left(\frac{\rho \cdot \Omega^2}{2 \cdot \sigma_{ad}} (R_{in}^2 - r^2) \right)$$

S_b : section à la base de l'ailette (aube)

$S(r)$: section de l'aube à un rayon fixé r

le section étant variable, le rapport de section entre la tête et le pied d'aube

$$\frac{S_t}{S_b} = 0.244 \quad \text{ou} \quad \frac{S_b}{S_t} = 4.1$$

La contrainte à la base de l'aube vaudrait

$$\sigma_b = \frac{\int_{R_{ex}}^{R_{in}} \frac{\rho \cdot \Omega^2}{2 \cdot \sigma_{ad}} r \cdot dr \cdot S_b \cdot \text{Exp} \left(\frac{\rho \cdot \Omega^2}{2 \cdot \sigma_{ad}} (R_{in}^2 - r^2) \right)}{S_b}$$

$$\sigma_b = \sigma_{ad} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{\rho \cdot \Omega^2}{2 \cdot \sigma_{ad}} \cdot (R_{in}^2 - R_{ex}^2) \right) \right)$$

$$\sigma_b = 15.12 \text{ daN/mm}^2$$

Avec cette distribution de section la contrainte à la base de l'aube est réduite de moitié, et l'aube résiste à la traction,

CONCLUSION :

Ce travail avait pour but de comprendre le mode de circulation de la vapeur à l'intérieur de la turbine dans le cas de vrillage d'aubes longues .Ce dernier étant un problème fréquemment rencontré en turbomachinerie à grandes aubes ,la bibliographie concernant le vrillage est malheureusement peu courante .

Le programme informatique qui a été élaboré permet d'optimiser les différents étages de la turbine à vapeur ,tout en déterminant l'évolution de quelques caractéristiques géométriques le long de l'aube .

Cependant,il est à signaler qu'une optimisation n'est complète que si le facteur économique est pris en considération .

Le programme d'optimisation peut être complété par l'adjonction d'un sous programme renfermant les tables thermodynamiques de la vapeur d'eau et permettant leurs lectures directes (à la demande avec deux caractéristiques fixées parmi P,T,H et S)

Ainsi devient possible la détermination des caractéristiques thermodynamiques à travers un étage de la turbine à aubes longues vrillées ,surtout en ce qui concerne les températures , pour prévoir un refroidissement efficace de l'ailette .

Le programme informatique permet de déterminer l'évolution des angles (vrillage) en se fixant un certain pas le long de l'aube et en tenant compte des pertes .

Les problèmes technologiques que posent la construction des turbines sont très complexes .Pour cela l'étude des modes de vibration des ailettes longues à section variable ,peut faire

l'objet d'un projet de fin d'étude à part .

En général la turbomachinerie est un domaine où l'expérimentation est prédominante . L'étude théorique , permet de limiter le domaine d'expérimentation .

B I B L I O G R A P H I E

N°	Auteur	Edité	Titre
1		Vol 14	Encyclopeadia universalis
2	R. CHVETS	Moscou 1969	Thermique General
3	RENE BIDART	Paris 1979	Energetique et Turbomachines
4	LUCTEN VIVIER	Paris 1965	Turbine à vapeur et à gaz
5	ROBERT SZEWALSKI		Turbiny Parowe
6		B 331	Technique de l'ingenieur
7	PHILIP G HILL		Mechanics and Thermodynamics of Propulsion
8	P CHAMBADAL	Paris 1976	La turbine à gaz
9			Revue Brown Boveri
10	B AZZOUO (P.F.E) E.N.P 1988		Etude Energetique d'une turbine à vapeur
11	B CHERIF (P.F.E) E.N.P 1988		Analyse de structure d'une turbine à vapeur

ANNEXE

UTILISATION DU LOGICIEL

Avant l'exécution du programme on introduit les données suivantes

- l'enthalpie de la vapeur à l'entrée de la turbine
- Diamètre moyen au niveau du premier étage
- Diamètre minimal des tambours utilisés
- Nombre de points pour lesquels le calcul sera fait au niveau de chaque aube .

On lance l'exécution du programme ,il nous donne le choix de fixer la chute d'enthalpie au niveau de l'étage ou d'optimiser le rendement de cet étage .

Il imprime les différentes chutes d'enthalpie pour l'étage considéré et il demande d'introduire les volumes massiques correspondants .

- Si le diamètre extérieur du tambour est inférieur à la valeur fixée au début ,il vous donne le choix d'augmenter le diamètre moyen ou de choisir une chute d'enthalpie .
- Ayant déterminé la chute d'enthalpie qui permet d'avoir un rendement maximal .il vous demande d'introduire la température correspondant à l'enthalpie de sortie pour vérifier si l'écoulement est subsonique .Dans le cas contraire il vous demande de choisir une chute d'enthalpie plus petite que celle donnant un rendement maximal .

Même l'angle d'injection de vapeur peut être fixé .

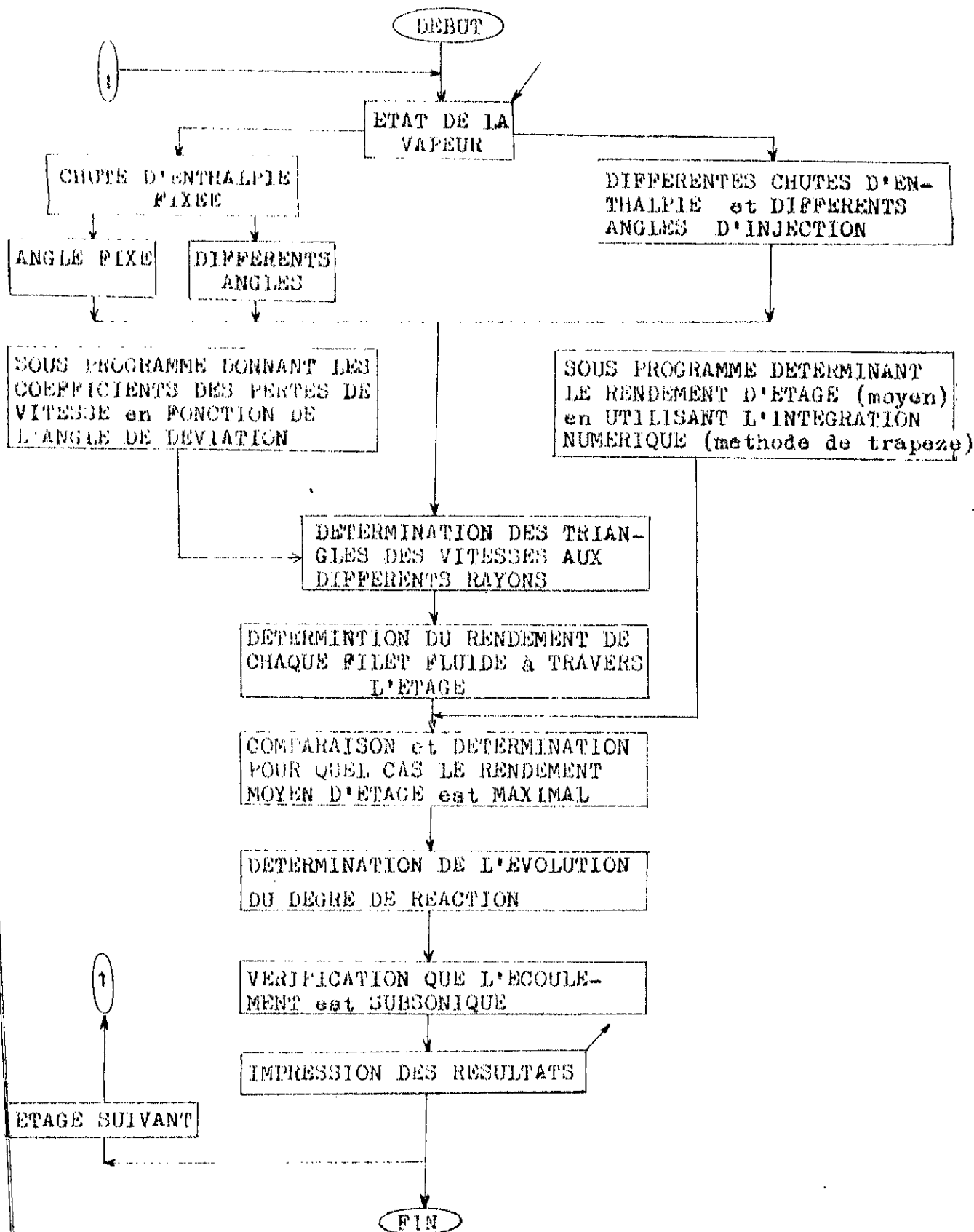
Impression des résultats :

