

Chapitre 1

Introduction aux Machines Hydrauliques et Pneumatiques

Objectifs du Chapitre

À la fin de ce chapitre, l'étudiant sera capable de :

- Classifier les principales machines hydrauliques et pneumatiques.
- Distinguer les machines à écoulement incompressible de celles à écoulement compressible.
- Comprendre l'évolution historique des principes fondamentaux.
- Identifier les différentes configurations géométriques des turbomachines (axiale, radiale, mixte).
- Différencier une machine hydraulique d'une machine thermique.

1.1 Aspects Historiques

L'utilisation des machines hydrauliques et pneumatiques remonte à l'Antiquité.

- **III^e siècle av. J.-C.** : Roue hydraulique (norias) pour l'irrigation.
- **I^{er} siècle av. J.-C.** : Éolipile de Héron d'Alexandrie, première turbine à vapeur rudimentaire.
- **XVIII^e siècle** : Machine à vapeur de Newcomen puis de Watt, marquant le début de la Révolution Industrielle.
- **XIX^e siècle** :
 - Développement des turbines hydrauliques modernes (Fourneyron, Francis).
 - Théorème de Bernoulli (1738) et travaux d'Euler (1754) sur les turbomachines, établissant les bases théoriques.
- **XX^e siècle** :
 - Développement de la turbine à vapeur (Parsons) et de la turbine à gaz (Whittle, von Ohain).
 - Avancements en aérodynamique et en thermodynamique permettant la conception de compresseurs et turbines haute performance pour l'aviation et la production d'énergie.

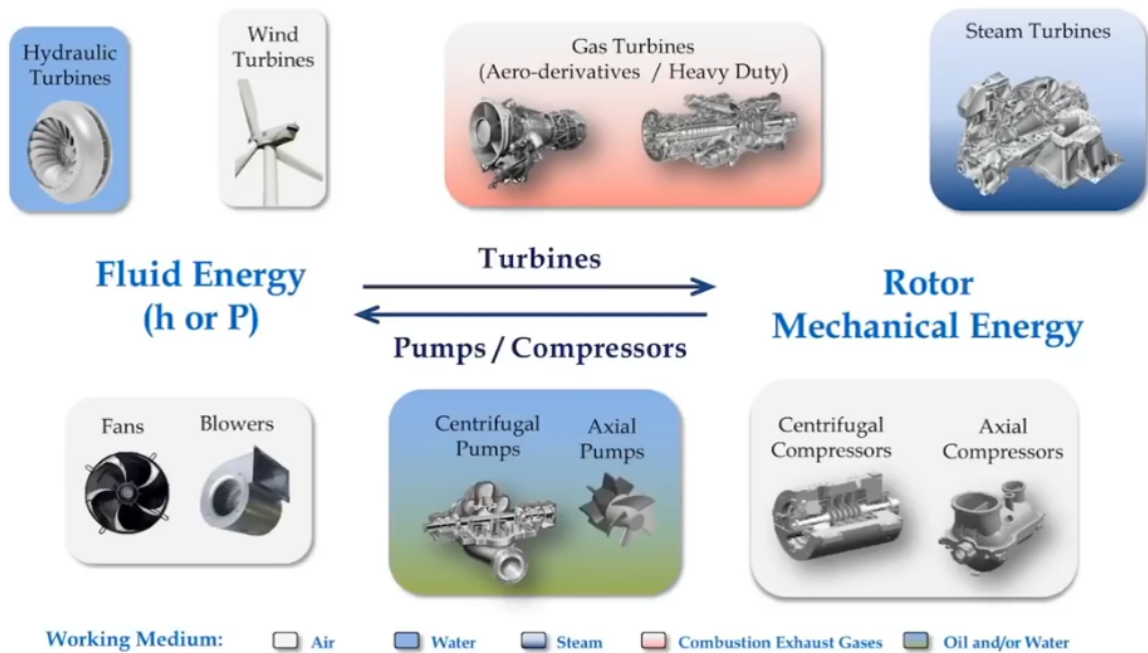


FIGURE 1.1 – Classification Générale des Machines hydrauliques et pneumatiques par manière d'échange de l'énergie avec le fluide.

