

Frédéric Ayela

Thermodynamique

Applications aux cycles moteurs
et récepteurs

Cours, exercices
et problèmes commentés



Chapitre 1

NOTIONS GÉNÉRALES

1. Force, puissance et énergie

Il est indispensable d'assimiler la signification de ces trois notions ainsi que les relations qui les lient. Dans le système d'unités international SI, la force s'exprime en Newton (N), la puissance en Watt (W) et l'énergie en Joule (J). On retiendra que :

$$\text{Énergie (J)} = \text{Puissance (W)} \cdot \text{Durée (s)}$$

c'est-à-dire que $1\text{J} = 1\text{ W}\cdot\text{s}$. Cette relation se retient facilement en considérant, de façon non conventionnelle, que l'unité « économique » de l'énergie serait l'euro. En effet, on parle de *facture énergétique*, *coût énergétique*, *gaspillage d'énergie*, expressions qui n'ont pas leur pareil avec la puissance. Ainsi, la quantité d'énergie associée à une opération quelconque augmente proportionnellement à la puissance mise en jeu et à la durée de l'opération.

Prenons l'exemple d'un sèche-cheveux affichant une puissance électrique de 800 W ; après une minute de fonctionnement, l'énergie électrique consommée (et facturée au consommateur) sera de 48000 J. En passant à un mode où la puissance égale 1200 W, une énergie de 72000 J = 72 kJ serait alors consommée sur une durée d'une minute ; il faudrait réduire la durée d'utilisation de l'appareil à 40 secondes pour retrouver la valeur de 48000 J. En dehors de sa période d'utilisation, le sèche-cheveux conservera sa puissance nominale mais sa consommation d'énergie sera nulle.

Prenons maintenant l'exemple du chauffage d'une habitation en hiver. Une fois la température de confort établie à l'intérieur, le rôle du système de chauffage sera de délivrer la puissance calorifique nécessaire pour maintenir constant l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur. Pour une valeur de puissance établie, la facture de chauffage (c'est-à-dire la consommation d'énergie calorifique) sera d'autant plus élevée que la durée de la saison de chauffage aura été longue. Pour une durée donnée, la facture sera également proportionnelle à la puissance calorifique requise. Cette puissance calorifique est directement proportionnelle à l'écart de température entre l'extérieur et l'intérieur (plus la température extérieure moyenne sera basse, plus cette puissance sera élevée) ; elle dépend naturellement aussi de la qualité de l'isolation du bâtiment, et sera d'autant plus faible que celui-ci sera bien isolé.

Considérons comme dernier exemple le métabolisme du corps humain. Maintenir à 37°C notre organisme requiert de l'énergie puisée dans les aliments. Les apports

nutritionnels quotidiens nécessaires pour un adulte n'effectuant pas d'exercice physique sont d'environ 10 MJ. Le lecteur vérifiera que cela correspond à une puissance d'environ 115 W. Toute activité supplémentaire amenant à développer une puissance physique supplémentaire (sport, travail de force) s'accompagnera alors d'une augmentation de la consommation énergétique, et nécessitera ainsi des apports nutritionnels supplémentaires.

L'unité de l'énergie dans le système international est le Joule, mais une valeur de 1 J représente une quantité très faible, comme l'illustrent les exemples numériques précédents. D'autres unités, plus adaptées aux situations qu'elles décrivent, sont également utilisées. Le kilowatt heure (**kWh**) est le produit d'une puissance de 1 kW délivrée pendant une durée de 1 heure. On a donc $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$. En 2023, la consommation de 1 kWh est facturée plein tarif 0,206 € par EDF. La calorie (**1 cal = 4,18 J**) est une autre unité de l'énergie. Elle correspond à la quantité d'énergie calorifique qu'il faut fournir à pression atmosphérique et température ambiante à 1 gramme d'eau pour élever sa température de 1 °C.

Remarque : l'abus de langage pratiqué quelquefois lors de l'expression d'une vitesse en km/h (prononcé oralement à tort kilomètres - heure au lieu de kilomètre par heure) peut entraîner une confusion similaire avec l'énergie exprimée en kWh et calculée, à tort, comme un rapport kW/h ; le rapport d'une puissance divisée par une durée n'a aucun sens physique, d'ailleurs un tel rapport tendrait vers l'infini en considérant une durée égale à zéro.