- rendement d'étage maximal
- chute d'enthalpie théorique au niveau de l'étage
- chute d'enthalpie réelle
- angle d'injection de la vapeur (rendement maximal)
- travail reçu par l'arbre (pour l'étage considéré)
- la distribution des rendements des filets fluides aux différents diamètres
- degré de réaction en fonction du diamètre (réel, théorique)
- évolution des angles au niveau du rotor et du stator

Pour calculer l'étage suivant il faut taper 1

Il appartient à l'utilisateur de vérifier l'évolution des pressions à travers la turbine pour voir quand est ce qu'il doit fixer une chute d'enthalpie pour se trouver dans les conditions de sortie de la turbine considérée.

ORGANIGRAMME




```

COMMON ze(13),YY(13)
DIMENSION U(200),WENT(200),CENT(200),D(200),REND(200)
DIMENSION WSORT(200),USORT(200),PHI(200),S(200)
DIMENSION OQ(200),WQ(200),BETA1(200),WW(200)
DIMENSION BETA2(200),VOMA1(20),repe(20)
DIMENSION SI(20),AE(20),RENETA(20,20),DREA(200)
OPEN(UNIT=2,FILE='ECHO.DAT',STATUS='NEW')
OPEN(UNIT=1,FILE='TRIA.DAT',STATUS='OLD')
OPEN(UNIT=3,FILE='ECHO1.DAT',STATUS='NEW')
open(unit=4,file='echo2.dat',status='new')
open(unit=5,file='sup.dat',status='new')
OPEN(UNIT=6,FILE='SIMP.DAT',STATUS='OLD')
PI=3.1415927

```

```
MX=1
```

```

DO 11 I=1,13
  READ(1,*) ze(I)
  CONTINUE

```

```

DO 22 I=1,13
  READ(1,*) YY(I)
  CONTINUE

```

c. lecture des donnees experimentaux du diagramme de Wagner

```

READ(1,*) (SI(I),I=1,14)
READ(1,*) (AE(I),I=1,14)

```

```

*****
*****          LES DONNEES DE LA TURBINE          *****
*****

```

```

DEMA=20.28
DM1=1.5
n=3000
HEN=705
pm=.09

```

***** choix des calculs a effectuer *****

```

902  print*, '*****'
      *****

```

```

  print*, '  faite votre choix et tapez le numero correspondant'
  print*, '1 - calcul pour une chute d enthalpie de votre choix
* ou nombre d etage'

```

```

  print*, '2 - calcul pour optimisation du rendement pour
*differentes chutes d enthalpie'

```

```

  print*, '3 - pour arreter l execution'

```

```

  print*, '*****'
      *****

```

```
  read*,net
```

```
  if(net.eq.1)go to 903
```

```
  if(net.eq.2)go to 900
```

```
  if(net.eq.3)go to 901
```

```
  print*, '  faite attention au chiffre que vous tapez'
```

```
  go to 902
```

```
900  DO 23 II=1,14
```

```
  IF(INE.EQ.1)GO TO 100
```

```
  READ(1,*)VOMA1(ii)
```

```
  IZ=0
```

```
100  IF(IZ.NE.1)GO TO 913
```

```

JJ=JS
913   IF (IZ.EQ.1) GO TO 213
      UM=PI*DM1*N/60
      VINT=UM/SI(II)
      CH=(VINT**2-CRES**2)/91.5**2
      print*, '%%% LECTURE DE LA PERTE EN RENDEMENT DUE A LA VAPEUR
*HUMIDE pour une chute d enthalpie',ch
      if (mx.lt.6) then
        repe(ii)=0
      else
        READ(6,*)repe(ii)
      endif
      DO 24 JJ=1,14
913   UM=PI*DM1*N/60
      VINT=UM/SI(II)
      CH=(VINT**2-CRES**2)/91.5**2
      OQ(1)=AL(JJ)

```

DETERMINATION DU COEFFICIENT DE PERTE

```

PI=3.1415927
OQ(1)=OQ(1)*PI/180
GH=PI/2
if (INE.EQ.1) THEN
  GH=WW(1)
ELSE
  ENDIF
CALL SOL(GH,OQ(1),TUI,ze,YY)
PHI(1)=TUI

```

TRIANGLES DES VITESSES

```

#####
UM=PI*DM1*N/60
CAXT=VINT*SIN(OQ(1))
CAX= CAXT*PHI(1)
CUT1=VINT*COS(OQ(1))
RL1=VOMA1(II)*DEMA/(PI*DM1*CAX)
DNT=DM1-RL1
DEXT=DM1+RL1
D(1)=DNT
U(1)=PI*D(1)*N/60
CENT(1)=PHI(1)*VINT
CUI=CENT(1)*COS(OQ(1))
WENT(1)=SQRT(CENT(1)**2+U(1)**2-2*CENT(1)*U(1)*COS(OQ(1)))
BETA2(1)=ASIN(CAX/WENT(1))
BETA1(1)=PI-BETA2(1)
CALL SOL(BETA1(1),BETA2(1),TUI,ze,YY)
S(1)=TUI
WSORT(1)=S(1)*WENT(1)
A=U(1)-WSORT(1)*COS(BETA2(1))
CSORT(1)=SQRT((WSORT(1)*SIN(BETA2(1)))**2+A**2)
WQ(1)=ATAN(WSORT(1)*SIN(BETA2(1))/A)

```



```

IF (WQ(1).LT.0)WQ(1)=PI+WQ(1)
T=U(1)*(CENT(1)*COS(OQ(1))-CSORT(1)*COS(WQ(1)))
drea(1)=0
rend(1)=(ch-((1-PHI(1)**2)*VINT**2/2+(1-S(1)**2)*WENT(1)**2/2+
*pm*CSORT(1)**2/2)/4180)/ch

```

TRIANGLE DES VITESSES AUX DIFFERENTS RAYON

```

COX=CSORT(1)*SIN(WQ(1))
K=199
PAS=RL1/K
DO 3 I=2,K+1
D(I)=D(I-1)+2*PAS
U(I)=PI*D(I)*N/60
TYUT=CUT1*DNT/D(I)
OQ(I)=ATAN(CAXT/TYUT)
IF(INE.EQ.1)THEN
  GH=WW(I)
ELSE
ENDIF
CALL SOL(GH,OQ(I),TUI,ze,YY)
PHI(I)=TUI
CENT(I)=PHI(I)*SQRT(TYUT**2+CAXT**2)
CAX=CENT(I)*SIN(OQ(I))
TYU=CENT(I)*COS(OQ(I))
BETA1(I)=ATAN(CAX/(U(I)-TYU))
IF(BETA1(I).LT.0)BETA1(I)=PI+BETA1(I)
WENT(I)=SQRT(CENT(I)**2+U(I)**2-2*CENT(I)*U(I)*COS(OQ(I)))
C=U(I)-(CENT(I)*COS(OQ(I))-T/U(I))
WSORT(I)=SQRT(COX**2+C**2)
BETA2(I)=ATAN(COX/C)
IF(BETA2(I).LT.0)BETA2(I)=PI+BETA2(I)
CALL SOL(BETA1(I),BETA2(I),TUI,ze,YY)
S(I)=TUI
CSORT(I)=SQRT(U(I)**2+WSORT(I)**2-2*U(I)*WSORT(I)*COS(BETA2(I)))
WQ(I)=ATAN(COX/(U(I)-WSORT(I)*COS(BETA2(I))))
IF(WQ(1).LT.0)WQ(1)=PI+WQ(1)
B=(2-S(1)**2-PHI(1)**2)/(2*(2*PSI*COS(OQ(1))-PSI**2))
BV=1/PHI(1)**2-1
rend(i)=(ch-((-1+1/PHI(i)**2)*cent(i)**2/2+(-1+1/S(i)**2)*
*Wsort(i)**2/2+pm*CSORT(1)**2/2)/4180)/ch