1.2 Classification Générale des Machines Hydrauliques et Pneumatiques

La première classification fondamentale distingue les machines selon la manière dont elles échangent de l'énergie avec le fluide comme illustré dans la figure 1.1 :

- **Machines Motrices (ou Génératrices)** : Elles convertissent l'énergie du fluide (hydraulique ou pneumatique) en énergie mécanique (généralement sur un arbre en rotation). L'énergie du fluide **diminue**.
 - *Exemples* : Turbines hydrauliques, turbines à vapeur, turbines à gaz, moteurs pneumatiques.
- **Machines Accélératrices (ou Réceptrices)** : Elles fournissent de l'énergie mécanique au fluide pour en augmenter la pression, la vitesse, ou l'enthalpie. L'énergie du fluide **augmente**.
 - *Exemples* : Pompes, compresseurs, ventilateurs.

1.2.1 Par nature du fluide et de l'écoulement

Cette classification est cruciale car elle détermine les lois physiques applicables.

Machines à écoulement incompressible

Le fluide est considéré comme incompressible, c'est-à-dire que sa masse volumique ρ est constante. Cette hypothèse est généralement valable pour les liquides (eau, huile) et pour les gaz à faible variation de pression (vitesse inférieure à environ Mach 0.3).

- **Machines Hydrauliques** : Elles utilisent un liquide comme fluide de travail.
 - *Motrices* : Turbines (Pelton, Francis, Kaplan).

- *Accélératrices* : Pompes (centrifuges, volumétriques).

Machines à écoulement compressible

La compressibilité du fluide (variation de ρ) doit être prise en compte. C'est le cas pour les gaz subissant des variations de pression significatives.

- **Machines Pneumatiques** : Elles utilisent un gaz (généralement de l'air) comme fluide de travail.
 - *Motrices* : Turbines à gaz, moteurs pneumatiques.
 - *Accélératrices* : Compresseurs (volumétriques, dynamiques), ventilateurs (pour de faibles surpressions).

1.3 Utilité et Applications des Machines Hydrauliques et Pneumatiques

Les machines hydrauliques et pneumatiques (turbomachines) sont des éléments absolument essentiels au fonctionnement de la société technologique moderne. Leur utilité s'étend à des domaines aussi variés que critiques, comme le résume la Figure 1.2.

Cette infographie permet de classer les applications en plusieurs grands domaines :

1.3.1 Énergie et Propulsion

Il s'agit des applications les plus exigeantes en termes de puissance et d'efficacité.

- **Production d'Énergie (*Power Generation*)** : Les centrales électriques, qu'elles soient thermiques (à gaz, à vapeur, nucléaires), hydrauliques ou éoliennes, reposent presque entièrement sur des turbomachines. Les turbines convertissent l'énergie des fluides en travail mécanique pour entraîner les générateurs électriques.
- **Moteurs d'Avions (*Jet Engine*)** : Un turboréacteur est une turbomachine complexe comprenant un compresseur (accélératrice), une chambre de combustion et une turbine (motrice). C'est l'application la plus emblématique des machines thermiques à écoulement compressible.
- **Turboalimentation (*Turbocharger*)** : Utilisé dans les moteurs à combustion interne, un turbocompresseur récupère l'énergie des gaz d'échappement (via une turbine) pour comprimer l'air admis (via un compresseur), augmentant ainsi la puissance du moteur.

1.3.2 Sécurité et Industrie

Ces applications mettent en avant la fiabilité et la capacité à générer des débits ou des pressions importants.

