

Chapitre I

Introduction

Les turbomachines véhiculent toutes sortes de fluides ; les plus courants sont l'eau et sa vapeur, l'air et l'huile. Ces fluides évoluent entre deux niveaux de pression. Afin d'obtenir des transferts énergétiques conséquents entre le fluide véhiculé et l'arbre de la machine, les vitesses d'écoulement doivent être importantes. Il en résulte principalement que :

- Les écoulements doivent être maîtrisés afin de limiter certaines pertes énergétiques néfastes qui sont intimement liées avec les vitesses d'écoulement,
- Les pressions internes engendrent des contraintes qui imposent, en particulier, le dimensionnement des stators,
- Les contraintes dans les divers éléments mobiles sont souvent très élevées et doivent être déterminées et contrôlées afin de limiter les risques d'incidents.

L'objet de ce livre est d'offrir une vue d'ensemble des problèmes posés lors de la conception des turbomachines, et des solutions technologiques adoptées pour les résoudre. Il sera assez souvent fait référence, afin d'éviter les redites, au précédent livre de la collection Ellipses : Machines à fluides - Principes et fonctionnement.¹

Ce premier chapitre traite des généralités sur la conception des turbomachines ; il ouvre la voie aux développements ultérieurs.

Dans le chapitre II, on rappellera les éléments de mécanique (du solide et des fluides) nécessaires pour la conception des turbomachines.

Le chapitre III fera le point sur les relations de base pour les machines et leur circuit.

1 Généralités sur la conception des turbomachines

Une turbomachine est constituée essentiellement :

- d'une roue : elle permet l'échange d'énergie mécanique entre le fluide et l'arbre.
- d'un stator qui comprend les brides d'aspiration et de refoulement ; il englobe la roue.

¹Les références au livre Ellipses : Machines à fluides - Principes et fonctionnement seront notées [63 p. α], où α est le numéro de la page

- de paliers qui supportent l'arbre de transmission.
- de butées : une butée et une contre-butée assurent le positionnement du rotor dans le stator et encaissent les forces axiales.
- des dispositifs d'étanchéité qui limitent les fuites du fluide de travail.

La conversion d'énergie s'effectue dans les aubages ; elle est directement fonction des grandeurs des vitesses. De grandes vitesses d'écoulement conduisent à des travaux importants échangés sur l'arbre. On est donc conduit à accélérer le fluide dans les conduits d'admission avant qu'il pénètre dans les aubages, puis à ralentir ce fluide dans un diffuseur de manière à retrouver des vitesses acceptables qui n'entraînent pas de pertes de charge trop importantes dans la tuyauterie aval.

La **roue** est l'organe qui mérite a priori le plus d'attention.

2 Géométrie des roues des turbomachines

La forme donnée aux roues des turbomachines conditionne l'allure générale de la machine. Cette forme est essentiellement fonction du débit-volume véhiculé par l'appareil. On trouve des **roues radiales** et **axiales**. Les **roues hélico-centrifuges** s'intercalent, dans cette classification, entre les roues radiales et axiales.

Partons d'une roue centrifuge (de compresseur par exemple) dont la géométrie est connue et qui donne toute satisfaction au constructeur (fig. I-1). Celui-ci est arrivé à force d'expériences, de pragmatisme à cet aspect du mobile. Le savoir-faire d'un autre constructeur pourra le conduire à une autre géométrie qui ne sera néanmoins pas très éloignée de celle proposée en figure I-1.

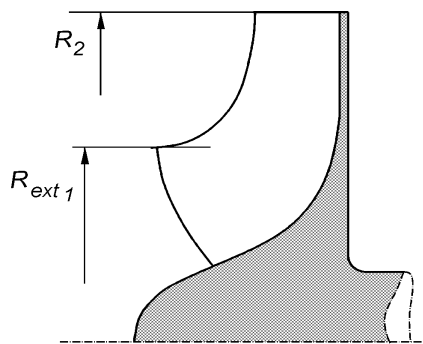


FIG. I-1
Roue centrifuge
de référence

On note en particulier que le rapport r_{ext1}/r_2 , qui est appelé **coefficient d'aspect**, est de l'ordre de 0,6. Le débit-volume traversant cette roue, au point nominal de fonctionnement est q_{v0} . La vitesse de la roue à son rayon de sortie r_2 est U_2 ; cette vitesse périphérique est limitée par les contraintes subies par le métal.

