

I. Introduction

Une des lois fondamentales de la mécanique est le principe de l'action et de la réaction : toute action s'accompagne d'une réaction, égale et directement opposée à l'action. Reste à définir l'action, ce qui est facile pour les corps immobiles, mais moins pour les corps en mouvement, comme c'est le cas des véhicules propulsés par l'action d'un moteur.

L'exemple le plus connu d'action que peut exercer un corps immobile est son poids. Dans ce cas, la réaction du support est une force ou un ensemble de forces qui équilibre le poids, de sorte que le corps n'est ni en mouvement de translation, ni de rotation.

On distingue deux types de réaction : la réaction délivrée par un corps fixe, et celle délivrée par un corps mobile. Les différentes machines qui font l'objet de ce cours s'appuient sur des fluides gazeux pour générer une poussée. L'initiative et donc l'action appartenant au moteur. Le fluide utilisé se met en mouvement et délivre une réaction (une poussée) qui provoque le mouvement du moteur et du véhicule.

La propulsion est un déplacement autre que le simple asservissement aux forces naturelles, que sont les vents, les courants, la pesanteur, l'énergie solaire, le champ magnétique terrestre... Ces forces naturelles sont certes gratuites et leur action est relativement peu bruyante, mais elles sont aléatoires, comme la pesanteur, les courants ou le champ magnétique. Les animaux et les hommes les utilisent pour se déplacer, mais en général l'homme préfère s'affranchir de leur caractère aléatoire ou orienté dans une direction qui ne l'intéresse pas forcément. La propulsion est donc une victoire sur l'insuffisance et le caractère capricieux des forces naturelles.

L'homme et les animaux disposent de leur force musculaire pour se propulser. Toutefois l'homme y a ajouté, depuis deux cents ans environ, des formes d'énergie variées qui confèrent à sa propulsion une gamme de vitesse et de distances chaque jour élargie. Le bois, puis le charbon furent les premières sources d'énergie, mais aujourd'hui on leur préfère les hydrocarbures, l'électricité ou l'atome. La propulsion est alors souvent bruyante, polluante, coûteuse et parfois risquée, mais elle est rapide, toujours disponible et isotrope. L'action peut s'exercer sur un appui fixe chaque fois que c'est possible, c'est-à-dire sur terre, et sur appui mobile quand tout appui fixe fait défaut, dans l'eau profonde ou dans l'air par exemple.

La propulsion sur terre des êtres animés ou des véhicules se fait notamment en utilisant le frottement des corps solides. La roue motrice d'un véhicule tend à repousser vers l'arrière un rail ou la chaussée. Le point d'appui étant fixe et le frottement empêchant (jusqu'à un certain

point) le glissement relatif des surfaces de contact, c'est le véhicule qui, par réaction, est propulsé vers l'avant. Au sein des fluides, le milieu sur lequel le propulseur prend appui n'est pas fixe ; il se dérobe et est mis lui aussi en mouvement. Le fluide absorbe ainsi une partie de l'énergie mise en œuvre, qui est dégradée et rendue inutilisable pour le déplacement, ce qui introduit la notion de rendement de propulsion.

L'eau, au contraire du sol, est incapable de fournir une réaction égale au poids des êtres humains. Si l'on veut se maintenir à la surface, il faut envoyer vers le fond, avec les pieds ou les mains, une certaine quantité d'eau, qui par réaction, fournit le complément à la poussée d'Archimède. La nage, s'effectue donc par réaction. L'action musculaire n'est pas suffisante : il faut aussi que les mouvements d'appuis sur l'eau soient coordonnés.

Les bateaux utilisent la réaction de l'eau pour assurer leur propulsion. Ce phénomène d'appui est très net avec une rame ou une roue à aubes, car les forces mises en jeu sont essentiellement parallèles à la direction moyenne du fluide. Avec une hélice, qui utilise plutôt des forces de portance, perpendiculaires à la direction moyenne du fluide, le phénomène d'appui est moins apparent, en raison du mouvement tourbillonnaire communiqué au fluide, mais c'est bien la projection longitudinale de cette portance qui assure la propulsion. Il faut concevoir une hélice comme une pelle qui, de façon continue, reçoit de l'eau animée d'une certaine vitesse et la projette vers l'arrière sensiblement plus vite. Quelques réalisations récentes remplacent l'hélice par une pompe qui projette l'eau vers l'arrière, dans l'air ou dans l'eau. Le caractère " à réaction " de ce type de propulsion n'est pas différent de celui d'une hélice, mais il est sans doute plus visible. Sur les systèmes les plus modernes, la direction de l'action est variable, dans une certaine mesure, en plus de son intensité. Dans l'air, la poussée d'Archimède de trois ordres de grandeur plus faible que dans l'eau, et c'est déjà tout un problème que d'assurer la sustentation.

