

Styles et traditions de présentation en thermodynamique

Utilisation pour une analyse critique de l'enseignement en CPGE

Résumé : Nous mettons en évidence plusieurs traditions de présentation de la thermodynamique. Notre travail interroge la manière dont la thermodynamique est actuellement transposée didactiquement en CPGE, à la lumière des traditions de présentation. Nous montrons que la discipline, telle qu'enseignée en CPGE, s'inscrit dans la tradition issue de Prigogine. Cependant, les raisons qui ont motivé l'émergence et le développement de la tradition de Prigogine ne se retrouvent pas dans l'enseignement actuel de CPGE. Il en résulte un décalage qui conduit à une perte d'efficacité du concept d'entropie.

Mots-clé : Thermodynamique, entropie, enseignement supérieur, style de présentation, histoire de l'enseignement.

Introduction

La thermodynamique est un domaine de la physique ayant émergé au XIX^e siècle dans le contexte socio-économique de la seconde révolution industrielle. Cette discipline, dont les applications se portaient alors naturellement sur des problématiques techniques ayant trait à l'amélioration des machines de l'époque (machine à vapeur, locomotives, pompes, etc.), s'est progressivement développée et ses applications se sont étendues et diversifiées. Aujourd'hui, il n'existe pas « une » thermodynamique mais « plusieurs », chacune correspondant à des traditions historiques de présentation différentes, intimement liées à des modifications impulsées par les auteurs pour des raisons diverses. Nous commençons d'abord par repérer et caractériser différentes traditions de présentation de la thermodynamique à l'aide d'un outil, le « style de présentation ». Nous montrons ensuite en quoi cette notion de tradition de présentation fournit un outil d'analyse critique pour répondre à la problématique énoncée ci-dessous.

En quoi la formulation du second principe de la thermodynamique en CPGE et notamment l'enseignement du concept d'entropie est-elle susceptible de conduire à une perte d'efficacité de ce concept ?

Notion de style de présentation

Nous avons constitué un corpus d'environ 120 sources. La porosité des frontières nécessite par précaution d'envisager la sélection la plus large possible tant sur le type de sources (articles, ouvrages), la date de publication (de 1850 à aujourd'hui, 1850 étant une date à laquelle la thermodynamique se formalise), le lieu de publication (principalement France, Allemagne, Angleterre, USA), ainsi que sur les disciplines (physique, chimie, mathématiques). Pour classer ces sources, nous avons choisi de nous limiter à la manière dont elles traitent du concept d'entropie. Il s'agit d'un concept absolument central dans tout exposé de thermodynamique, auquel aucun ouvrage ne déroge. Ce choix nous a conduit à choisir trois critères de classification (notés A, B et C), chacun associé à deux modalités (notées 1 et 2).

A. Formulation de la loi associée à l'entropie :

1. Formulation centrée sur la notion de transformation (la loi sur l'entropie dit quelque chose de la variation d'entropie d'un système subissant une transformation entre deux états.)

2. Formulation centrée sur la notion d'état d'équilibre (la loi sur l'entropie établit un lien entre l'équilibre d'un système et son entropie)

B. Approche introductive associée à l'entropie :

1. Approche non-entropique (l'existence et les propriétés de l'entropie sont déduites d'énoncés qui ne portent pas sur l'entropie)
2. Approche entropique (l'existence et les propriétés de l'entropie sont postulées)

C. Mode d'exposition de la théorie

1. Mode d'exposition non-axiomatique (opposé au mode d'exposition axiomatique)
2. Mode d'exposition axiomatique (l'exposé est inspiré des présentations rencontrées en mathématiques, où la rigueur, la structure logique déductive et le statut des énoncés (axiome, théorème, définition) sont mis en avant).

Ces catégories permettent d'associer à chaque source du corpus un triplet (A1 B2 C1 par exemple) que nous qualifions de « style de présentation ». Il y a en tout $2^3=8$ styles de présentation possibles, mais seulement six d'entre eux ont été rencontrés dans l'ensemble des sources analysées.