```

c degre de reaction

```
drea(i)=.5*((wsort(i)/s(i))**2-went(i)**2)/(ch*4180)
```

3

```
CONTINUE
```

```
RENDET=0
```

```
IF(IZ.NE.1)GO TO 200
```

```
CR=CH*RS
```

c

```
***** IMPRESSION DES RESULTATS *****
```

c

```
print*, '#####'
```

```
print*, '### LE RENDEMENT MAX =',RS
```

```
print*, '### IL EST OBTENUE POUR U/C=',SI(IS)
```

```

WRITE(3,*)'#####'
WRITE(3,*)'#### LE RENDEMENT MAX =',RS
WRITE(3,*)'#### IL EST OBTENUE POUR U/C=',SI(IS)
S100  print*, '####          ALPHA=',AE(JS)
      print*, '#### LONGUEUR D AUBE =',RL1
      print*, '#### LE TRAVAIL RECU PAR L ARBRE[J/kg]=' ,T
WRITE(3,*)'#### LE TRAVAIL RECU PAR L ARBRE[J/kg]=' ,T
PRINT*, '#### LA CHUTE D ENTHALPIE THEORIQUE [Kcal/Kg]=' ,ch
PRINT*, '#### LA CHUTE D ENTHALPIE RELLE      [Kcal/Kg]=' ,cr
PRINT*, '#### RESULTATS POUR L ETAGE NO=',MX
      print*, '#####'
WRITE(3,*)'####          ALPHA=',AE(JS)
WRITE(3,*)'#### LONGUEUR D AUBE =',RL1
WRITE(3,*)'#### LA CHUTE D ENTHALPIE THEORIQUE [Kcal/Kg]=' ,ch
WRITE(3,*)'#### LA CHUTE D ENTHALPIE RELLE      [Kcal/Kg]=' ,cr
WRITE(3,*)'#### RESULTATS POUR L ETAGE NO=',MX
WRITE(3,*)'#####'
      print*, 'n0      ! degre de reaction'
      do 999 i=1,k+1
      print*,i, '!',drea(i)
      write(5,*)d(i),drea(i)
999   continue
C
***** verification que l'ecoulement est subsonique *****
C
      print*, 'verification que l'ecoulement est subsonique'
      hv=hcn-ch
      print*, 'donnez la temperature pour une enthalpie de sortie =',hv
      read*,tv
      vs=sqrt(1.3*524.26*tv)
      if(vs.lt.cent(1))then
      print*, 'l'ecoulement est supersonique et on a la vitesse du son=
* ,vs
      go to 903
      else
      print*, 'ecoulement subsonique'
      endif
      HEN=HEN-CR
      print*, 'DIAMETRE -ALPHA ENTREE L, SORTIE -BETA ENTREE _ SORTIE'
      print*, '_____
* _____
WRITE(3,*)'DIAMETRE -ALPHA ENTREE L, SORTIE -BETA ENTREE _ SORTIE'
WRITE(3,*)'_____
* _____
DO 344 I=1,K+1
OQ(I)=OQ(I)*180/PI
WQ(I)=WQ(I)*180/PI
BETA1(I)=BETA1(I)*180/PI
BETA2(I)=BETA2(I)*180/PI
344  CONTINUE
DO 44 I=1,K+1,10
print*,D(I), '!',OQ(I), '!',WQ(I), '!',BETA1(I), '!',BETA2(I)

```

print*,'

```
*  
WRITE(3,*)D(1),'!',OQ(1),'!',WQ(1),'!',BETA1(1),'!',BETA2(1)  
WRITE(3,*)'
```

```
C#####  
C#####  
C##### INTEGRATION GRAPHIQUE \ TRAPEZE\ #####  
C#####  
C#####
```

```
44 CONTINUE  
DO 1234 I=1,K+1  
WRITE(4,*)D(I),BETA1(I),BETA2(I)  
1234 CONTINUE  
IF(UN.EQ.2)GO TO 7200  
IF(NET.EQ.1)GO TO 7200  
200 DO 37 I7=2,K+1  
RENDET=RENDET+(REND(I7)+REND(I7-1))/2*(D(I7)-D(I7-1))  
37 CONTINUE  
IF(DNT.GT.0.5)THEN  
RENETA(II,JJ)=RENDET/(DXT-DNT)  
ELSE  
PRINT*, 'IL FAUT AUGMENTER LE DIAMETRE MOYEN SACHANT QUE'  
PRINT*, ' LE DIAMETRE MOYEN=',DM1  
PRINT*, ' LE DIAMETRE INTERIEUR=',DNT  
READ*,DM1  
GO TO 900  
ENDIF  
FF=1.72*.0008**1.4/RL1  
RENETA(II,JJ)=RENETA(II,JJ)-repe(ii)-FF  
IF(RENETA(II,JJ).LT.RS)GO TO 90  
RS=RENETA(II,JJ)  
IS=II  
JS=JJ
```

```
90 FIN=0  
IF(IZ.NE.1)GO TO 24  
print*, 'DIAMETRE-- U - C1 - W1 - C2 - W2'  
print*,'
```

```
*  
WRITE(3,*) 'DIAMETRE-- U - C1 - W1 - C2 - W2'  
WRITE(3,*)'
```

```
*  
DO 114 I=1,K+1,10  
WRITE(3,890)D(I),U(I),CENT(I),WENT(I),CSORT(I),WSORT(I)  
WRITE(*,890)D(I),U(I),CENT(I),WENT(I),CSORT(I),WSORT(I)  
890 FORMAT('!',6(X,F9.5,X,'!'))  
print*,'
```

```
*  
WRITE(3,*)'
```

```
*  
114 CONTINUE  
IF(IZ.EQ.1)GO TO 300
```



```
CALL SOL(GH,QQ(1),TUI,ze,YY)
PHI(1)=TUI
```

TRIANGLE DES VITESSES

#####

```
UM=PI*DM1*N/60
CAXT=VINT*SIN(QQ(1))
CAX=CAXT*PHI(1)
CUT1=VINT*COS(QQ(1))
RL1=VOL*DEMA/(PI*DM1*CAX)
DNT=DM1-RL1
DEXT=DM1+RL1
D(1)=DNT
U(1)=PI*D(1)*N/60
CENT(1)=PHI(1)*VINT
CU1=CENT(1)*COS(QQ(1))
WENT(1)=SQRT(CENT(1)**2+U(1)**2-2*CENT(1)*U(1)*COS(QQ(1)))
BETA2(1)=ASIN(CAX/WENT(1))
BETA1(1)=PI-BETA2(1)
CALL SOL(BETA1(1),BETA2(1),TUI,ze,YY)
S(1)=TUI
WSORT(1)=S(1)*WENT(1)
A=U(1)-WSORT(1)*COS(BETA2(1))
CSORT(1)=SQRT((WSORT(1)*SIN(BETA2(1)))**2+A**2)
WQ(1)=ATAN(WSORT(1)*SIN(BETA2(1))/A)
IF(WQ(1).LT.0)WQ(1)=PI+WQ(1)
T=U(1)*(CENT(1)*COS(QQ(1))-CSORT(1)*COS(WQ(1)))
rend(1)=(chue-((-1+1/PHI(1)**2)*cent(1)**2/2+(1-S(1)**2)*
*WENT(1)**2/2+pm*CSORT(1)**2/2)/4180)/chue
```