Cherchons à construire une roue qui, à la même vitesse U_2 , passerait un débit-volume qui serait, par exemple, le quart du précédent, soit $q_v = q_{v0}/4$. Elle devrait fournir sensiblement la même pression à l'échappement.

On peut prendre une ébauche de la roue précédente (fig. I-1), et en diminuer les sections de passage de 75% par usinage des aubes (fig. I-2a). Cette géométrie n'est pas satisfaisante.

En tronquant ainsi la veine fluide, on diminue en effet l'allongement de chaque coude formé par les aubes de la roue mobile. On sait [63 p.55] que les pertes, dans ces conditions, vont être augmentées de manière prohibitive, et un essai le confirmerait (fig. VI-28).

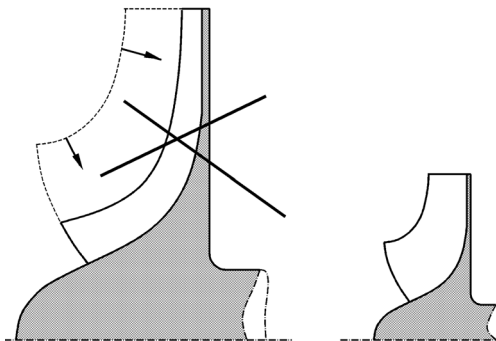
Il est préférable de réaliser une roue en maintenant la même forme géométrique que la précédente de la figure I-1, mais réduite (fig. I-2b). Pour conserver la vitesse périphérique $U_2 = r_2 \cdot \omega$, donc sensiblement la même pression de refoulement, il faut alors augmenter le régime de rotation en fonction du rapport des rayons extérieurs r_2 .

A titre d'exemple, la régime de rotation d'un turbocompresseur de suralimentation de moteur Diesel pour camion est de l'ordre de 15 000 tr/min, alors que celui d'un véhicule léger sera d'environ 150 000 tr/min. La différence de régime de rotation, et de géométrie, est à rechercher dans l'écart de débit-volume entre ces deux applications.

Pour d'autres utilisations, on construit des turbomachines très petites, associées à des débits-volumes très faibles. On trouve ainsi des fraises pour chirurgiens-dentistes tournant à 300.000 tr/min, et même des microturbinnes expérimentales destinées à la génération de puissance électrique pour matériel portable dont le régime de rotation est supérieur à 1 000 000 tr/min.²

Ces régimes de rotation importants (en tr/min) n'ont qu'une valeur subjective due au faible rayon extérieur et ne doivent pas impressionner. C'est la vitesse périphérique U_2 qui participe aux transferts d'énergie.

FIG. I-2 - Réalisation
d'une roue pour $q_v = q_{v0}/4$
a - Tronquage de la roue initiale
b - Nouvelle roue



Pour les applications industrielles, dès que le débit-volume devient trop faible (disons vers $1000 \text{ m}^3/h$), il est plus avantageux d'abandonner les turbomachines pour adopter les techniques bien connues des machines volumétriques [63 p.18].

Si maintenant on cherche à déterminer une turbomachine pour un débit-volume plus grand que le débit-volume initial q_{v0} , soit par exemple $q_{v2} = 2 \cdot q_{v0}$, on débouche sur une autre difficulté.

La roue obtenue, à partir de la roue initiale, ne permet pas un guidage suffisant des filets fluides au rayon extérieur (fig. I-3a). Il n'existe pas une longueur suffisante pour que le fluide circulant près du rayon extérieur puisse échanger correctement de l'énergie avec l'arbre. Par ailleurs, il existerait une trop grande différence de comportement entre ce

²Y.Ribaud, Colloque Microhydrodynamique, Maison de la Mécanique, 2000

filet extérieur et le filet intérieur, ce qui créerait des distorsions trop importantes de l'écoulement.