- **Lutte contre l'Incendie (*Fire Fighting*)** : Les pompes centrifuges et volumétriques sont le cœur des systèmes de lutte contre l'incendie, des camions de pompiers aux sprinklers, permettant d'acheminer l'eau à haute pression.
- **Puissance Hydraulique (*Hydraulic Power*)** : Les pompes et moteurs hydrauliques transmettent une puissance importante dans un encombrement réduit, essentiels pour le génie civil (pelleteuses), l'aéronautique (trains d'atterrissage) et l'industrie lourde (presses).

1.3.3 Applications Domestiques et de Niche

Ces exemples montrent la miniaturisation et la pénétration des turbomachines dans la vie quotidienne et les technologies de pointe.

- **Ventilation de Refroidissement (*PC Processor Fan*)** : Un petit ventilateur centrifuge ou axial est une turbomachine accélératrice essentielle pour évacuer la chaleur des composants électroniques.
- **Gaz Naturel Liquéfié (*LNG liquefaction*)** : La chaîne de liquéfaction du gaz naturel fait appel à des compresseurs centrifuges de très grande puissance pour comprimer et refroidir le gaz jusqu'à son état liquide.
- **Pompes Domestiques et Industrielles (*Domestic, Electric Submersible Pumps*)** : Des la pompe de circulation de chaudière aux pompes submersibles pour les puits ou le drainage, les turbomachines hydrauliques sont omniprésentes pour la circulation des liquides.

Cette diversité d'applications, allant de la production d'énergie à l'échelle du gigawatt au refroidissement d'un microprocesseur, démontre l'universalité des principes fondamentaux des machines hydrauliques et pneumatiques. La conception de chaque machine, bien que spécifique, s'appuie sur les mêmes lois de la mécanique des fluides et de la thermodynamique que nous allons maintenant approfondir.

1.4 Configurations des Turbomachines par sens de l'écoulement

Les turbomachines sont des machines dynamiques où l'échange d'énergie a lieu grâce à la rotation d'une roue aubagée. Leur classification géométrique est primordiale.

1.4.1 Turbomachines Axiales

Dans une machine axiale, le fluide s'écoule principalement parallèlement à l'axe de rotation de la roue.

- **Caractéristiques** : Grand débit, faible variation de pression par étage.
- **Applications** :
 - *Motrices* : Turbines à vapeur (basses pressions), turbines à gaz (étages de détente).
 - *Accélératrices* : Compresseurs axiaux (turboréacteurs, centrales électriques), ventilateurs axiaux.

1.4.2 Turbomachines Radiales (ou Centrifuges)

Dans une machine radiale, le fluide entre dans la roue dans la direction axiale et en sort dans une direction principalement radiale, comme illustrer dans la figure 1.4, perpendiculaire à l'axe de rotation.

- **Caractéristiques** : Faible à moyen débit, forte variation de pression par étage.
- **Applications** :
 - *Motrices* : Turbines Francis (mixtes), petites turbines à gaz.
 - *Accélératrices* : Pompes centrifuges, compresseurs centrifuges (systèmes de climatisation, suralimentation automobile).