Actuellement, et après les déboires des ballons gonflables, la sustentation est le plus souvent assurée par la voilure fixe des avions ou par la voilure tournante des hélicoptères. La propulsion, quelle que soit la méthode employée, est basée sur le principe qui est d'augmenter la quantité de mouvement du fluide en contact avec l'élément propulsif. Dans le cas d'une fusée, les gaz propulsifs ont leur origine à l'intérieur même de l'engin, alors que dans le cas d'un moteur utilisant l'atmosphère comme comburant, c'est-à-dire un moteur aérobic, la poussée provient d'une action sur l'air dans lequel baigne le véhicule.

Les différents systèmes de propulsion dans et en dehors de l'atmosphère peuvent être classés, dans une première approche, en cinq familles :

- les hélices

- les pulsoréacteurs
- les statoréacteurs
- les turboréacteurs
- les moteurs-fusées

Une hélice peut être associée soit à un moteur à pistons, soit à une turbine à gaz, pour former dans ce dernier cas un turbopropulseur.

II. Notions sur la thermodynamique

1. **Système fermé** : c'est un système qui n'échange pas de la matière avec le milieu extérieur. Exp : piston cylindre.
2. **Système ouvert** : c'est un système qui échange la matière et l'énergie avec le milieu extérieur. Exp : compresseur, pompe, turbine ...
3. **Système isolé** : c'est un système qui n'échange ni de la matière ni de l'énergie avec le milieu extérieur.
4. **Système thermiquement isolé** : Un système thermiquement isolé (un système à paroi adiabatique) c'est un système qui n'échange pas de la chaleur avec le milieu extérieur.
5. **Système mécaniquement isolé** : Un système mécaniquement isolé est un système qui n'échange pas du travail avec le milieu extérieur.
6. **Fonction d'état ou variable d'état** : soit la transformation (1-2), une fonction d'état est une fonction qui ne dépend pas du chemin reliant l'état initial 1 à l'état final 2. Exp : la pression p , la température T . La différence de pression et de température sont respectivement :

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad \Delta T = T_1 - T_2$$

7. **Fonction chemin** : soit la transformation (1-2), une fonction chemin est une fonction qui dépend du chemin parcouru par la transformation. Exp le travail W et la chaleur Q .
 $\delta W = W_{1,2}$ et non pas $W_1 - W_2$ et
 $\delta Q = Q_{1,2}$ et non pas $Q_1 - Q_2$
8. **Variable extensive** : est une variable qui varie avec la variation du volume. Exp : le volume V .
9. **Variable intensive** : est une variable qui ne varie pas avec la variation du volume. Exp : la pression P et la température T
10. **Fluide parfait** : est un fluide idéal (fluide non visqueux $\mu = 0$).
11. **Gaz parfait** : l'équation d'état d'un gaz parfait est :

$$PV = nRT \text{ avec } R[\text{J/mol.K}]$$

$$PV = mrT \text{ avec } r[J/Kg.K]$$

$$PV = mrT \Rightarrow P \frac{V}{m} = rT ; Pv = rT \Rightarrow \frac{P}{\rho} = rT \text{ avec } v = \frac{1}{\rho}$$

12. **Transformation isobare** : est une transformation a pression constante. La transformation 1-2 est dite isobare si $P_1 = P_2$.
13. **Transformation isochore** : est une transformation à volume constant. La transformation 1-2 est dite isochore si $V_1 = V_2$.
14. **Transformation isotherme** : est une transformation à température constante. La transformation 1-2 est dite isotherme si $T_1 = T_2$.
15. **Transformation réversible** : une transformation 1-2 est dite réversible si la transformation inverse 2-1 suit le même chemin.

16. **Transformation adiabatique** : est une transformation sans échange de chaleur avec le milieu extérieur. Soit la transformation adiabatique 1-2 :

$$Q_{1,2} = 0 \text{ et}$$

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \text{ relation de Mayer avec } \gamma = 1.4$$

17. **Transformation isentropique** : est une transformation adiabatique réversible (adiabatique sans perte).

18. **Premier principe de la thermodynamique** :

- a. **Premier principe pour un système fermé** :

$$\Delta u_{1,2} = W_{1,2} + Q_{1,2} = mC_v(T_2 - T_1) \text{-----}[J]$$

$$\Delta u_{1,2} = W_{1,2} + Q_{1,2} = C_v(T_2 - T_1) \text{-----}[J/Kg]$$

Pour une transformation à pression constante :

$$Q_{1,2} = mC_p(T_2 - T_1)$$

Pour une transformation à température constante :

$$\Delta u_{1,2} = 0 \text{ donc } : W_{1,2} = -Q_{1,2}$$

Pour une transformation à volume constant :

$$W_{1,2} = 0 \Rightarrow \Delta u_{1,2} = Q_{1,2}$$

- b. **Premier principe pour un système ouvert (équation d'énergie)**

$$Q + W = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p \quad J/Kg$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m}(\Delta h + \Delta E_c + \Delta E_p) \quad J/s$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m}[C_p \Delta T + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1)]$$