Une expérience simple qui peut être faite par un groupe d'étudiants est la suivante : demander à deux étudiants de soulever, avec une vitesse constante, un de leur camarade initialement allongé sur le sol et de le déposer sur une table dont le plateau est à 1 mètre du sol. Une quatrième personne chronométrera la durée de l'opération. On pourra refaire l'expérience en demandant aux porteurs de diminuer ou d'augmenter la vitesse d'élévation. Cette expérience illustre les liens entre énergie, puissance et force. Typiquement, la durée de l'opération est légèrement inférieure à trois secondes. Il s'agit maintenant de formaliser cette expérience.

On note m la masse de l'étudiant qui est soulevé à vitesse constante ; l'absence d'accélération signifie que le bilan des forces extérieures qu'il subit est égal à zéro ; les frottements de l'air étant négligeables ici, ces forces se résument à son poids mg , dirigé de haut en bas, et à la force F exercée par ses deux camarades, dirigée de bas en haut parallèlement au déplacement, et donc égale à mg . Le travail de cette force sur une longueur h égale à la hauteur de la table vaut mgh , et représente l'énergie mécanique dépensée par les deux opérateurs. On remarque qu'elle représente aussi l'énergie potentielle possédée alors par l'étudiant « cobaye » une fois installé sur la table. Pour $m = 70 \text{ kg}$, $h = 1 \text{ m}$ et avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, on a $mgh = 687 \text{ J}$. On remarquera que cette valeur énergétique ne dépend pas de la durée de l'expérience. Pourtant, les étudiants « porteurs » éprouveront plus de difficulté à effectuer leur tâche sur une durée brève que sur une durée longue ; cela est relié à la puissance. Pour une durée de 2,8 secondes, on peut calculer la puissance mécanique délivrée par le binôme comme égale à $\mathcal{P} = 687/2,8 = 245 \text{ W}$

ce qui correspond à 123 W par personne. Augmenter la durée de l'expérience diminuera d'autant la puissance requise. La puissance maximale que peut délivrer un individu étant limitée, on comprend pourquoi la durée de l'expérience ne pourra pas être réduite sous une valeur limite.

Dans cet exemple, l'énergie requise et la hauteur du déplacement sont des valeurs fixées par les conditions initiales (poids du « cobaye » et hauteur de la table), mais la puissance \mathcal{P} et la durée t de l'expérience peuvent varier. La vitesse d'élévation est $v = h/t$ et on peut récrire que $\mathcal{P} = mgh/t = mg.v = F.v$. Ainsi :

$$\text{Puissance (W)} = \text{Force (N)} \cdot \text{Vitesse (m/s)}$$

Attention, cette relation n'a de sens que pour un problème où un objet est en mouvement.

L'expérience qui vient d'être présentée est une variante de celle à l'origine de l'introduction du cheval-vapeur (**cv**) comme unité alternative de puissance. Un cheval-vapeur est la puissance que délivrerait un cheval harnaché pour, à l'aide d'une poulie, élever à vitesse constante une masse de 75 kg d'une hauteur de 1 mètre en une seconde. On calcule ainsi que **1 ch = 735,5 W**. Il ne faut pas confondre cette unité avec l'unité anglo-saxonne du « *horse power* » pour laquelle **1 hp = 746 W**. Cette différence provient entre autres de la différence entre les unités SI et celles usuellement employées dans les pays anglo-saxons.

Exercice commenté : Puissance mécanique délivrée par un cycliste grim pant un col.

Calculer la puissance mécanique délivrée par un cycliste de masse totale (cycliste plus vélo) 80 kg grim pant un col de pente 10% à la vitesse constante de 20 km/h. Calculer en kcal l'énergie dépensée après une demi-heure d'effort.

Le lecteur a tous les éléments permettant de répondre à ces questions. La difficulté de cet exercice réside dans la nécessité de formaliser des hypothèses simplificatrices et de mettre en équation les indications de l'énoncé. Il est conseillé de concrétiser ce problème par un schéma, en réalisant que la situation présentée correspond plus aux performances d'un coureur professionnel qu'à celles d'un coureur amateur.