Pour rétablir un équilibre entre ces filets extrêmes, la solution est d'incliner l'écoulement méridien sur l'axe et donc de proposer une machine hélico-centrifuge (fig. I-3b).

Pour de plus grands débits-volumes, les machines deviennent purement axiales.

On sait que le travail échangé sur l'arbre d'une turbomachine est [63 p.44] :

$$\tau_a = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2} - \frac{W_2^2 - W_1^2}{2} \quad (1 - 1)$$

L'analyse des travaux dans une turbomachine [63 p.76] montre que le rapport de pression sera d'autant plus grand que le travail sur l'arbre sera important.

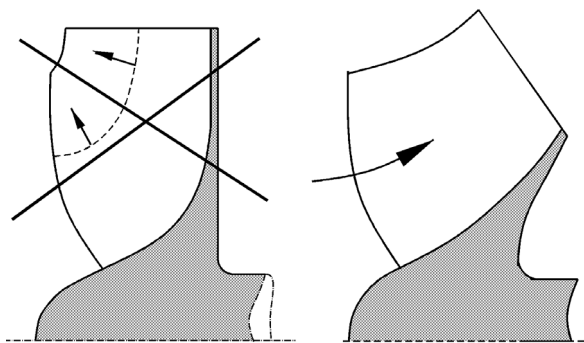


FIG. I-3 - Réalisation d'une roue pour $q_v = 2 \cdot q_{v0}$
a - Roue initiale à section augmentée
b - Roue hélico-centrifuge

Pour les machines axiales, dont on vient de voir qu'elles transportent un débit-volume important, le rapport de pression sera plus faible, car le terme $(U_2^2 - U_1^2)/2$ disparaît. On en déduit (fig. I-4) l'allure de l'évolution du rapport de pression en fonction du débit-volume pour les diverses roues vues précédemment.

On trouverait des résultats analogues pour les pompes et les turbines.

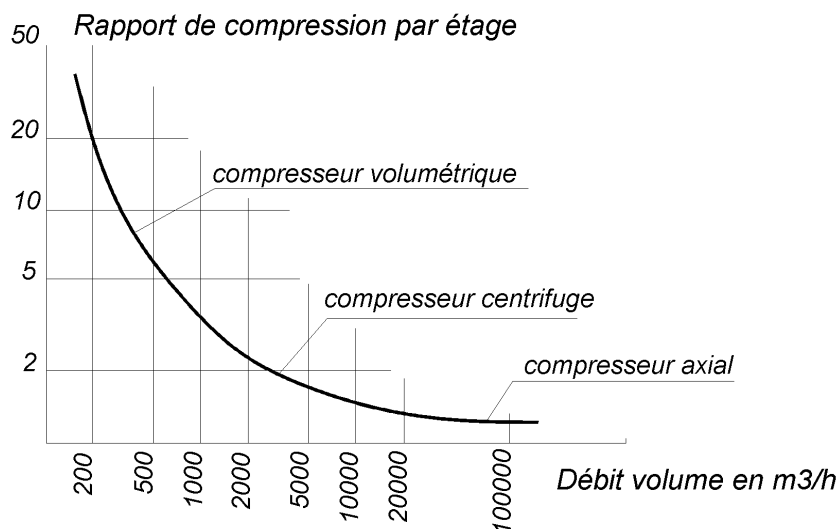


FIG. I-4 - Forme des roues et caractéristiques approchées des machines

3 Turbomachine mono-étage

Il existe de nombreuses dispositions constructives associant les roues et les stators, dans lesquels elles sont placées. Les **machines mono-étages** sont les plus répandues. Pour une machine mono-étage, la roue est très souvent montée en porte-à-faux sur l'arbre. C'est une façon efficace d'isoler la partie fluide du dispositif d'entraînement. L'aspiration est axiale, et le refoulement s'effectue latéralement en sortie de la volute. Ce compresseur est muni de paliers à huile. On verra dans quelles conditions on met des paliers à huile plutôt que des roulements à billes (chapitre VIII).