TRIANGLE DES VITESSES AUX DIFFERENTS RAYON

```
COX=CSORT(1)*SIN(WQ(1))
K=179
PAS=RL1/K
DO 73 I=2,K+1
D(I)=D(I-1)+2*PAS
U(I)=PI*D(I)*N/60
TYUT=CUT1*DNT/D(I)
QQ(I)=ATAN(CAXT/TYUT)
IF(INE.EQ.1) GH=WW(1)
CALL SOL(GH,QQ(I),TUI,ze,YY)
PHI(I)=TUI
CENT(I)=PHI(I)*SQRT(TYUT**2+CAXT**2)
CAX=CENT(I)*SIN(QQ(I))
TYU=CENT(I)*COS(QQ(I))
BETA1(I)=ATAN(CAX/(U(I)-TYU))
IF(BETA1(I).LT.0)BETA1(I)=PI+BETA1(I)
WENT(I)=SQRT(CENT(I)**2+U(I)**2-2*CENT(I)*U(I)*COS(QQ(I)))
C=U(I)-(CENT(I)*COS(QQ(I))-T/U(I))
WSORT(I)=SQRT(COX**2+C**2)
BETA2(I)=ATAN(COX/C)
IF(BETA2(I).LT.0)BETA2(I)=PI+BETA2(I)
CALL SOL(BETA1(I),BETA2(I),TUI,ze,YY)
```

```

IF (WQ(1).LT.0)WQ(1)=PI+WQ(1)
T=U(1)*(CENT(1)*COS(OQ(1))-CSORT(1)*COS(WQ(1)))
drea(1)=0
rend(1)=(ch-((1-PHI(1)**2)*VINT**2/2+(1-S(1)**2)*WENT(1)**2/2+
*pm*CSORT(1)**2/2)/4180)/ch

```

TRIANGLE DES VITESSES AUX DIFFERENTS RAYON

```

COX=CSORT(1)*SIN(WQ(1))
K=199
PAS=RL1/K
DO 3 I=2,K+1
D(I)=D(I-1)+2*PAS
U(I)=PI*D(I)*N/60
TYUT=CUT1*DNT/D(I)
OQ(I)=ATAN(CAXT/TYUT)
IF (INE.EQ.1) THEN
  GH=WW(I)
ELSE
ENDIF
CALL SOL(GH,OQ(I),TUI,ze,YY)
PHI(I)=TUI
CENT(I)=PHI(I)*SQRT(TYUT**2+CAXT**2)
CAX=CENT(I)*SIN(OQ(I))
TYU=CENT(I)*COS(OQ(I))
BETA1(I)=ATAN(CAX/(U(I)-TYU))
IF (BETA1(I).LT.0)BETA1(I)=PI+BETA1(I)
WENT(I)=SQRT(CENT(I)**2+U(I)**2-2*CENT(I)*U(I)*COS(OQ(I)))
C=U(I)-(CENT(I)*COS(OQ(I))-T/U(I))
WSORT(1)=SQRT(COX**2+C**2)
BETA2(I)=ATAN(COX/C)
IF (BETA2(I).LT.0)BETA2(I)=PI+BETA2(I)
CALL SOL(BETA1(I),BETA2(I),TUI,ze,YY)
S(I)=TUI
CSORT(I)=SQRT(U(I)**2+WSORT(I)**2-2*U(I)*WSORT(I)*COS(BETA2(I)))
WQ(I)=ATAN(COX/(U(I)-WSORT(I)*COS(BETA2(I))))
IF (WQ(1).LT.0)WQ(1)=PI+WQ(1)
B=(2-S(I)**2-PHI(1)**2)/(2*(2*PSI*COS(OQ(I))-PSI**2))
BV=1/PHI(1)**2-1
rend(i)=(ch-((-1+1/PHI(i)**2)*cent(i)**2/2+(-1+1/S(i)**2)*
*Wsort(i)**2/2+pm*CSORT(i)**2/2)/4180)/ch

```

C degre de reaction

```

drea(i)=.5*((wsort(i)/s(i))**2-went(i)**2)/(ch*4180)
CONTINUE
RENDET=0
IF (IZ.NE.1)GO TO 200
CR=CH*RS

```

C

***** IMPRESSION DES RESULTATS *****

C

```

print*, '#####'
print*, '### LE RENDEMENT MAX =',RS
print*, '### IL EST OBTENUE POUR U/C=',SI(IS)

```

```

S(I)=RUI
CSORT(I)=SORT(U(I)**2+WSORT(I)**2-2*U(I)*WSORT(I)*COS(BETA2(I)))
WQ(I)=ATAN(COX/(U(I)-WSORT(I)*COS(BETA2(I))))
IF(WQ(I).LT.0)WQ(I)=PI+WQ(I)
rend(i)=(chue-((-1+1/PHI(i)**2)*cent(i)**2/2+(-1+1/S(i)**2)*
*Wsort(i)**2/2+pm*CSORT(i)**2/2)/4180)/chue
drea(i)=.5*((wsort(i)/s(i))**2-went(i)**2)/(ch*4180)
73   CONTINUE
RENDET=0
IF(IZ.NE.1)GO TO 7200
CR=CHUE*RS
print*, '#####'
print*, '#### LE RENDEMENT MAX =',RS
print*, '#### IL EST OBTENUE POUR '
WRITE(3,*) '#####'
WRITE(3,*) '#### LE RENDEMENT MAX =',RS
WRITE(3,*) '#### IL EST OBTENUE POUR '
CH=CHUE
GO TO 5100
7200  DO 737 I7=2,K+1
RENDET=RENDET+(REND(I7)+REND(I7-1))/2*(D(I7)-D(I7-1))
737  CONTINUE
IF(D(1).GT.0.5)THEN
RENETA(1,JJ)=RENDET/(DEXT-D(1))
FF=1.72*.0008**1.4/RLI
RENETA(1,JJ)=RENETA(1,JJ)-PRE-FF
ELSE
PRINT*, 'IL FAUT AUGMENTER LE DIAMETRE MOYEN SACHANT QUE'
PRINT*, '
LE DIAMETRE MOYEN ACTUEL=',DM1
PRINT*, '
LE DIAMETRE INTERIEUR=',D(1)
READ*,DM1
GO TO 703
ENDIF
IF(RENETA(1,JJ).LT.RS)GO TO 790
RS=RENETA(1,JJ)
JS=JJ
IS=1
790  FIN=0
IF(IZ.NE.1)GO TO 724
C ***** impression des resultats *****
C
print*, 'DIAMETRE-   U   -   C1   -   W1   -   C2   -   W2'
print*, '
*-----'
write(3,*) 'DIAMETRE-   U   -   C1   -   W1   -   C2   -   W2'
write(3,*) '
*-----'
DO 7114 I=1,K+1,10
WRITE(3,870)D(I),U(I),CENT(I),WENT(I),CSORT(I),WSORT(I)
WRITE(*,870)D(I),U(I),CENT(I),WENT(I),CSORT(I),WSORT(I)
870  FORMAT('!',X,6(F9.5,X,'!',X))

```



```

print*, '
*
write(3,*)'
*
7114 CONTINUE
      IF(IZ.EQ.1)GO TO 7300
724 CONTINUE
7300 IZ=IZ+1
      JJ=JS
      IF(IZ.EQ.1)GO TO 7100
print*, 'LES RENDEMENTS POUR DIFFERENTS VALEURS DE ,ALPHA1'
print*, '
*
DO 766 I=1,14
  print*,AE(I),RENETA(1,I)
  write(2,*)AE(I),RENETA(1,I)
766 CONTINUE
print*, 'DIAMETRE -          PHI          -          PSI          -          REND'
print*, '
*
DO 799 I=1,K+1,3
  print*,D(I),PHI(I),S(I),REND(I)
print*, '
*
799 CONTINUE
PRINT*, ' [][][] TAPEZ 1 POUR CALCUL ETAGE SUIVANT [][][]'
READ*,LOI
IF(LOI.EQ.1)GO TO 508
901 END
C
C<<<< SOUS PROGRAMME POUR LES COEFFICIENTS DE PERTES DE VITESSES >>>>
C
SUBROUTINE SOL(POG1,POG2,TUI,ze,YY)
DIMENSION ZE(13),YY(13)
PI=3.1415927
anv=(ABS(POG1-POG2))*180/PI
ANP=ANV*PI/180
DO 6 I=1,13
py=anv-ze(I)
IF(py.EQ.0)GO TO 5
IF(py.GT.0)GO TO 6
IF(I.EQ.1)GO TO 5
XW=ze(I)-ze(I-1)
TUI=(YY(I-1)-YY(I))/XW*(-anv+ze(I))+YY(I)
GO TO 7
5 TUI=YY(I)
GO TO 7
6 CONTINUE
FOI=1
RETURN
END