On appelle α l'angle que fait la route par rapport à l'horizontale (cf. figure 1-1). Pour 100 mètres parcourus le cycliste s'élève de 10 mètres, donc $\sin\alpha = 0,1$. Pourquoi le cycliste fait-il des efforts ? Pour compenser les frottements qu'il subit (dûs à l'air et au contact avec la route) et qui augmentent avec la vitesse, et pour compenser la contribution de son poids. Dans ce problème, la principale hypothèse simplificatrice sera de négliger le rôle des frottements, ce qui est assez raisonnable pour une vitesse de 20 km/h. Le cycliste avance à vitesse constante donc la force que délivre le cycliste parallèlement à la route n'a pour finalité que de compenser la composante de son poids orientée parallèlement à la route dans le sens de la pente descendante. Le schéma de la figure 1-1 montre que cette composante égale $mg.\sin\alpha$. Naturellement dans la situation extrême $\alpha = 0$ (route plate) où seuls interviennent les frottements de l'air et du sol, on trouve que la contribution du

le poids du cycliste n'intervient pas. Ainsi on écrit que la puissance $P = mg \cdot \sin\alpha \cdot v$ et l'application numérique fournit (en prenant soin d'exprimer la vitesse en m/s !) $P = 436 \text{ W}$. L'énergie dépensée en une demi-heure (1800 s) vaut $784,8 \text{ kJ} = 188 \text{ kcal}$.

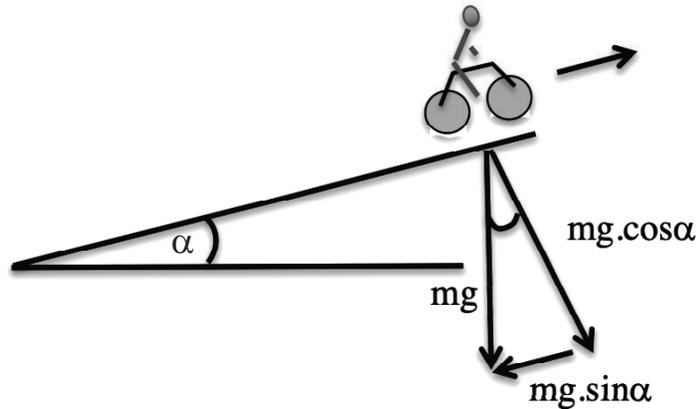


Figure 1.1.

2. Paramètres thermodynamiques

Un **système thermodynamique** est destiné à distinguer un système du milieu extérieur afin de pouvoir y faire un bilan. Cette distinction est arbitraire c'est-à-dire que pour une situation physique donnée, l'utilisateur peut définir différents systèmes qui auront différentes caractéristiques. Considérons par exemple l'illustration de la figure 1-2. Une certaine quantité de gaz est contenue dans le volume intérieur d'un cylindre dont la base est fermée et dont l'autre extrémité est obstruée par un piston étanche, mobile sans frottement. On définit le système thermodynamique comme étant le gaz emprisonné dans le cylindre. Quelle que soit la position du piston, **la quantité de matière du système reste constante** : c'est la définition d'un **système fermé**.

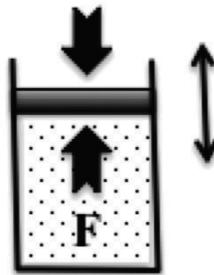


Figure 1.2.

Considérons maintenant la situation représentée sur la figure 1-3 où un opérateur dépose régulièrement des masses sur un piston surmontant un réservoir de liquide. Si on définit comme système thermodynamique le liquide dans le réservoir, on a un système fermé ; si par contre on définit comme système le liquide, le piston et les masses posées dessus (délimité par les pointillés sur la figure 1-3), la **quantité de matière de ce système varie** : c'est la définition d'un **système ouvert**.

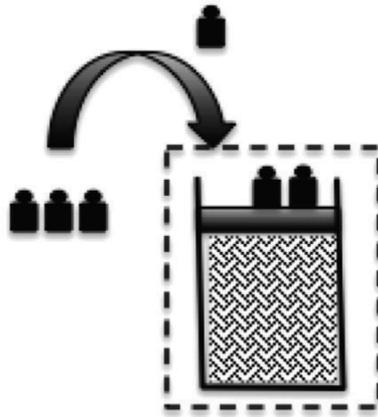


Figure 1-3.

Revenons au système fermé de la figure 1-2. Les molécules du système ont un mouvement brownien, c'est-à-dire qu'elles sont animées d'un mouvement aléatoire ; elles subissent des chocs entre elles et avec les parois du cylindre. La résultante de ces chocs est une force qui s'exerce sur les parois rigides et sur le piston. Intéressons-nous uniquement à la force F exercée par le gaz du système sur la paroi intérieure du piston et orientée perpendiculairement à sa surface. Si le piston reste sur une position d'équilibre, c'est qu'une force d'égale intensité et opposée, due au milieu extérieur, s'exerce sur sa face extérieure. La force interne F dépend :