Notion de tradition de présentation

La notion de style de présentation revêt un caractère statique, systématique. Les sources ne sont pas considérées dans leur historicité : il n'est pas question de tenir compte du contexte de publication pour attribuer un certain style de présentation à une source. À l'inverse, une tradition de présentation désigne une lignée d'auteurs partageant des choix de présentation similaires. La notion de tradition est rattachée à celle d'héritage, de transmission, ce qui se traduit notamment par l'existence de réseaux de citations entre auteurs. Nous avons focalisé notre attention sur l'émergence historique des traditions de présentation, en repérant notamment les auteurs pionniers qui, généralement insatisfaits des exposés existants de la thermodynamique à leur époque ont choisi de s'en démarquer en présentant la théorie d'une autre manière. L'apparition d'une nouvelle tradition de présentation traduit cette volonté de démarcation. Quel lien existe-t-il entre un style et une tradition de présentation ? L'émergence d'une nouvelle tradition de présentation s'accompagne généralement d'un changement de style de présentation, que nous qualifierons de « mutation ». Toute mutation dans le style de présentation n'est pas anodine : elle est un marqueur de cette volonté de démarcation par rapport à une tradition existante. Et c'est ce qui légitime la pertinence des trois critères de classification A, B et C choisis pour définir un style de présentation. Un style de présentation ne suffit généralement pas à caractériser une seule tradition de présentation. Mais inversement, une tradition de présentation adopte généralement un style particulier, comme nous le mentionnons dans le Tableau 1. Par exemple, les deux traditions issues de Clausius d'une part et issue de Born d'autre part, bien qu'elles présentent le même style, se distinguent de par la démarche de leurs auteurs. Les styles de présentations peuvent donc être utilisés comme des guides pour repérer et caractériser des traditions de présentation. Ce travail nous a conduit à la caractérisation de sept traditions de présentation (Tableau 1) qui répondent aux questions suivantes. À quand dater leur émergence historique ? À quels auteurs sont-ils associés ? Quelle démarche a motivé les auteurs à se démarquer ou à s'inscrire dans des traditions existantes ? Ces traditions sont-elles associées à un style de présentation particulier ?

| Style | Tradition issue de... | Caractéristiques | Auteurs postérieurs |
|----------|-----------------------|--|--|
| A1 B1 C1 | Clausius (1879) | Démarche fidèle aux travaux pionniers de Clausius et Thomson. L'existence et les propriétés de l'entropie sont démontrées à partir des énoncés de Clausius et de Kelvin-Planck par des raisonnements sur des machines cycliques. | Poincaré (1892) Planck (1903) Bruhat (1968) Zemansky (1968) |
| A1 B1 C2 | Carathéodory (1909) | Volonté de fonder la thermodynamique sur des bases mathématiques plus rigoureuses. | Landsberg (1956) Giles (1964) Lieb (1999) |
| A1 B1 C1 | Born (1921) | Volonté de rendre accessible le travail de Carathéodory à la communauté des physiciens. | Chandrasekhar (1939) Wilson (1957) |
| A1 B2 C1 | Prigogine (1950) | Volonté d'étendre le formalisme de la thermodynamique aux réactions chimiques. | Pérez (1997) |
| A2 B2 C1 | Callen (1960) | Volonté de centrer l'objectif de la thermodynamique sur la détermination de l'état d'équilibre d'un système en évolution. | Diu & al. (2007) |
| A2 B1 C1 | Duhem (1911) | Volonté de réduire toute la physique à la thermodynamique en fondant la physique entière sur la notion de potentiel thermodynamique. | Pas d'auteurs postérieurs |
| A2 B2 C2 | Tisza (1961) | Volonté d'établir une axiomatisation de la théorie thermodynamique centrée sur l'équilibre d'un système, de manière analogue à la démarche de Carathéodory. | Pas d'auteurs postérieurs |

Tableau 1 : Les sept traditions de présentation caractérisées. En **surligné**, la mutation de style constatée.