La poussée hydraulique axiale est dirigée vers l'amont. Le palier droit est muni d'une butée qui encaisse les efforts axiaux et d'une contre-butée qui peut travailler dans certains cas de fonctionnements anormaux, ou au démarrage.

Pour des machines véhiculant du gaz naturel, par exemple, on place des garnitures mécaniques pour éviter les fuites du fluide de travail vers les paliers.

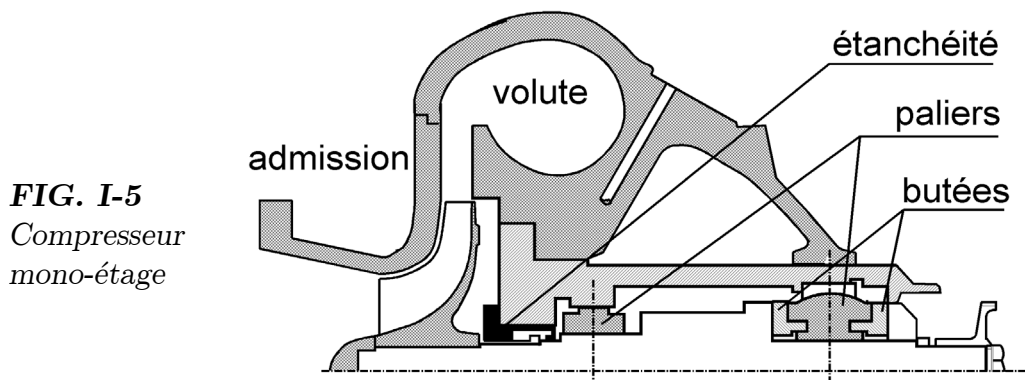


FIG. I-5
Compresseur
mono-étage

4 Turbomachine multicellulaire à double corps.

Les roues sont maintenant disposées entre les paliers.

Elles sont empilées sur l'arbre, ainsi que les diffuseurs et canaux de retour, l'ensemble formant un premier corps que l'on introduit dans un second corps cylindrique. On a alors une machine dite **double corps** acceptant de très fortes pressions.

On retrouve, sur les figures I-5 et I-6, les divers éléments des machines qui seront traités dans la suite du livre :

- L'admission est constituée en figure I-6 d'une pièce (dite **culotte d'admission**) permettant de transformer la section circulaire à la bride d'entrée en une section annulaire devant les aubages. Cette pièce de transformation de section est convergente : le fluide y est accéléré. Les dissipations d'énergie seront généralement faibles dans cet organe, si bien que l'on sera autorisé à tirer profit des relations des fluides parfaits (chap.IV).
- Les aubages fixes et mobiles assurent la conversion de l'énergie (chap.VI).
- L'échappement s'effectue dans une pièce (appelée **culotte d'échappement**) dans laquelle on ralentit au mieux le fluide afin de récupérer de l'énergie cinétique pour la convertir en pression. Cette pièce transforme la section annulaire de

sortie des aubages en section circulaire à la bride de sortie. Ces écoulements ralentis sont le siège de dissipations d'énergie dues à la viscosité du fluide. Les relations des écoulements turbulents devront être appliquées mais il sera prudent, dans l'état actuel des connaissances, de continuer à s'appuyer sur des résultats expérimentaux (chap.V).

- Les paliers, la butée (et contre-butée), les dispositifs d'étanchéité (chap.VIII).

