

FLUORESCIENCES

Thermo- dynamique

Thermo

Nicolas Vernier

Catherine Even-Beaudoin

2^e édition

DUNOD

Conception graphique de la couverture : Hokus Pokus Créations
Création graphique de la maquette intérieure : Marse

© Dunod, 2020, 2024
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-087411-8

Table des matières

	Les selfies des auteurs	V
	Avant-propos	1
CHAPITRE 1	PRESSIION ET TEMPÉRATURE	2
	1 La pression	4
	2 La température	9
	3 Température et physique statistique	14
CHAPITRE 2	LE PREMIER PRINCIPE : CONSERVATION DE L'ÉNERGIE	22
	1 Premier principe de la thermodynamique	24
	2 La capacité thermique	32
	3 L'enthalpie	37
CHAPITRE 3	LE SECOND PRINCIPE : COEFFICIENTS THERMODYNAMIQUES	46
	1 Évolution et équilibre	48
	2 Comment calculer une variation d'entropie ?	54
	3 Coefficients thermodynamiques, propriétés	60
CHAPITRE 4	LES PROPRIÉTÉS DU CORPS PUR	72
	1 Diagramme de phases du corps pur	74
	2 Coexistence de plusieurs phases	77
	3 Chaleur latente de changement d'état	83
CHAPITRE 5	LE POTENTIEL CHIMIQUE ET LES MÉLANGES	94
	1 Une notion très utile : le potentiel chimique	96
	2 Le potentiel chimique d'un composé dans un mélange	100
	3 L'équilibre biphasique d'un mélange	103
	4 L'osmose	106
	5 Le cas de l'air humide	108
CHAPITRE 6	LES MOTEURS THERMIQUES	116
	1 Fondements de la science des machines thermiques	118
	2 Étude de quelques moteurs	128
CHAPITRE 7	RÉFRIGÉRATION, CLIMATISATION ET POMPE À CHALEUR	140
	1 Les grands principes de la réfrigération	142
	2 Le cycle de Rankine	145
	3 Les autres méthodes de réfrigération	153
	4 Le froid extrême	156

LE CLIMAT TERRESTRE	166
1 Le climat terrestre	168
2 Le changement climatique actuel	174
Corrigés	182
Bibliographie	207
Index	208
Crédits iconographiques	210

Les selfies des auteurs

Nicolas Vernier



Je suis maître de conférences à l'université Paris Saclay. J'aime tout spécialement la thermodynamique pour son challenge intellectuel très spécifique. Par ailleurs, je fais des recherches expérimentales en magnétisme (physique du solide et des couches minces) au laboratoire Lumière, Matière et Interfaces à Orsay.

Catherine Even-Beaudoin



Je suis maître de conférences à l'université Paris Saclay. Je me suis intéressée à la physique dès l'adolescence. J'ai développé un goût particulier pour la thermodynamique, que j'enseigne depuis une dizaine d'années, en mettant l'accent sur ses applications concrètes actuelles. Je fais également de la recherche dans le domaine de la biophysique au laboratoire de Physique des Solides à Orsay.

Avant-propos

De nombreux phénomènes naturels sont expliqués par la thermodynamique : l'eau qui gèle dans les caniveaux, la formation des nuages... Beaucoup d'objets impactant notre quotidien fonctionnent également à partir des principes de la thermodynamique : voitures (à essence ou Diesel), réfrigérateurs, centrales thermiques de production d'électricité par exemple.

Reprenons l'exemple des voitures : leur principe de fonctionnement a été trouvé dès la deuxième moitié du XIX^e siècle. La thermodynamique s'est fortement développée à cette époque, à travers ses applications. On peut dire qu'elle est avec l'électromagnétisme la science qui a permis l'explosion technique de la révolution industrielle, et a posé les principes scientifiques de base qui régissent toujours la société d'aujourd'hui.

Mais qu'est-ce que la thermodynamique ? Selon le Larousse, c'est « la science qui étudie les propriétés des systèmes où interviennent les notions de température et de chaleur ». Elle adopte un point de vue *macroscopique*, contrairement à la physique statistique qui est venue a posteriori justifier ses principes par des considérations microscopiques. Dans le cadre de cet ouvrage, nous nous limiterons la plupart du temps au point de vue macroscopique. De plus, nous adopterons un point de vue essentiellement physique et laisserons de côté la thermodynamique des réactions chimiques.

Ce livre présente ainsi les bases de la thermodynamique physique, correspondant à un niveau scientifique de première ou de deuxième année de licence. Il comporte huit chapitres. Les trois premiers chapitres donnent les bases : notion de pression et de température (chapitre 1), premier et second principes (chapitres 2 et 3). Les chapitres suivants sont des applications de ces principes à des situations particulières : changements d'état d'un corps pur (chapitre 4), machines thermiques (chapitres 6 et 7), étude du climat terrestre (chapitre 8). Le chapitre 5 aborde la notion importante de potentiel chimique, très utile aussi pour la chimie, et ses nombreuses applications.

Vu le contexte environnemental actuel (chapitre 8), une utilisation optimale de l'énergie est nécessaire, et c'est précisément un des points forts de la thermodynamique, qui est donc non seulement la science du passé et du présent, mais également celle de l'avenir.