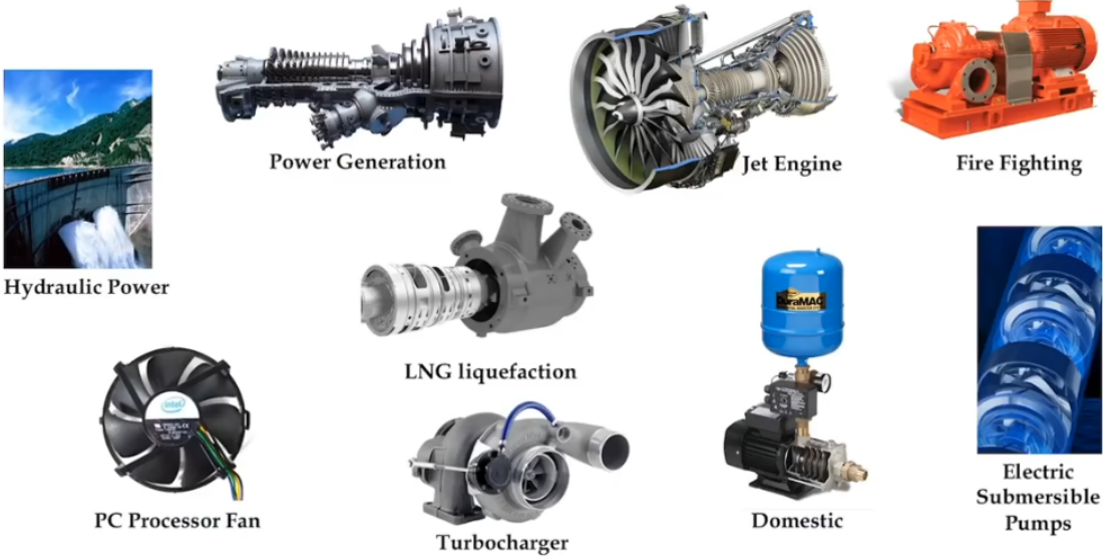


FIGURE 1.2 – Panorama des applications des turbomachines dans différents secteurs.

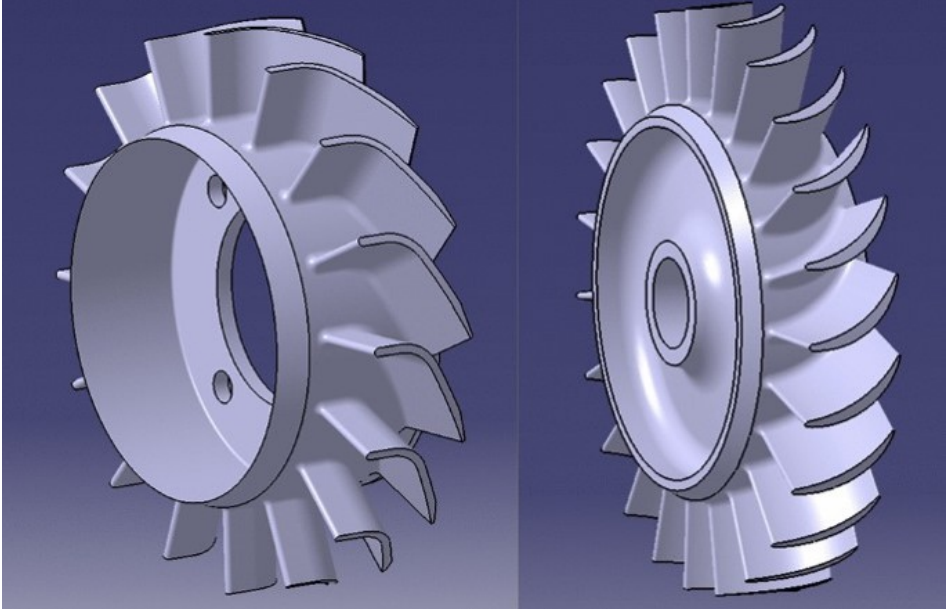


FIGURE 1.3 – Schéma d’une turbomachine axiale. Le fluide s’écoule parallèlement à l’axe de rotation.

