

AVANT-PROPOS

Yves reposa son journal... Le rugissement des deux CFM56 et les vibrations de la cabine ne lui permettaient plus de continuer sa lecture. L'avion venait de se poser. Afin de diminuer la longueur de piste parcourue par l'appareil pour s'arrêter mais aussi pour réduire l'usure des freins et des pneus, les pilotes avaient actionné la *reverse*¹. En moins de mille mètres, les 62 tonnes de L'Airbus A320 étaient passées de 120 nœuds à zéro. En un peu plus d'une heure Yves et ses compagnons de vol venaient de franchir les 600 km séparant Toulouse-Blagnac de Paris-Orly.

Ces performances, aujourd'hui banalisées, sont largement dues à la mise au point de moteurs puissants et fiables, appelés turboréacteurs, moteurs appartenant à la famille des turbomachines.

L'importance des TM² dans le monde moderne n'est plus à démontrer. Un grand nombre de systèmes technologiques de la vie courante (machine à laver le linge, ordinateur de bureau, four à chaleur tournante,) renferme par exemple une turbopompe ou un ventilateur. On trouve des TM plus complexes dans des domaines aussi variés que : l'aviation (turboréacteur ou turbopropulseur) comme on vient de le voir, l'automobile (turbocompresseur, pompe à eau), la marine (turbine à gaz), la production d'énergie électrique (turbines hydrauliques, turbines à gaz, turbines à vapeur, éoliennes).

C'est le besoin de fortes puissances qui a justifié la mise au point de telles machines, au milieu du siècle dernier. La société industrielle demandant de plus en plus d'énergie avec des puissances appelées de plus en plus fortes il fallait constamment accroître la puissance des moteurs alternatifs en augmentant la cylindrée et la vitesse de rotation. Mais il y a des limites à ces augmentations. Les ingénieurs se sont alors penchés vers un type nouveau de mouvement. *Exit* le système bielle-manivelle; place à la rotation continue. Plus de mouvement alternatif donc plus de limitation de vitesse de rotation (ou presque³ !), plus de cylindrée donc plus de limite au débit de fluide (ou presque !). Les puissances mises en jeu peuvent alors devenir considérables. Sur le principe c'est excellent. Restait à réaliser ce type de machines avec un rendement acceptable. Ce fut le travail de nombreux ingénieurs⁴...

¹ Terme anglais équivalent à *inverseur de poussée* (cf. chapitre V)

² TM : TurboMachines

³ Le compresseur automobile (appelé couramment *turbo*, peut tourner à 150 000 t/mn. C'est une turbomachine double (compresseur+turbine) greffée sur un moteur alternatif pour accroître la puissance développée par celui-ci. Alliance de l'alternatif et du rotatif...

⁴ Des milliers d'ingénieurs continuent de travailler de nos jours et de par le monde à l'amélioration du rendement de ce type de machines. La butée plafond du rendement, dans le cas des machines thermiques, est donnée par le rendement de Carnot η_C . En notant T_C la température absolue de la source chaude et T_F la température de la

source froide, le rendement de Carnot s'écrit : $\eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$. . . Ainsi pour une turbine à gaz aspirant de l'air à

15°C (soit 288 K) et dont la température de chambre de combustion s'élève à 1 640 K, on ne peut pas espérer obtenir un rendement thermodynamique supérieur à $1 - \frac{288}{1640} = 82\%$. Dans la pratique, on est plus près de 30

à 40 %. Signalons que l'amélioration du rendement est en grande partie dû aux avancées réalisées en métallurgie, permettant d'accroître la température de la source chaude.

Dans un précédent ouvrage de la même collection, nous nous sommes intéressés aux TMFI¹, à savoir les pompes, les turbines hydrauliques, les ventilateurs et les éoliennes. Les fluides qui circulent dans ces machines sont le plus souvent l'air et l'eau que l'on peut considérer comme incompressibles dès lors qu'ils ne subissent que de faibles variations de pression et de température.

La production de fortes puissances massiques par des TM dites "thermodynamiques" nécessite un apport d'énergie calorifique. Dans ces machines, le fluide de travail subit trois étapes :

- 1 : une compression
- 2 : un chauffage
- 3 : une détente.

L'analyse des caractéristiques des fluides (pression, température, masse volumique), lors de ces trois étapes font appel aux principes de la thermodynamique. On est alors conduit à utiliser deux nouvelles grandeurs : l'enthalpie pour la quantité d'énergie échangée et l'entropie, pour la nature² de celle-ci.