```


ETAGE NO 1

tableau (1-b)

\\\\\\\\\\\\\\\\ TABLEAU DES vitesses aux different rayon

DIAMETRE[m]!	U[m/s] !	C1[m/s] !	W1 [m/s] !	C2 [m/s] !	W2 [m/s] !
1.46263	229.74883	350.11874	171.93608	202.70927	161.70917
1.46638	230.33887	349.40744	171.24654	202.45152	162.19235
1.47014	230.92889	348.70013	170.56738	202.19533	162.67867
1.47390	231.51891	347.99680	169.89873	201.94077	163.16803
1.47765	232.10895	347.29730	169.24036	201.68773	163.66046
1.48141	232.69899	346.60175	168.59242	201.43629	164.15582
1.48516	233.28903	345.91003	167.95493	201.18637	164.65411
1.48892	233.87907	345.22211	167.32776	200.93797	165.15529
1.49268	234.46910	344.53802	166.71111	200.69109	165.65927
1.49643	235.05914	343.85770	166.10487	200.44576	166.16603
1.50019	235.64919	343.18103	165.50906	200.20186	166.67554
1.50395	236.23923	342.50815	164.92371	199.95947	167.18770
1.50770	236.82924	341.83890	164.34891	199.71851	167.70253
1.51146	237.41927	341.17331	163.78455	199.47903	168.21992
1.51521	238.00931	340.51135	163.23062	199.24097	168.73990
1.51897	238.59935	339.85300	162.68719	199.00441	169.26233
1.52273	239.18939	339.19821	162.15425	198.76924	169.78726
1.52648	239.77943	338.54691	161.63182	198.53543	170.31462
1.53024	240.36946	337.89917	161.11986	198.30304	170.84436
1.53400	240.95950	337.25494	160.61848	198.07208	171.37640

ETAGE NO 2

tableau (2-a)

\\\\\\\\\\\\\\\\ EVOLUTION DES ANGLES SUIVANT LE RAYON (stator-rotor)

DIAMETRE (mm)	ALPHA (degre)		BETA (degre)	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
1.451126	21.33300	58.57858	136.3058	43.69418
1.456037	21.39869	58.66463	135.9270	43.48524
1.460948	21.46431	58.75029	135.5445	43.27827
1.465860	21.52987	58.83547	135.1584	43.07325
1.470771	21.59538	58.92028	134.7686	42.87014
1.475683	21.66083	59.00468	134.3752	42.66891
1.480594	21.72621	59.08866	133.9780	42.46956
1.485505	21.79154	59.17222	133.5771	42.27207
1.490417	21.85681	59.25537	133.1725	42.07638
1.495328	21.92202	59.33811	132.7642	41.88250
1.500240	21.98717	59.42046	132.3520	41.69041
1.505151	22.05226	59.50243	131.9361	41.50004
1.510063	22.11729	59.58401	131.5163	41.31142
1.514974	22.18225	59.66515	131.0927	41.12452
1.519885	22.24717	59.74593	130.6653	40.93930
1.524797	22.31201	59.82631	130.2340	40.75575
1.529708	22.37680	59.90630	129.7989	40.57384
1.534620	22.44153	59.98592	129.3600	40.39356
1.539531	22.50620	60.06516	128.9171	40.21489
1.544443	22.57081	60.14402	128.4704	40.03780

ETAGE NO 2

tableau (2-b)

XXXXXXXXX TABLEAU DES vitesses aux different rayon

RAYON [m]	U [m/s]	C1 [m/s]	W1 [m/s]	C2 [m/s]	W2 [m/s]
1.45113	227.94228	413.89688	217.96277	161.14732	199.06519
1.45604	228.71376	412.68576	216.46933	160.99976	199.82921
1.46095	229.48521	411.48337	214.99182	160.85356	200.59451
1.46586	230.25673	410.28955	213.53012	160.70874	201.36098
1.47077	231.02821	409.10425	212.08430	160.56519	202.12869
1.47568	231.79970	407.92734	210.65442	160.42293	202.89757
1.48059	232.57118	406.75879	209.24037	160.28195	203.66757
1.48551	233.34264	405.59851	207.84227	160.14227	204.43864
1.49042	234.11415	404.44638	206.46008	160.00391	205.21082
1.49533	234.88564	403.30237	205.09392	159.86671	205.98404
1.50024	235.65712	402.16635	203.74371	159.73076	206.75827
1.50515	236.42860	401.03824	202.40947	159.59605	207.53357
1.51006	237.20006	399.91797	201.09135	159.46248	208.30981
1.51497	237.97157	398.80554	199.78934	159.33014	209.08701
1.51989	238.74306	397.70078	198.50342	159.19894	209.86513
1.52480	239.51454	396.60367	197.23369	159.06900	210.64413
1.52971	240.28603	395.51407	195.98010	158.94009	211.42403
1.53462	241.05753	394.43198	194.74274	158.81236	212.20483
1.53953	241.82899	393.35727	193.52168	158.68571	212.98645
1.54444	242.60048	392.28989	192.31696	158.56024	213.76892

ETAGE NO 3

tableau (3-a)

\\\\\\\\\\\\\\\\ EVOLUTION DES ANGLES SUIVANT LE RAYON (stator-rotor)

DIAMETRE [m]	ALPHA (degre)		BETA (degre)	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
1.421152	18.88800	44.78215	136.3047	43.69533
1.429076	18.98579	44.94144	135.5657	43.23331
1.437000	19.08347	45.09985	134.8119	42.78072
1.444924	19.18103	45.25740	134.0431	42.33728
1.452847	19.27847	45.41404	133.2591	41.90280
1.460771	19.37580	45.56984	132.4596	41.47701
1.468695	19.47301	45.72477	131.6446	41.05967
1.476619	19.57011	45.87886	130.8138	40.65059
1.484543	19.66709	46.03211	129.9671	40.24953
1.492467	19.76395	46.18448	129.1044	39.85629
1.500391	19.86069	46.33603	128.2256	39.47066
1.508314	19.95732	46.48674	127.3307	39.09245
1.516238	20.05383	46.63663	126.4195	38.72146
1.524162	20.15022	46.78570	125.4922	38.35750
1.532086	20.24649	46.93393	124.5486	38.00040
1.540010	20.34264	47.08134	123.5890	37.64998
1.547934	20.43868	47.22796	122.6133	37.30605
1.555857	20.53459	47.37375	121.6217	36.96848
1.563781	20.63038	47.51875	120.6144	36.63708
1.571705	20.72605	47.66297	119.5917	36.31169

ETAGE NO 3

tableau (3-b)

\\\\\\\\\\\\\\\\ TABLEAU DES vitesses aux different rayon

DIAMETRE[m] !	U[m/s] !	C1[m/s] !	W1 [m/s] !	C2 [m/s] !	W2 [m/s] !
1.42115 !	223.23405 !	367.55713 !	172.23694 !	154.26981 !	157.30453 !
1.42908 !	224.47873 !	365.73322 !	169.95694 !	153.83945 !	158.64862 !
1.43700 !	225.72340 !	363.93048 !	167.72098 !	153.41501 !	159.99792 !
1.44492 !	226.96806 !	362.14856 !	165.52936 !	152.99637 !	161.35219 !
1.45285 !	228.21275 !	360.38715 !	163.38246 !	152.58351 !	162.71107 !
1.46077 !	229.45743 !	358.64587 !	161.28062 !	152.17621 !	164.07442 !
1.46870 !	230.70212 !	356.92441 !	159.22424 !	151.77443 !	165.44196 !
1.47662 !	231.94678 !	355.22244 !	157.21373 !	151.37805 !	166.81346 !
1.48454 !	233.19144 !	353.53964 !	155.24954 !	150.98694 !	168.18869 !
1.49247 !	234.43613 !	351.87573 !	153.33200 !	150.60112 !	169.56741 !
1.50039 !	235.68080 !	350.23041 !	151.46169 !	150.22041 !	170.94948 !
1.50831 !	236.92549 !	348.60336 !	149.63904 !	149.84477 !	172.33467 !
1.51624 !	238.17015 !	346.99429 !	147.86459 !	149.47403 !	173.72281 !
1.52416 !	239.41481 !	345.40292 !	146.13869 !	149.10812 !	175.11374 !
1.53209 !	240.65950 !	343.82901 !	144.46193 !	148.74712 !	176.50723 !
1.54001 !	241.90416 !	342.27225 !	142.83481 !	148.39075 !	177.90317 !
1.54793 !	243.14885 !	340.73236 !	141.25786 !	148.03896 !	179.30148 !
1.55586 !	244.39352 !	339.20914 !	139.73149 !	147.69177 !	180.70184 !
1.56378 !	245.63820 !	337.70230 !	138.25638 !	147.34904 !	182.10426 !
1.57171 !	246.88286 !	336.21155 !	136.83287 !	147.01065 !	183.50861 !