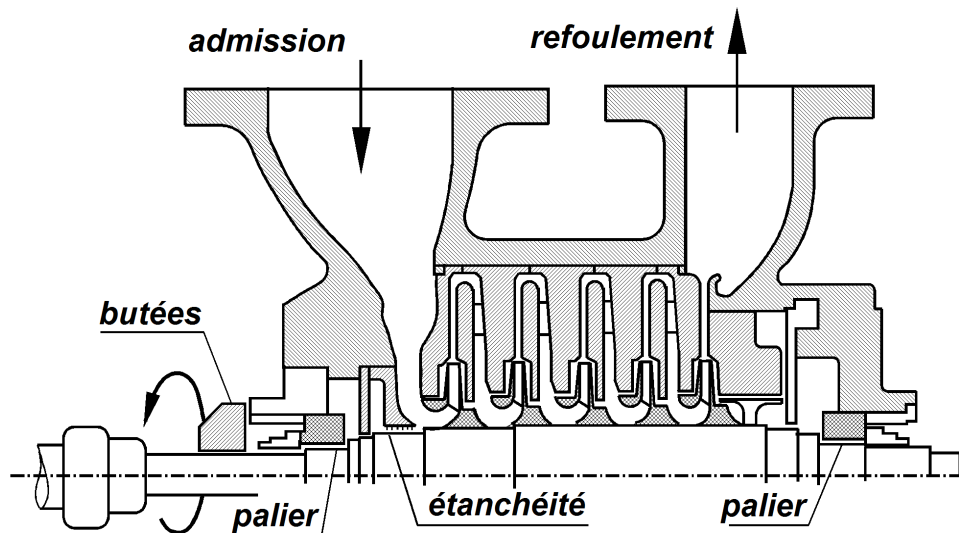


FIG. I-6 - Pompe multicellulaire

Seront vus également :

- les effets instationnaires : même s'ils sont souvent néfastes, on montrera qu'ils sont nécessaires dans la conversion d'énergie (chap.VII),
- les matériaux couramment utilisés (chap.IX),
- les contraintes dans les divers éléments fixes et mobiles (chap.X),
- les vibrations d'aubages (chap.XI),
- les vitesses critiques des arbres (chap.XII).

Normalisation

On ne saurait terminer ce chapitre introductif sans préconiser vivement au lecteur de se tenir informé de la **règlementation** en vigueur et de la **normalisation** en évolution permanente.

La normalisation résulte d'une action volontaire des industriels et des pouvoirs publics pour l'amélioration des produits, des méthodes d'essais et des méthodes de gestion telles que l'assurance qualité.

Elle permet à ce secteur industriel de promouvoir sa technologie sur le territoire national (recueil de normes AFNOR relatif aux turbomachines) ainsi qu'à l'exportation (Normes CEN et ISO).

Chapitre II

Mécanique des solides et des fluides

Éléments pour les applications aux machines

La matière, qui peut apparaître continue à notre échelle, possède en fait une structure complexe discontinue composée d'atomes groupés dans des molécules, car les atomes sont rarement indépendants à l'état libre.

Ce sont donc les molécules, combinaisons d'atomes, qui constituent, mélangées les unes aux autres, tous les corps de la nature. La molécule est la plus petite partie d'un corps pouvant exister à l'état libre. Les **forces de liaison chimique** assurent la réunion des atomes dans les molécules.

1 Différents états de la matière

Ces états (liquide, gaz, solide) sont essentiellement fonction de la température.

La cohésion d'un liquide, par exemple, avec toutes ses molécules dansantes, mais néanmoins agglomérées et maintenues à distance respective les unes des autres est assurée par les **forces d'attraction moléculaire** (fig. II-1b).

Les forces d'attraction moléculaire sont beaucoup plus faibles que les forces de liaison chimique.

Lorsque nous augmentons la température d'un liquide, par exemple, nous augmentons le mouvement.

Chaufons de l'eau, l'**agitation** augmente. Les molécules restent identiques à elles-mêmes mais commencent à se gêner les unes les autres. Le chauffage se poursuivant, l'attraction moléculaire devient insuffisante pour les maintenir ensemble. Elles se dispersent en tous sens et tendent à acquérir de l'indépendance les unes par rapport aux autres. C'est ainsi que la vapeur d'eau est produite. En augmentant la température, les particules s'écartent les unes des autres à cause de l'augmentation du mouvement.