Cet ouvrage constitue la suite logique du précédent. Les fluides traversant les différentes TM y sont considérés compressibles. C'est le cas par exemple de l'eau liquide transformée en vapeur d'eau sous pression dans un générateur de vapeur et qui vient se détendre dans une turbine.

Le premier chapitre traite des turbines, TM dans lesquelles un fluide de travail chargé d'énergie, après avoir été comprimé et/ou chauffé, se détend en produisant du travail mécanique (rotation du rotor).

Le chapitre II s'intéresse aux compresseurs. Dans la réalisation d'une machine complexe, telle qu'une turbine à gaz (TAG), le compresseur doit être construit avec beaucoup de soins car de lui dépend en grande partie le rendement global de la machine.

Le chapitre III traite des turbines à vapeur (TAV) dont le rôle essentiel, de nos jours, est la production d'électricité. Par exemple, la TAV utilisée dans une tranche nucléaire de Golfech³ transforme chaque seconde, en fonctionnement nominal, 4 000 MJ d'énergie contenue dans de la vapeur d'eau en 1300 MW_e de puissance électrique délivrée.

En adjoignant au couple turbine-compresseur une chambre de combustion, on réalise une TM complexe appelée turbine à gaz (TAG). Son étude fait l'objet du chapitre IV.

Enfin le dernier chapitre (chapitre V) traite des turbines à gaz utilisées en aéronautique (turbopropulseur et turboréacteur). Véritables bijoux de technologie, ces TM expliquent la part importante des moteurs dans le prix d'un avion de ligne⁴.

Comme pour l'ouvrage intitulé "TURBOMACHINES à fluides incompressibles", on trouvera en fin du livre un cahier des solutions des applications posées à la fin de chaque chapitre.

¹ TurboMachines à Fluides Incompressibles

² Chaleur et travail, s'ils sont mesurés avec la même unité (le joule), n'en sont pas moins des formes différentes de l'énergie et n'ont pas la même "valeur".

³ Le site de Golfech (82 Tarn-et-Garonne) possède 2 tranches nucléaires REP de 1300 MW_e (4 tranches étaient prévues initialement). Le taux de charge s'élevant à environ 75% et le kWh étant facturé 10 c€ (HT et abonnement) les recettes de l'opérateur se montent à : $0,75 \times 365 \times 24 \times 1300 \times 10^3 \times 0,1 = 0,854$ milliards €/an !

⁴ Entre ¼ à 1/3 du prix de vente.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I.	LES TURBINES	
1. Turbine à action		
1.1 Généralités		9
1.2 Diagrammes des vitesses		13
1.3 Influences des frottements.....		15
1.4 turbines Curtis.....		16
2. Turbine à réaction		
2.1 Généralités.....		18
2.2 Étage à réaction		19
2.3 Rendement.....		22
2.4 Ailettes de grande hauteur		23
Applications		26
CHAPITRE II.	LES COMPRESSEURS	
1. Compresseur centrifuge		
1.1 Description.....		29
1.2 Taux de compression		31
1.3 Influence des frottements.....		33
1.4 Compresseur multiétage		34
2. Compresseur axial		
2.1 Description.....		36
2.2 Travail		38
2.3 Grille d'aube		42
2.4 Courbes caractéristiques		44
2.5 Fonctionnement.....		48
Applications		49
CHAPITRE III.	LES TURBINES À VAPEUR	
1. Cycles thermodynamiques		
1.1 Principe		51
1.2 Améliorations.....		53
2. Les centrales électrogènes à vapeur		
2.1 Le générateur de vapeur		57
2.2 La turbine		58
2.3 Le condenseur.....		60
2.4 Le poste d'eau.....		61
2.5 Organes de réglage.....		61
3. Exemples		
3.1 TAV de 60 MW		63
3.2 TAV de 150 MW		63
3.3 TAV de la centrale au charbon d'Albi		64
3.4 TAV de la centrale nucléaire de Golfech.....		65
Applications		66
CHAPITRE IV.	LES TURBINES À GAZ	
1. Généralités		
1.1 Principe de fonctionnement.....		69
1.2 Problèmes technologiques.....		70