ETAGE NO 4

tableau (4-a)

\\\\\\\\\\\\\\\\ EVOLUTION DES ANGLES SUIVANT LE RAYON (stator-rotor)

DIAMETRE [m]	ALPHA (degre)		BETA (degre)	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
1.383646	16.44400	35.53639	137.9969	42.00305
1.395341	16.57539	35.76477	136.7450	41.17128
1.407035	16.70659	35.99184	135.4455	40.37093
1.418730	16.83762	36.21763	134.0968	39.60046
1.430424	16.96847	36.44212	132.6976	38.85844
1.442118	17.09913	36.66531	131.2465	38.14348
1.453813	17.22961	36.88721	129.7425	37.45430
1.465507	17.35991	37.10783	128.1846	36.78963
1.477202	17.49002	37.32717	126.5722	36.14833
1.488896	17.61995	37.54526	124.9049	35.52925
1.500591	17.74969	37.76206	123.1827	34.93139
1.512285	17.87924	37.97760	121.4058	34.35374
1.523979	18.00860	38.19188	119.5751	33.79535
1.535674	18.13777	38.40490	117.6918	33.25534
1.547368	18.26675	38.61668	115.7577	32.73287
1.559063	18.39554	38.82722	113.7751	32.22715
1.570757	18.52414	39.03653	111.7468	31.73741
1.582452	18.65255	39.24460	109.6765	31.26296
1.594146	18.78076	39.45144	107.5682	30.80311
1.605840	18.90878	39.65706	105.4264	30.35723

ETAGE NO 4

tableau (4-b)

TABLEAU DES vitesses aux different rayon

RAYON [m]	U [m/s]	C1 [m/s]	W1 [m/s]	C2 [m/s]	W2 [m/s]
1.30365	217.34264	337.10083	142.60326	148.94771	129.37123
1.39534	219.17961	334.50284	139.25780	148.12225	131.50504
1.40704	221.01657	331.94980	136.01419	147.31287	133.65276
1.41873	222.85352	329.44055	132.87453	146.51906	135.81308
1.43042	224.69048	326.97403	129.84106	145.74048	137.98468
1.44212	226.52742	324.54919	126.91631	144.97675	140.16637
1.45381	228.36440	322.16510	124.10284	144.22751	142.35706
1.46551	230.20134	319.82065	121.40338	143.49234	144.55577
1.47720	232.03831	317.51498	118.82097	142.77094	146.76157
1.48090	233.87527	315.24713	116.35835	142.06284	148.97368
1.50059	235.71222	313.01627	114.01891	141.36787	151.19122
1.51228	237.54918	310.82150	111.80563	140.68562	153.41354
1.52398	239.38614	308.66196	109.72152	140.01581	155.64003
1.53567	241.22310	306.53690	107.76972	139.35815	157.87000
1.54737	243.06004	304.44550	105.95334	138.71236	160.10295
1.55906	244.89700	302.38699	104.27510	138.07808	162.33839
1.57076	246.73395	300.36063	102.73775	137.45508	164.57587
1.58245	248.57091	298.36572	101.34340	136.84312	166.81491
1.59415	250.40790	296.40158	100.09441	136.24194	169.05513
1.60584	252.24483	294.46750	98.99226	135.65118	171.29622

ETAGE NO 5

tableau (5-a)

\\\\\\\\\\\\\\\\ EVOLUTION DES ANGLES SUIVANT LE RAYON (stator-rotor)

DIAMETRE (mm)	ALPHA (degre)		BETA (degre)	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
1.353081	16.44400	37.37596	139.2239	40.77609
1.368567	16.61259	37.67457	137.6993	39.79824
1.383252	16.78087	37.97079	136.1013	38.86560
1.397938	16.94887	38.26466	134.4269	37.97541
1.412623	17.11656	38.55613	132.6731	37.12518
1.427308	17.28395	38.84528	130.8376	36.31245
1.441994	17.45103	39.13210	128.9181	35.53501
1.456679	17.61782	39.41659	126.9130	34.79079
1.471364	17.78429	39.69879	124.8214	34.07784
1.486050	17.95045	39.97870	122.6432	33.39434
1.500735	18.11630	40.25634	120.3793	32.73863
1.515421	18.28184	40.53170	118.0316	32.10912
1.530106	18.44706	40.80481	115.6035	31.50435
1.544791	18.61197	41.07572	113.0993	30.92293
1.559477	18.77655	41.34441	110.5251	30.36361
1.574162	18.94082	41.61088	107.8886	29.82518
1.588848	19.10476	41.87518	105.1984	29.30653
1.603533	19.26838	42.13731	102.4648	28.80662
1.618218	19.43167	42.39730	99.69907	28.32447
1.632904	19.59464	42.65514	96.91338	27.85919

ETAGE NO 6

tableau (6-a)

\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\ EVOLUTION DES ANGLES SUIVANT LE RAYON (stator-rotor)

DIAMETRE (mm)	ALPHA (degre)		BETA (degre)	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
1.366528	16.44400	40.74787	141.0575	38.94246
1.325972	16.67523	41.16688	139.1322	37.77949
1.345416	16.90590	41.58059	137.0831	36.68446
1.364861	17.13601	41.98906	134.9028	35.65203
1.384305	17.36555	42.39236	132.5845	34.67735
1.403749	17.59452	42.79053	130.1224	33.75600
1.423193	17.82290	43.18366	127.5119	32.88395
1.442638	18.05071	43.57177	124.7501	32.05754
1.462082	18.27792	43.95495	121.8367	31.27340
1.481526	18.50455	44.33327	118.7743	30.52850
1.500970	18.73057	44.70675	115.5691	29.82004
1.520414	18.95599	45.07549	112.2315	29.14551
1.539859	19.18080	45.43951	108.7761	28.50255
1.559303	19.40500	45.79891	105.2221	27.88906
1.578747	19.62858	46.15372	101.5927	27.30306
1.598191	19.85155	46.50404	97.91435	26.74277
1.617636	20.07389	46.84988	94.21603	26.20657
1.637080	20.29560	47.19130	90.52754	25.69292
1.656524	20.51667	47.52841	86.87824	25.20045
1.675968	20.73711	47.86125	83.29575	24.72785

ETAGE NO 6

tableau (6-b)

TABLEAU DES vitesses aux different rayon

RAYON [m]	U [m/s]	C1 [m/s]	W1 [m/s]	C2 [m/s]	W2 [m/s]
1.30653	205.22896	337.10083	151.82155	131.11134	136.15771
1.32597	208.28323	332.55634	145.84077	130.01129	139.69496
1.34542	211.33751	328.14859	140.13899	128.94986	143.25310
1.36486	214.39183	323.87161	134.72403	127.92519	146.82831
1.38430	217.44611	319.71991	129.60529	126.93564	150.41714
1.40375	220.50040	315.68832	124.79370	125.97966	154.01669
1.42319	223.55469	311.77182	120.30073	125.05569	157.62447
1.44264	226.60898	307.96582	116.13993	124.16241	161.23822
1.46208	229.66328	304.26581	112.32452	123.29842	164.85614
1.48153	232.71756	300.66760	108.86868	122.46243	168.47658
1.50097	235.77188	297.16727	105.78597	121.65336	172.09808
1.52041	238.82616	293.76105	103.08923	120.86996	175.71945
1.53986	241.88043	290.44528	100.78954	120.11131	179.33965
1.55930	244.93474	287.21664	98.89554	119.37627	182.95779
1.57875	247.98903	284.07187	97.41302	118.66392	186.57307
1.59819	251.04332	281.00784	96.34354	117.97328	190.18491
1.61764	254.09761	278.02170	95.68478	117.30359	193.79263
1.63708	257.15192	275.11063	95.42986	116.65404	197.39578
1.65652	260.20621	272.27194	95.56763	116.02374	200.99402
1.67597	263.26047	269.50311	96.08289	115.41190	204.58698