Les auteurs remercient chaleureusement Abdelkader Anakkar, Emmanuel Beaudoin, François-Marie Bréon, Hanna Enriquez, Alain Mazaud, Jean-Marcel Rax et Emmanuelle Rio, pour leur relecture attentive et constructive de cet ouvrage.

Pression et température

Pour bien démarrer

1. La plus basse température accessible est :
 - ☐ a. $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 - ☐ b. $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 - ☐ c. $-45\text{ }^{\circ}\text{F}$;
 - ☐ d. $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Une température peut se mesurer avec :
 - ☐ a. un voltmètre ;
 - ☐ b. un manomètre ;
 - ☐ c. un teslamètre ;
 - ☐ d. un thermomètre.
3. La force pressante qui s'exerce sur un objet plongé dans un fluide dépend :
 - ☐ a. de la rugosité de la surface de l'objet ;
 - ☐ b. du volume de l'objet ;
 - ☐ c. de la pression du fluide en contact ;
 - ☐ d. de la viscosité du fluide en contact.
4. Dans le système international, une pression s'exprime en :
 - ☐ a. pascal (symbole : Pa) ;
 - ☐ b. $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$;
 - ☐ c. $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$;
 - ☐ d. tesla (symbole : T).

Réponses p. 182

Objectifs de ce chapitre

- Définir la pression dans le cadre de la mécanique, via la notion de force.
- Maîtriser la loi de l'hydrostatique dans le cas des fluides incompressibles.
- Introduire la température, paramètre central de la thermodynamique.
- Revoir la loi des gaz parfaits.
- Donner un sens concret à la température via la physique statistique.

CHAPITRE

1

La pression sous l'eau varie avec la profondeur. Les bulles de gaz qui s'échappent de la bouche des plongeurs remontent vers la surface à cause de la poussée d'Archimède et grossissent au fur et à mesure de la remontée en fonction de la pression locale selon les propriétés des gaz.



La thermodynamique a commencé à se développer grâce à la compréhension de deux paramètres fondamentaux : la pression et la température. Le premier paramètre permet de calculer les forces s'exerçant sur un objet donné dans un fluide ou sur les parois fictives qui limitent un volume de fluide. À partir de là, il devient possible de calculer le travail de ces forces ainsi que les échanges d'énergie associés. La température est un paramètre encore plus central, elle caractérise l'énergie emmagasinée dans un système sous forme microscopique.

1 La pression



■ *Evangelista Torricelli (1608-1647) est un physicien et mathématicien italien. Il est notamment connu pour l'invention du baromètre, et ses travaux sur la pression.*



■ *Blaise Pascal (1623-1662) est un physicien, mathématicien et philosophe français. Il a notamment prouvé, avec son « expérience des liquides », l'existence d'une pression atmosphérique.*

Figure 1.1

Force de pression infinitésimale s'exerçant sur un élément de surface dS .

Historiquement, le premier paramètre bien compris a été la pression grâce aux expériences et aux réflexions de Evangelista Torricelli et de Blaise Pascal.

1.1 Forces de pression

Selon le principe d'Archimède, tout corps plongé dans un fluide subit une poussée égale en amplitude au poids du volume de fluide déplacé. Ceci est un résultat global, le point d'application de cette force n'apparaît pas clairement, ce qui est normal car il n'est pas bien défini : il s'agit d'une résultante constituée par la somme de forces infinitésimales s'exerçant en une multitude de points. Ces forces sont dues aux chocs à l'échelle microscopique des molécules du fluide sur les parois du corps.

En effet, en pratique, les forces de pression s'exerçant sur un objet donné nécessitent un contact direct entre cet objet et les éléments extérieurs. Ce contact a lieu à l'interface entre l'objet et l'extérieur, c'est-à-dire au niveau de la surface qui délimite son volume.

Il s'agit donc de déterminer les forces locales : l'idée est simple, la force qui s'exerce sur un petit élément dS de cette surface est normale au plan tangent local et son amplitude proportionnelle à la surface dS .

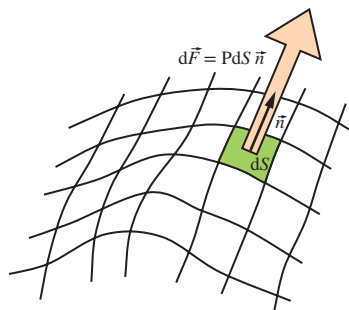
Définition

Le paramètre de proportionnalité entre la force appliquée à un élément de surface dS et l'aire de cet élément est appelé la **pression**. Elle est notée en général P . C'est une quantité toujours positive dans les situations couramment rencontrées. La force engendrée par la pression s'écrit :

$$d\vec{F} = P dS \vec{n}$$

où $\vec{n}$ est le vecteur unitaire orthogonal à l'élément de surface, dirigé vers l'intérieur du volume délimité par la surface globale.

Dans le système international, l'unité de pression est le pascal, l'abréviation est « Pa ». Le Pascal peut s'exprimer à l'aide des unités de base : $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.



1.2 Équilibre mécanique d'un fluide, poussée d'Archimède

En pratique, l'un des fondements de la thermodynamique est la détermination de l'état d'équilibre d'un système. La première condition d'équilibre est de nature