2. Cycles thermodynamiques	
2.1 Cycle de Brayton.....	72
2.2 Améliorations.....	74
2.3 Cycle combiné.....	76
2.4 Cycle à cogénération.....	77
3. Combustibles et combustion	
3.1 Les combustibles.....	78
3.2 La chambre de combustion.....	78
3.3 Le champ des températures.....	79
4. Exemples	
4.1 TAG industrielle.....	84
4.2 GAP.....	85
4.3 TAG pour hélicoptère.....	86
Applications.....	87

CHAPITRE V. LES TURBOMOTEURS D'AVION

1. Généralités	
1.1 Turbopropulseur.....	89
1.2 Turboréacteur.....	90
1.3 Un peu d'histoire.....	93
2. Technologie des turboréacteurs	
2.1 L'entrée d'air.....	95
2.2 Le compresseur.....	97
2.3 La chambre de combustion.....	101
2.4 La turbine.....	102
2.5 La tuyère.....	104
2.6 Contrôle-commande.....	106
3. Rendements	
3.1 Définitions.....	108
3.2 Puissance.....	108
3.3 Rendements.....	109
4. Exemples	
4.1 CFM56.....	110
4.2 V2500.....	111
4.3 PW4000.....	112
4.4 M88.....	113
Applications.....	114

SOLUTION DES APPLICATIONS.....119

ANNEXES

1. Unités.....	155
2. Correspondances entre températures.....	157
3. Correspondances entre débits volumiques.....	158
4. Correspondances entre énergies.....	159
5. Rappels de mécanique des fluides.....	160
6. Un brin d'aérodynamique avion.....	166
7. Formulaire de thermodynamique.....	168
8. Enthalpie de formation.....	169
9. Chaleurs spécifiques (à $p=C^{te}$).....	170
10. Enthalpie d'échauffement.....	171
11. Propriétés de l'eau liquide saturée.....	173
12. Table de la vapeur d'eau saturée.....	174
13. Diagramme T-s de l'eau.....	176

14. Diagramme h-s de l'eau (Mollier).....	177
15. Propriétés de l'air sec (sous 1 atm).....	178
16. Atmosphère standard (ISA).....	179
17. Formulaire d'air humide.....	180
18. Fabricants de turbomachines.....	181
19. bibliographie.....	182
20. Petit dictionnaire <i>english-français</i>	183
INDEX	188

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

contraction	développement
APU	<i>auxiliary power unit (cf. GAP)</i>
CFWH	<i>close feedwater heater</i>
ENR	énergies renouvelables
egt	exhaust gas temperature
FADEC	<i>full authority digital engine control</i>
FL	<i>flight level</i> (niveau de vol)
GAP	groupe auxiliaire de puissance (cf. APU)
GN	gaz naturel
gb	gaz brûlés
GV	générateur de vapeur
ISA	<i>International Standard Atmosphere</i>
mCE	mètre de colonne d'eau
MTOW	maximum take-off weight
NPSH	<i>net positive suction head (over vapor pressure)</i>
ns	nombre de tours spécifique
OFWH	<i>Open Feed Water Heater</i>
pc	post-combustion
pdC	perte de charge
PWR	<i>pressurized water reactor (cf. REP)</i>
REP	réacteur à eau pressurisée (cf. PWR)
TAG	turbine à gaz
TAV	turbine à vapeur

LISTE DES APPLICATIONS

.....	Titre	page	solution
I.1	turbine à action	26	123
I.2	turbine Curtis	26	124
I.3	turbine à réaction	26	125
I.4	turbine à action multi-étagée	28	126
II.1	compresseur radial	49	130
II.2	station de compression d'un gazoduc	49	130
II.3	compresseur axial	50	131
III.1	cogénération nucléaire	66	133
III.2	Circuit vapeur d'une centrale nucléaire	68	136
IV.1	puissance d'une TAG	87	140
IV.2	cycle à régénération	87	141
IV.3	rendement thermodynamique d'une TAG	87	142
IV.4	TAG brûlant un mélange d'alcanes	88	143
V.1	turboréacteur simple flux	114	145
V.2	turboréacteur avec postcombustion	114	146
V.3	turboréacteur double flux	115	147
V.4	décollage et croisière d'un avion de ligne	116	148

CHAPITRE I

LES TURBINES

1. TURBINE À ACTION

1.1 Généralités

Une turbine à action est constituée d'une série de tuyères fixes et d'une roue en rotation (rotor) travaillant à pression constante. Les tuyères forment le plus souvent une roue constituée d'aubes fixes (stator ou distributeur) dont on peut sectoriser l'alimentation pour faire varier le débit de gaz et par suite la puissance de la turbine.