ETAGE NO 7

tableau (7-a)

XXXXXXXXX EVOLUTION DES ANGLES SUIVANT LE RAYON (stator-rotor)

DIAMETRE Lm	ALPHA (degre)		BETA (degre)	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
1.196569	14.00000	46.44060	149.6232	30.37686
1.227065	14.34226	47.16015	147.1313	29.08995
1.257561	14.68348	47.86071	144.3465	27.91356
1.288058	15.02363	48.54284	141.2268	26.83421
1.318554	15.36271	49.20706	137.7270	25.84045
1.349050	15.70069	49.85391	133.8013	24.92250
1.379546	16.03755	50.48392	129.4075	24.07198
1.410042	16.37327	51.09754	124.5144	23.28168
1.440538	16.70784	51.69527	119.1116	22.54535
1.471034	17.04125	52.27765	113.2218	21.85757
1.501530	17.37347	52.84512	106.9120	21.21362
1.532027	17.70448	53.39814	100.2977	20.60936
1.562523	18.03428	53.93713	93.53707	20.04115
1.593019	18.36286	54.46255	86.81044	19.50578
1.623515	18.69018	54.97482	80.29324	19.00043
1.654011	19.01624	55.47435	74.12974	18.52256
1.684507	19.34103	55.96151	68.41798	18.06993
1.715003	19.66453	56.43675	63.20780	17.64054
1.745499	19.98673	56.90036	58.50853	17.23258
1.775995	20.30763	57.35276	54.30099	16.84445

ETAGE NO 7

tableau (7-b)

TABLEAU DES vitesses aux different rayon

IAMETRE[m]:	U[m/s]	C1[m/s]	W1 [m/s]	C2 [m/s]	W2 [m/s]
1.19657	187.95665	337.10083	161.27037	97.61935	139.89108
1.22707	192.74698	329.21909	150.26666	96.47486	145.50285
1.25756	197.52729	321.73105	139.91180	95.40035	151.11087
1.28806	202.32761	314.60870	130.22502	94.39027	156.71078
1.31855	207.11794	307.82660	121.23746	93.43965	162.29938
1.34905	211.90825	301.36166	112.99295	92.54395	167.87427
1.37955	216.69856	295.19272	105.54053	91.69911	173.43381
1.41004	221.48891	289.30057	98.97281	90.90131	178.97676
1.44054	226.27922	283.66763	93.34379	90.14732	184.50230
1.47103	231.06955	278.27765	88.74146	89.43394	190.01010
1.50153	235.85985	273.11584	85.23840	88.75836	195.49985
1.53203	240.65018	268.16843	82.88716	88.11795	200.97157
1.56252	245.44048	263.42297	81.70775	87.51040	206.42525
1.59302	250.23080	258.86748	81.67863	86.93353	211.86121
1.62351	255.02113	254.49187	82.73660	86.38526	217.27971
1.65401	259.81143	250.28551	84.78373	85.86381	222.68109
1.68451	264.60178	246.23941	87.70061	85.36763	228.06580
1.71500	269.39209	242.34489	91.35986	84.89493	233.43422
1.74550	274.18243	238.59407	95.63779	84.44432	238.78679
1.77600	278.97272	234.97943	100.42260	84.01451	244.12396

ETAGE NO 8

tableau (8-a)

\\\\\\\\\\\\\\\\ EVOLUTION DES ANGLES SUIVANT LE RAYON (stator-rotor)

DIAMETRE (m)	ALPHA (degre)		BETA (degre)	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
1.134703	16.44400	58.80721	146.6641	33.33593
1.171416	16.94599	59.60952	143.5453	31.87663
1.208129	17.44531	60.37519	140.0412	30.54486
1.244842	17.94191	61.10654	136.1016	29.32477
1.281555	18.43574	61.80550	131.6789	28.20295
1.318268	18.92674	62.47408	126.7351	27.16797
1.354980	19.41488	63.11399	121.2527	26.21009
1.391693	19.90011	63.72691	115.2485	25.32093
1.428406	20.38238	64.31435	108.7866	24.49327
1.465119	20.86165	64.87778	101.9854	23.72087
1.501832	21.33788	65.41854	95.01277	22.99826
1.538545	21.81104	65.93785	88.06395	22.32071
1.575258	22.28110	66.43693	81.33073	21.68404
1.611971	22.74801	66.91681	74.97116	21.08459
1.648684	23.21176	67.37855	69.09161	20.51911
1.685396	23.67231	67.82310	63.74482	19.98472
1.722109	24.12963	68.25134	58.93863	19.47887
1.758822	24.58371	68.66412	54.64978	18.99928
1.795535	25.03452	69.06223	50.83800	18.54390
1.832248	25.48204	69.44637	47.45393	18.11088

ETAGE NO 8

tableau (8-b)

////////// TABLEAU DES vitesses aux different rayon

RAYON [m]	U [m/s]	C1 [m/s]	W1 [m/s]	C2 [m/s]	W2 [m/s]
1.13470	178.23877	337.10083	173.64459	98.01913	152.57742
1.17142	184.00560	327.39499	160.59886	97.20458	158.77621
1.20813	189.77245	318.30338	148.58350	96.45727	164.98685
1.24484	195.53929	309.77130	137.62381	95.76991	171.20335
1.28155	201.30615	301.75058	127.76538	95.13654	177.42094
1.31827	207.07300	294.19824	119.07253	94.55149	183.63631
1.35498	212.83984	287.07608	111.62399	94.01022	189.84676
1.39169	218.60669	280.34982	105.50515	93.50840	196.05048
1.42841	224.37354	273.98883	100.79578	93.04237	202.24600
1.46512	230.14038	267.96542	97.55247	92.60889	208.43242
1.50183	235.90723	262.25467	95.79221	92.20490	214.60905
1.53854	241.67407	256.83405	95.48041	91.82792	220.77547
1.57526	247.44092	251.68303	96.52869	91.47566	226.93146
1.61197	253.20775	246.78316	98.80548	91.14592	233.07686
1.64868	258.97464	242.11739	102.15238	90.83686	239.21178
1.68540	264.74149	237.67029	106.40320	90.54686	245.33621
1.72211	270.50833	233.42773	111.39874	90.27432	251.45035
1.75882	276.27518	229.37675	116.99609	90.01797	257.55441
1.79554	282.04199	225.50545	123.07245	89.77646	263.64859
1.83225	287.80887	221.80287	129.52560	89.54878	269.73318

ETAGE NO 9

tableau (9-a)

EVOLUTION DES ANGLES SUIVANT LE RAYON (stator-rotor)

RAYON (cm)	ALPHA (degre)		BETA (degre)	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
026742	18.88800	77.18665	145.3115	34.68849
074324	19.69694	77.73640	141.2718	33.12841
121886	20.49777	78.24153	136.6699	31.70198
169448	21.29033	78.70721	131.4382	30.39293
217010	22.07443	79.13785	125.5289	29.18748
264573	22.84992	79.53719	118.9359	28.07392
312135	23.61667	79.90852	111.7206	27.04219
359697	24.37456	80.25459	104.0309	26.08363
407259	25.12346	80.57797	96.09852	25.19076
454821	25.86330	80.88075	88.20511	24.35707
502383	26.59398	81.16483	80.62490	23.57688
549945	27.31546	81.43185	73.57131	22.84521
597507	28.02767	81.68333	67.17046	22.15767
645069	28.73059	81.92053	61.46518	21.51039
692632	29.42417	82.14470	56.43711	20.89994
740194	30.10841	82.35683	52.03204	20.32326
787756	30.78330	82.55786	48.18013	19.77761
835318	31.44885	82.74866	44.80894	19.26057
882880	32.10508	82.92994	41.85049	18.76995
930442	32.75201	83.10245	39.24427	18.30374