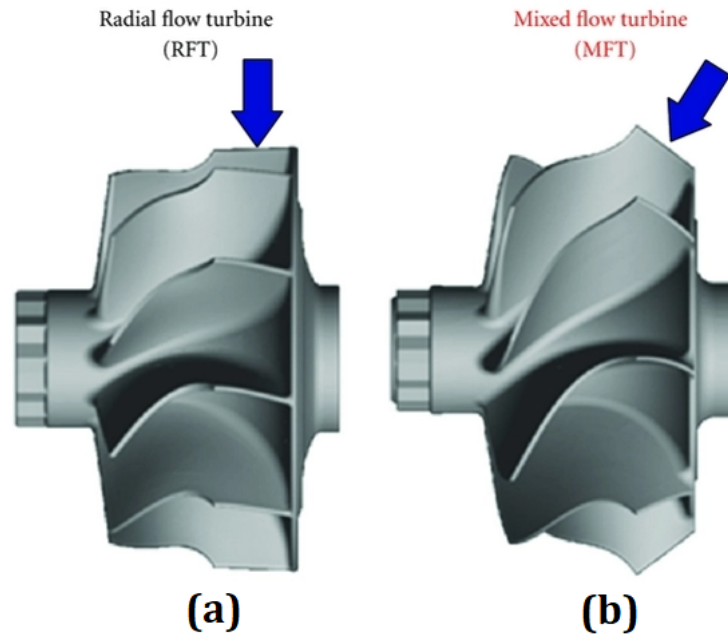


FIGURE 1.4 – Schéma d'une turbomachine (a) radiale, (b) mixte.

1.4.3 Turbomachines Mixtes

Ces machines présentent des caractéristiques des deux configurations précédentes, comme illustrer dans la figure 1.4. L'écoulement a à la fois une composante radiale et axiale significative.

- **Caractéristiques** : Compromis entre le débit des machines axiales et la pression des machines radiales.
- **Applications** :
 - *Motrices* : Turbine Francis (écoulement entrant radial, sortant axial).
 - *Accélératrices* : Pompes et compresseurs diagonaux.

1.5 Machines Hydrauliques vs Machines Thermiques

Il est essentiel de ne pas confondre cette classification avec celle basée sur le fluide.

1.5.1 Machines Hydrauliques

- **Fluide** : Liquide (eau, huile hydraulique).
- **Principes Physiques Dominants** : Mécanique des fluides **incompressible**. L'énergie échangée est principalement sous forme de pression et de vitesse (énergie cinétique). Les effets thermiques sont généralement négligeables.
- **Exemples** : Pompes, turbines hydrauliques, vérins hydrauliques.

1.5.2 Machines Thermiques

- **Fluide** : Gaz (air, gaz de combustion, vapeur) dont la masse volumique varie.

- **Principes Physiques Dominants** : Mécanique des fluides **compressible** et **Thermodynamique**. Les échanges de chaleur (Q) et les variations de température (T) sont fondamentaux. Le travail est lié aux variations d'enthalpie (h).
- **Exemples** :
 - **Moteurs à combustion interne** : Conversion de l'énergie chimique en chaleur puis en travail.
 - **Turbines à gaz** : Combinaison d'un compresseur, d'une chambre de combustion et d'une turbine.
 - **Turbines à vapeur** : Utilisent la détente de la vapeur surchauffée.

Point de Synthèse

Une machine pneumatique (utilisant de l'air) peut être une machine thermique si des échanges de chaleur significatifs ont lieu (ex : turbine à gaz). En revanche, un ventilateur qui ne fait que comprimer légèrement l'air sans apport de chaleur externe est une machine pneumatique, mais son analyse peut souvent se faire avec les équations des fluides incompressibles.

Conclusion et Perspective

Ce chapitre introductif a permis de poser le vocabulaire et les concepts de base pour l'étude des machines hydrauliques et pneumatiques. Nous avons appris à les classer selon plusieurs critères : leur fonction (motrice/accélératrice), la nature de leur écoulement (incompressible/compressible) et leur géométrie (axiale/radiale/mixte). La distinction fondamentale entre les approches hydraulique (fluide incompressible) et thermodynamique (fluide compressible avec échanges de chaleur) a été établie.

Dans les chapitres suivants, nous appliquerons les principes de la mécanique des fluides et de la thermodynamique pour modéliser l'écoulement dans ces machines, en commençant par l'équation fondamentale d'Euler pour les turbomachines.