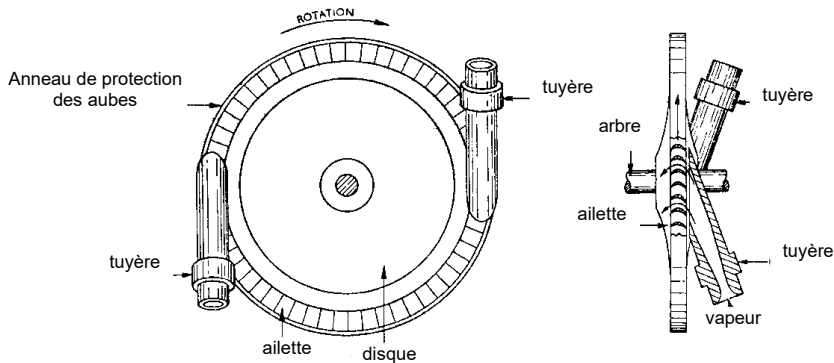


Figure I.1 - turbine de LAVAL (1883) [1]

Étude des tuyères.

Écrivons l'équation de conservation de l'énergie, de l'entrée du stator (indiqué par 0) à la sortie de celui-ci (correspondant à l'entrée dans le rotor et indicé par 1) sachant que dans cette partie statique il n'y a pas d'échanges d'énergie mécanique et thermique en l'absence de frottement:

$$(w_t + q_e)_{01} = \left(h + \frac{c^2}{2} + g z \right)_{01}$$

où l'on a :

- w_t travail de transvasement pour un système ouvert¹
- q_e énergie thermique échangée par le fluide avec l'extérieur

¹ Attention à ne pas confondre le travail w_t (en J/kg) avec la vitesse relative w (en m/s).

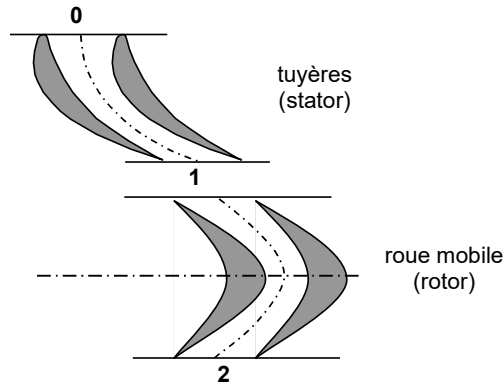
- h enthalpie : $h = u + p \cdot v$, où v est le volume massique (m^3/kg), inverse de la masse volumique $\rho : v = \frac{1}{\rho}$.
- c vitesse moyenne de l'écoulement
- z cote du fluide considéré par rapport à une référence des cotes arbitraires. Cette grandeur est le plus souvent négligée avec les gaz.

Dans une tuyère, qui est une partie statique de la turbomachine, le travail de transvasement (travail des surfaces mobiles) est nul ($w_t=0$). Si de plus l'écoulement est adiabatique ($q_e=0$), on obtient :

$$h + \frac{c^2}{2} + g z = C^{te} \text{ (en J/kg).}$$

Soit le point 0, point générateur, où la vitesse du fluide est supposée nulle et 1 le point de sortie des tuyères.

Figure I.2 –
Éléments de turbine à action.



La conservation de l'énergie dans le stator donne :

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} + g z_0 = h_1 + \frac{c_1^2}{2} + g z_1.$$

En supposant que $c_0 \approx 0$ et en considérant $z_0 = z_1$, on obtient :

$$c_1 = \sqrt{2 (h_0 - h_1)}$$

La chute d'enthalpie, réalisée dans le stator, entraîne une très grande vitesse c_1 du gaz en sortie des tuyères.

Étude du rotor.

On appelle *degré de réaction*, que l'on note σ , le rapport de la chute d'enthalpie dans le rotor sur la chute d'enthalpie totale dans la turbine

Ceci revient à écrire la formule suivante :

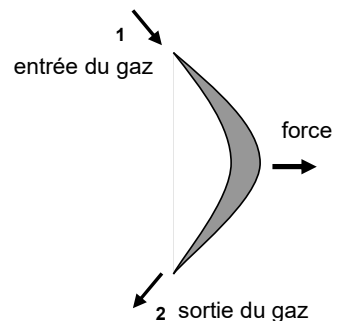


Figure I.3 –Aube mobile.

$$\sigma = \frac{h_1 - h_2}{h_0 - h_2}$$

Hypothèses : l'écoulement y est supposé isentropique (ds=0) et isobare (dp=0) de 1 à 2.