ETAPE No 9

tableau (9-b)

TABLEAU DES vitesses aux different rayon

RAYON [m]	U [m/s]	C1 [m/s]	W1 [m/s]	C2 [m/s]	W2 [m/s]
1.02676	161.28339	337.10083	191.74709	98.91045	169.46919
1.07432	168.75443	323.77301	174.42670	98.69963	176.47629
1.12189	176.22548	311.63644	159.02937	98.51467	183.53410
1.16945	183.69650	300.54492	145.56549	98.35151	190.63481
1.21701	191.16754	290.37497	134.09071	98.20689	197.77219
1.26457	198.63860	281.02182	124.69250	98.07809	204.94101
1.31213	206.10962	272.39581	117.46619	97.96297	212.13704
1.35970	213.58067	264.41980	112.48191	97.85947	219.35675
1.40726	221.05171	257.02710	109.74712	97.76634	226.59724
1.45482	228.52275	250.15971	109.17957	97.68200	233.85599
1.50238	235.99379	243.76707	110.60339	97.60555	241.13091
1.54995	243.46483	237.80469	113.77105	97.53593	248.42018
1.59751	250.93587	232.23346	118.40120	97.47243	255.72229
1.64507	258.40692	227.01878	124.21478	97.41427	263.03589
1.69263	265.87796	222.12993	130.95970	97.36096	270.35983
1.74019	273.34900	217.53955	138.42247	97.31192	277.69318
1.78776	280.82004	213.22321	146.42978	97.26671	285.03494
1.83532	288.29108	209.15900	154.84468	97.22501	292.38443
1.88288	295.76212	205.32724	163.56087	97.18627	299.74091
1.93044	303.23318	201.71019	172.49644	97.15057	307.10388

ETAGE N° 10

tableau (10-a)

////////// EVOLUTION DES ANGLES SUIVANT LE RAYON(stator-rotor)

METRE (m/s)	ALPHA (degre)		BETA (degre)	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
1.5035609	10.00600	159.6471	167.1299	12.87008
1.6276151	12.34709	155.1348	161.3623	13.25670
1.7496673	14.65286	150.8770	152.4121	13.12825
1.8717235	16.91113	146.8964	136.9982	12.71387
1.9937778	19.11656	143.2027	109.9847	12.15900
1.115831	21.26470	139.8538	73.56683	11.54416
1.237885	23.35195	136.7834	50.80660	10.92581
1.359939	25.37557	133.9742	36.99774	10.32921
1.481992	27.33362	131.4071	29.00127	9.766551
1.604046	29.22488	129.0621	23.92804	9.242677
1.726099	31.04880	126.9192	20.44900	8.758386
1.848153	32.80541	124.9366	17.92459	8.313046
1.970207	34.49525	123.1194	16.00277	7.903376
2.092260	36.11920	121.4529	14.48747	7.526568
2.214314	37.67881	119.9227	13.25948	7.179773
2.336368	39.17544	118.5149	12.24210	6.860225
2.458421	40.61097	117.2174	11.38384	6.565330
2.580475	41.98738	116.0196	10.64886	6.292704
2.702528	43.30674	114.9378	10.00686	6.039839
2.824582	44.57122	113.9839	9.436036	5.804641

L'Année N° 10

tableau (10-b)

////////// TABLEAU DES VITESSES AUX DIFFERENTS RAYON

DIAMETRE[m]	U [m/s]	C1[m/s]	W1 [m/s]	C2 [m/s]	W2 [m/s]
0.50556	79.41332	353.26785	275.40646	135.82635	212.08791
0.62762	98.58556	287.54196	192.39510	112.34811	206.00856
0.74967	117.75779	243.62581	133.07478	97.06584	207.98817
0.87172	136.93001	212.34770	90.56815	86.49677	214.64992
0.99378	156.10225	189.04160	65.87627	78.86772	224.28778
1.11583	175.27438	170.95631	64.02258	73.27090	236.05801
1.23788	194.44653	156.64882	80.11713	68.98885	249.24146
1.35994	213.61865	145.09477	103.32681	65.64381	263.46722
1.48199	232.79080	135.60596	128.42943	62.98512	278.48557
1.60405	251.96295	127.70360	153.72667	60.84085	294.12109
1.72610	271.13510	121.04436	178.69360	59.08905	310.24683
1.84815	290.30722	115.40903	203.16530	57.62568	326.74001
1.97021	309.47937	110.57304	227.15050	56.40465	343.56128
2.09226	328.65149	106.38886	250.68259	55.37740	360.65460
2.21431	347.82364	102.74391	273.80634	54.50645	377.97604
2.33637	366.99579	99.54935	296.56744	53.76221	395.49277
2.45842	386.16791	96.73418	319.00839	53.12250	413.17404
2.58047	405.34003	94.24098	341.16696	52.56871	430.99765
2.70253	424.51221	91.98683	363.09796	52.09816	448.97070
2.82458	443.68436	89.90309	384.84598	51.70499	467.09641

ETAGE N° 11

Tableau (11-a)

////////// EVOLUTION DES ANGLES SUIVANT LE RAYON(stator-rotor)

METRE[m/s]	ALPHA		BETA	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
1.5984414	10.00000	147.6848	165.5378	14.46214
1.7594019	12.61236	136.7866	156.1567	14.10940
1.9203625	15.17252	127.5424	136.9980	13.09142
1.081323	17.67215	120.1337	96.75603	11.93805
1.242285	20.10421	113.7429	55.84818	10.87162
1.403246	22.46302	108.8092	35.95201	9.907687
1.564207	24.74421	105.0903	26.40060	9.059082
1.725168	26.94468	102.2872	21.00641	8.320414
1.886129	29.06251	100.1278	17.56309	7.679471
2.047090	31.09680	98.26180	15.19699	7.124670
2.208051	33.04757	96.62688	13.46829	6.640920
2.369013	34.91560	95.26321	12.13666	6.215108
2.529974	36.70235	94.61369	11.01676	5.832944
2.690935	38.40974	94.06245	10.10473	5.494004
2.851896	40.04011	93.59191	9.345581	5.191519
3.012857	41.59608	93.24528	8.696453	4.919608
3.173818	43.08051	92.94265	8.139023	4.674408
3.334780	44.49634	92.67709	7.654382	4.452218
3.495741	45.84662	92.38652	7.233956	4.250293
3.656702	47.13439	92.04907	6.868522	4.066094

ETAGE N° 11

tableau (11-b)

////////// TABLEAU DES VITESSES AUX DIFFERENTS RAYON

(METRE) [m]	U [m/s]	C1 [m/s]	W1 [m/s]	C2 [m/s]	W2 [m/s]
0.59844	94.00295	301.75073	209.81186	76.57554	163.91237
0.75940	119.28658	247.58138	133.73424	59.78451	167.92392
0.92036	144.57022	211.20735	81.05081	51.62742	180.72636
1.08132	169.85390	185.25874	56.63224	47.33210	197.89565
1.24228	195.13762	166.46495	69.14215	44.72075	217.03900
1.40325	220.42133	151.91504	98.86569	43.24485	237.91238
1.56421	245.70503	140.29361	132.06596	42.39758	259.98581
1.72517	270.98874	130.81801	165.36163	41.89515	282.88208
1.88613	296.27249	122.99380	197.99426	41.58350	306.33215
2.04709	321.55621	116.60420	229.74255	41.36480	330.04861
2.20805	346.83994	111.33605	260.68515	41.21078	353.97079
2.36901	372.12363	106.88445	290.98257	41.10923	378.11700
2.52997	397.40735	102.64573	321.02710	41.06892	402.79630
2.69093	422.69104	98.97617	350.55643	41.03847	427.56250
2.85190	447.97476	95.83095	379.64627	41.01600	452.40024
3.01286	473.25848	93.01310	408.39447	41.00153	477.33810
3.17382	498.54221	90.54097	436.81137	40.98971	502.31723
3.33478	523.82593	88.36079	464.94144	40.98018	527.33124
3.49574	549.10962	86.48676	492.78702	40.97103	552.33472
3.65670	574.39343	84.90549	520.36841	40.96187	577.31116