C'est à l'état gazeux que la notion de molécule a son sens le mieux défini, car les molécules ont la liberté de s'y mouvoir séparément ; leur indépendance est totale dans le cas des **gaz parfaits**. Dans le cas des **gaz réels**, la liberté des molécules n'est pas absolue.

Par chauffage, les forces d'interaction moléculaire ont été rompues (fig. II-1c) ; ceci n'a eu aucun effet sur les liaisons interatomiques de chaque molécule.

Ce sont ces molécules qui lors de leur agitation et mouvement incessant bombardent les parois des récipients avant de rebondir en exerçant ainsi des forces fluctuantes que nos sens limités ressentent seulement comme une poussée moyenne.

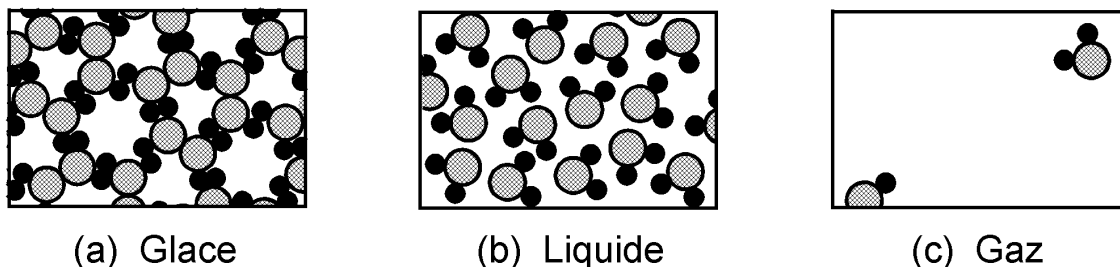


FIG. II-1 - Différents états de l'eau, d'après [22] (grossissement $\simeq 1$ milliard)

Reprenons la goutte d'eau liquide (fig. II-1b), et diminuons maintenant la température. L'agitation va diminuer, les déplacements des molécules y deviennent si limités que des places fixes leur sont pratiquement assignées et que l'édifice demeure rigide. On a ainsi formé le solide glace (fig. II-1a). Dans un solide, les molécules sont arrangées dans une sorte de réseau appelé **réseau cristallin** et elles n'ont pas de positions désordonnées à grande distance comme c'est le cas pour les liquides. La position d'une molécule à l'un des bouts du cristal est déterminée par celle d'autres molécules à des millions de molécules de distance à l'autre bout du cristal.

Le système cristallin de la glace (fig. II-1a) comporte de nombreux vides. Lorsque par échauffement, la structure de la glace se détruit, ces vides peuvent être occupés par des molécules. C'est pourquoi la glace diminue de volume lorsqu'elle fond.

La plupart des substances simples, se dilatent au contraire à la fusion parce que leurs molécules sont étroitement entassées dans le cristal solide et nécessitent à la fusion davantage de place pour s'agiter, tandis qu'une structure lâche s'effondre comme dans le cas de la glace.

Ces trois états de la matière apparaissent bien entendu dans les machines. Nous venons de voir qu'il y a réarrangement des molécules lors de ces changements de phase. On passe d'une organisation très structurée et figée pour le solide à une indépendance quasi-totale des molécules pour le gaz ou la vapeur. Mais on peut noter que chaque molécule reste identique à elle-même lors du passage du solide au liquide, et au gaz ; et inversement.

A l'échelle moléculaire, un solide est un ensemble de molécules dont les positions moyennes constituent un réseau, figure géométrique plus ou moins bien définie.

Les molécules du solide possèdent un mouvement permanent autour de leur position moyenne mais cette position moyenne est fixe.

Au contraire, un fluide est constitué de molécules relativement libres, dont les trajectoires individuelles, parcourues d'autant plus rapidement que la température est élevée, ne sont limitées que par l'existence de parois solides et par les chocs aléatoires qui se produisent entre elles. Ces molécules ne possèdent aucune position moyenne fixe.