Nous avons $dh = T ds + v dp = 0$

et par suite $h_1 = h_2$

La chute d'enthalpie a lieu entièrement dans le stator.
On en déduit que la valeur du degré de réaction d'une turbine à action est nulle¹

$$\sigma = 0$$

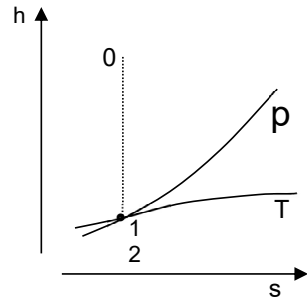


Figure 1.4

Le premier principe de la thermodynamique (conservation de l'énergie) s'écrit ici, puisqu'il n'y a pas d'énergie thermique q_e échangée avec l'environnement (évolution supposée adiabatique réversible) :

$$(w_t + q_e^0)_{12} = \left(h + \frac{c^2}{2} + g.z \right)_{12}^0$$

où $w_{t,12}$ est le travail échangé dans la roue mobile (rotor), travail négatif puisque correspondant à de l'énergie perdue par le fluide².

Soit :

$$-w_{t,12} = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} .$$

L'équation de Bernoulli en écoulement relatif dans la roue mobile s'écrit, en l'absence de frottement :

$$\left(h + \frac{w^2 - u^2}{2} + g.z \right)_{12}^0 = 0$$

On en déduit que : $w_1 = w_2$

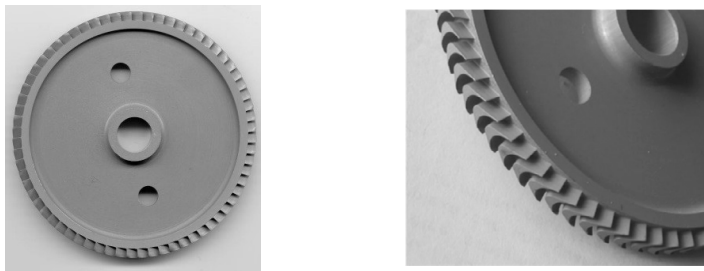


Figure 1.5 – Roue disca à action.

¹ En fluides incompressibles, la turbine à action se nomme turbine Pelton (cf. l'ouvrage "Turbomachines à fluides incompressibles" du même auteur.)

² Cela correspond à la convention habituelle des thermodynamiciens : l'énergie perdue par le fluide est comptée négativement.

Remarque : l'évolution de 1 à 2 étant isobare et adiabatique, la masse volumique ne varie pas ($\rho=C^{te}$).

Le principe de conservation de la masse permet d'écrire : $\dot{m} = \rho S w = C^{te}$.

On en déduit que la section de passage du gaz S est constante puisque $w_1 = w_2 = w \dots$

Donc une hauteur constante des aubes entraîne une largeur de passage constante.

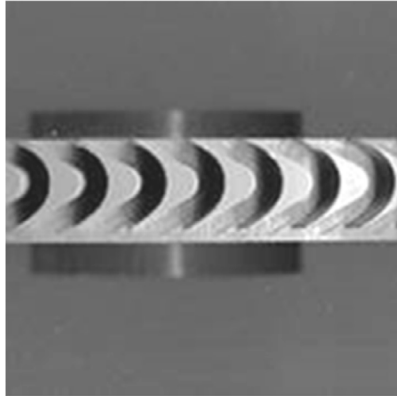


Figure 1.6 – Exemple de roue à action.

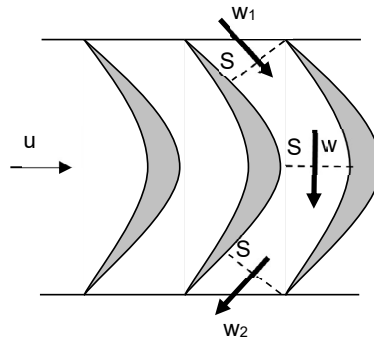


Figure 1.7 – La section de passage S doit rester constante.