Analyse critique de la thermodynamique en CPGE

La notion de tradition de présentation fournit un outil d'analyse critique que nous appliquons à présent à l'enseignement actuel de la thermodynamique en CPGE. Nous nous limitons ici à la classe de PCSI, où le programme de physique-chimie est le plus fourni. La PCSI est la classe où le second principe de la thermodynamique et le concept d'entropie sont abordés pour la première fois. Nous nous restreignons à une lecture des programmes, complétée par une étude de trois manuels scolaires aux éditions Bréal (2017), Dunod (2016) et Pearson (2013). Notre étude montre qu'il existe un décalage entre la tradition issue de Prigogine et les applications étudiées en CPGE. Les lois de la thermodynamique enseignées en CPGE sont identiques à celles introduites par Prigogine. Elles mobilisent les concepts d'entropie créée/échangée, qui sont propres à la tradition issue de Prigogine. Il n'y a pas de doute là-dessus : aucune autre tradition ne mobilise ces concepts. La tradition issue de Prigogine a cependant été détournée de ses raisons d'être, des raisons qui lui ont donné naissance et des applications pour lesquelles elle a été conçue à l'origine (voir Tableau 1). Prigogine (1950) avait en effet la volonté d'étendre le formalisme thermodynamique à la description des réactions chimiques, d'où une restriction à des systèmes uniquement siège de réactions chimiques, en équilibre mécanique et thermique (P et T constantes). En PCSI, on ne s'intéresse qu'à des systèmes physiques (gaz, liquides, transitions de phases, etc.) où il ne se déroule aucune réaction chimique, et où uniquement la température et la pression peuvent varier. Strictement l'inverse de Prigogine donc. Ce détournement de la tradition issue de Prigogine conduit à une perte d'efficacité, de

performativité, et finalement d'utilité, du concept d'entropie. Pour le montrer, nous avons listé et analysé les différentes tâches dans les ouvrages (au sens de la Théorie Anthropologique du Didactique) mobilisant le premier et le second principe. Cette analyse nous a conduit à la conclusion que les tâches associées au second principe ne contiennent presque aucune tâche de nature prédictive, à l'inverse de celles associées au premier principe. On en reste principalement à de la vérification de cohérence du formalisme. L'entropie n'est généralement utilisée que pour établir des bilans et l'entropie créée S_c n'est calculée qu'avec la perspective de comparer le résultat à « ce à quoi on aurait pu s'attendre sans calcul », ce qui permet de bien « vérifier » a posteriori que l'irréversibilité s'accompagne bien d'une création d'entropie. La notion d'entropie est donc associée à des tâches de nature tautologique et nous faisons l'hypothèse que cette perte d'efficacité peut conduire à des difficultés d'apprentissage, hypothèse que nous entreprenons de tester dans un avenir proche sur un public constitué d'enseignants et d'étudiants en CPGE.

Bibliographie

- Born, M. (1921). Kritische Bemerkungen zur traditionellen Darstellung der Thermodynamik. *Physikalische Zeitschrift*, XXII:218–224,249–254,282–286.
- Bruhat, G. (1968). *Thermodynamique*. Masson & Cie, sixième édition. 6e édition.
- Bréal (2017). *Super manuel de physique*. Bréal.
- Callen, H. (1960). *Thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- Carathéodory, C. (1909). Untersuchungen über die Grundlagen der Thermodynamik. *Mathematische Annalen*, 355–386.
- Chandrasekhar, S. (1939). *An introduction to the study of stellar structure*. The University of Chicago Press.
- Clausius, R. (1879). *The Mechanical Theory of Heat*. MacMillan and co.
- Diu, B., Guthmann, C., Lederer, D. et Roulet, B. (2007). *Thermodynamique*. Hermann.
- Dunod (2016). *Physique tout-en-un*. Dunod.
- Giles, R. (1964). *Mathematical foundations of thermodynamics*. Pergamon press.
- Landsberg (1956). Foundations of Thermodynamics. *Reviews of Modern Physics*, 28(4):363–392.
- Lieb, E. H. (1999). The physics and mathematics of the second law of thermodynamics. *Physics Reports*, 310(1):1–96. Second auteur : Yngvason, Jakob.
- Planck, M. (1903). *Treatise on thermodynamics*. Longmans, Green and co. 2e édition.
- Poincaré, H. (1892). *Thermodynamique*. Gauthier-Villars.
- Prigogine, I. (1950). *Traité de thermodynamique. Tome I : Thermodynamique chimique*. Gauthier-Villars. 2e édition (1ère édition : 1944). Second auteur : Defay, R.
- Pérez, J.-P. (1997). *Thermodynamique*. Dunod. 2e édition (1ère édition : 1993).
- Wilson, A. H. (1957). *Thermodynamics and statistical mechanics*. Cambridge University Press.
- Zemansky, M. (1968). *Heat and thermodynamics*. The McGraw-Hill Companies. 5e édition (1ère édition : 1937)