- du nombre de molécules ; celui-ci étant très élevé pour un système macroscopique, on l'exprime par le nombre de moles de gaz n (1 mole = $\mathcal{N} = 6,02 \cdot 10^{23}$ constituants) ;
- de la fréquence des chocs ; elle est déterminée par le volume V du cylindre (exprimé en m^3 dans les unités SI ; on rappelle que 1 litre = $1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$). Plus le volume est faible, plus la probabilité qu'une molécule donnée vienne heurter le piston est grande ;
- de l'énergie cinétique des molécules ; la température absolue T (exprimée en degrés Kelvin K dans le système international) est la transcription de l'énergie cinétique moyenne de l'ensemble des molécules ;
- de la surface S du piston (m^2). Dans le cas d'une surface totale plane, on écrit que $F = P.S$ où P est la pression. Si tel n'est pas le cas, on écrit cette relation au niveau

d'un élément de surface dS suffisamment petit pour être assimilé à un plan et l'élément de force correspondant $dF = P \cdot dS$ (figure 1-4). La pression est donc un paramètre homogène à des N/m^2 (force par unité de surface). En unités SI elle est également exprimée en Pascal (Pa) ; $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$.

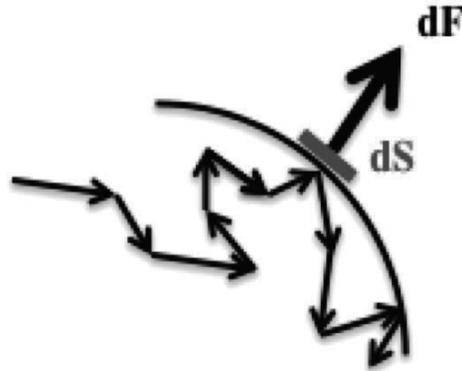


Figure 1-4.

Ainsi, un phénomène **macroscopique** (la force résultante F s'exerçant sur le piston) conséquence de phénomènes **microscopiques** (l'agitation moléculaire) peut se décrire par plusieurs **paramètres**, nécessairement interdépendants. Les paramètres P , V et T caractérisent l'**état thermodynamique** du système gazeux. D'un point de vue plus général, on dit qu'un système est à l'**équilibre thermodynamique** si **un changement d'état d'équilibre spontané est impossible**. Les paramètres thermodynamiques se classent en deux catégories : les paramètres **intensifs** qui ne dépendent pas du volume du système considéré ; les paramètres **extensifs** qui dépendent du volume considéré. Dans l'exemple du système gazeux fermé à l'équilibre de la figure 1-2, pression et température restent identiques quel que soit le volume d'un sous-système considéré ; ce sont des paramètres intensifs. Le nombre de moles et le volume sont quant à eux des paramètres extensifs.

D'autres paramètres dérivent de ceux cités précédemment ; la masse volumique ρ (kg/m^3) d'un élément représente sa masse ramenée à l'unité de volume, tandis que le volume spécifique v (m^3/kg) représente le volume occupé par son unité de masse. On a $\rho = 1/v$. Dans les problèmes où ces paramètres interviennent, il est souvent astucieux de privilégier l'utilisation de v plutôt que celle de ρ . On remarquera que la masse volumique et le volume spécifique, rapports de deux paramètres extensifs, sont des paramètres intensifs.

On a souligné que les paramètres décrivant l'état d'équilibre thermodynamique du système étaient nécessairement reliés. L'expression de cette relation sera une fonction des variables P , V , n et T . Pour un système quelconque où la pression et le volume ne seraient pas forcément les paramètres les plus adaptés, cette relation

ferait intervenir d'autres paramètres que P et V mais conserverait néanmoins toujours la température T.

3. La pression

Les informations météorologiques, l'entretien des pneumatiques d'un véhicule pour ne citer que ces deux exemples, font couramment intervenir la pression. Introduite au paragraphe précédent dans l'étude d'un système gazeux, la pression s'applique aussi à l'étude des liquides (réseau d'eau, tension artérielle). On parle généralement de la pression d'un fluide, ce dernier étant en phase liquide ou gazeuse¹.

Nous avons directement relié la pression à une force exercée par un fluide sur une surface. Cette analyse n'a été établie qu'au milieu du XVII^e siècle pour expliquer le phénomène suivant qui à l'époque était paradoxal.

Pour pomper de l'eau d'un niveau inférieur à un niveau supérieur, on a schématisé le montage de la figure 1-5 où un piston étanche, initialement au niveau d'un plan d'eau, monte dans le corps du cylindre.

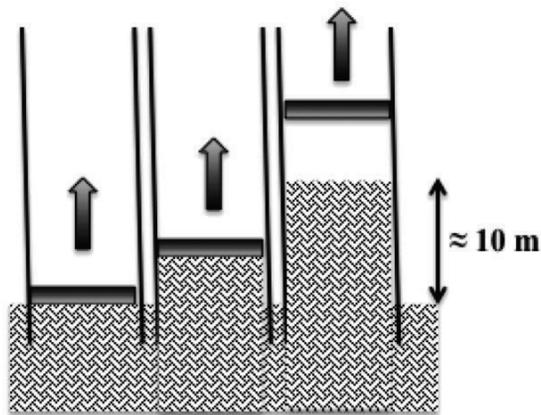


Figure 1-5.

L'eau comble le vide créé par le mouvement du piston, et ceci jusqu'à une hauteur d'environ dix mètres. Lors de la poursuite du mouvement ascensionnel du piston, l'eau reste à une hauteur constante. C'est ce dernier point qui restait mystérieux jusqu'en 1640, date où il était admis que « *la nature a horreur du vide* ». Horreur du vide qui expliquerait que l'eau suive le piston dans sa course au début de sa montée, mais qui reste sans réponse quant à l'arrêt de sa progression à dix mètres de hauteur. Il s'agit du problème des puisatiers, contemporain de la renaissance italienne et des constructions qui lui furent associées. Galilée (1564 -

¹ Notons dès à présent que pour un fluide incompressible, son volume reste constant suite à l'application d'une force de pression ; mais sa pression varie.

1642) ne trouva pas d'explication convaincante à ce paradoxe. Baliani (1582 - 1666) comprit le premier le rôle joué par l'atmosphère terrestre, et que l'on avait un problème d'équilibre de forces. Au niveau du plan d'eau, le poids de la colonne d'eau (isolée de l'extérieur par le vide² créé par le piston) est compensé par le poids de l'atmosphère extérieure, poids qui s'exerce perpendiculairement à la surface libre de l'eau³ (cf. figure 1-6). Peu après la mort de Galilée, ce fut son élève Torricelli (1608 - 1647) qui valida l'hypothèse de Baliani, en ayant l'idée d'utiliser un liquide beaucoup plus dense que l'eau : le mercure (Hg), dénommé alors « vif argent » en raison de sa couleur, et qui est 13,6 fois plus dense que l'eau. Le poids exercé sur une surface donnée par une colonne d'eau de 10,3 mètres de hauteur est identique à celui d'une colonne de mercure de 760 mm de hauteur. Et en effet, le vide créé au-dessus d'une colonne de mercure maintient celle-ci à 760 mm de hauteur, et cette hauteur fluctue d'un jour à l'autre, traduisant les variations de la pression de l'atmosphère. C'est le principe du baromètre.

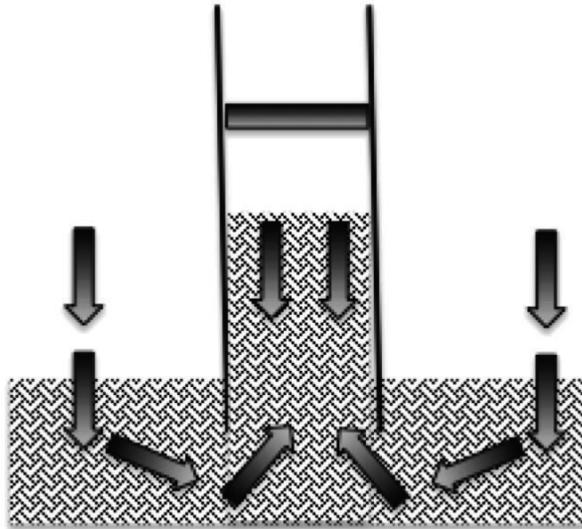


Figure 1-6.

L'étape déterminante dans la compréhension de la pression fut l'œuvre de Pascal (1623 - 1662). Pascal était convaincu que les idées de Torricelli étaient justes. Si la hauteur de la colonne de mercure dépendait de la force pressante exercée par l'épaisseur de l'atmosphère, cette hauteur devrait diminuer avec l'altitude à laquelle on la mesure en raison de la diminution de la masse d'air exerçant cette force (*'il y a beaucoup plus d'air qui pèse au pied de la montagne qu'en son*

² Rigoureusement cet espace est rempli de vapeur d'eau, mais son rôle est ici négligeable.

³ Ce faisant il comprend (sans le savoir) que les fluides incompressibles transmettent la pression (et non la force).