

# LE CONCEPT DE SYSTEME EN THERMODYNAMIQUE

Maxime Nagels<sup>1</sup>, Abdelkader Anakkar<sup>1</sup>, Abdelhalim Guelzim<sup>1</sup>  
nagels.maxime@gmail.com

Adresse : Université de Lille ; Faculté des Sciences et Technologies, Département de physique, Bâtiment P5-bis, 59655 Villeneuve d'Ascq

**RESUME** : Une réflexion a semblé nécessaire sur les différentes définitions proposées dans la littérature pour la notion de système thermodynamique. A partir d'une analyse détaillée de 45 ouvrages du supérieur, nous avons parcouru la diversité des définitions proposées et montré les difficultés que cela engendre notamment sur l'appréhension des grandeurs énergie, matière et transferts d'énergie. Des exemples variés sont donnés pour étayer les propos. Quelques questions et perspectives sont proposées.

**Mots clés** : thermodynamique, système, énergie, frontière, transfert d'énergie, matière, enseignement secondaire, enseignement supérieur, programme, manuels scolaires.

## 1. INTRODUCTION

La première fois où l'on rencontre la notion de système dans les enseignements de physique est sans doute la mécanique. Le système est désigné, la plupart du temps, comme l'objet d'étude, possédant une masse et ramené parfois à un point dans des cas simples. Ce corps ou cet objet est donc un système physique dont on étudie le mouvement par rapport à un référentiel d'étude, sous l'action de forces extérieures agissant sur lui et engendrant ou non un mouvement.

Est-ce que le système désigne la même notion en thermodynamique ? Certains auteurs en sont convaincus : « *en Thermodynamique, comme en Mécanique, on désigne sous le nom de système un ensemble de corps étudié en tenant, éventuellement, compte des actions exercées par le milieu extérieur.* » [1].

En thermodynamique pourtant, il semble moins évident de se représenter ne serait-ce que par la pensée un système comme 'objet d'étude'. En effet, si l'on souhaite étudier un gaz se trouvant dans un récipient, l'esprit a davantage de difficultés à le visualiser que de concevoir un pavé de masse  $m$  posé sur un plan incliné, dont on ferait une étude mécanique.

Ainsi, le concept de système en thermodynamique a ceci de complexe : la représentation que l'esprit donne à cet 'objet' d'étude. Il va de soi que la transcription littérale de ce concept qui paraît déjà absent pour l'esprit, est donc une difficulté importante.

Mais, choisir un système c'est aussi définir l'état du système. En thermodynamique cela revient à déterminer des grandeurs « mesurables » ou « repérables » comme la pression, le volume ou la température. Cet état caractérise le système mais permet aussi de déterminer son évolution.

## 2. LA NOTION DE SYSTEME THERMODYNAMIQUE DANS LES PROGRAMMES

### 2.1. Le système en classes préparatoires aux grandes écoles

Une phrase que l'on retrouve presque régulièrement dans les ouvrages, souligne l'intérêt et la difficulté de choisir un système dans les problèmes de thermodynamique : *Il est important de définir de manière très précise le système étudié.*

Cette définition semble primordiale a priori dans la résolution de problèmes thermodynamiques. Il est donc légitime de s'attendre à avoir une définition précise du concept de système dans les programmes.

Le concept de système en thermodynamique dans les sections de CPGE reste absent jusqu'à la réforme de 1968. Aussi, dans le programme des classes préparatoires C1 (actuelles BCPST), il apparaît dans la partie *Chaleur-thermodynamique* : « *Concepts fondamentaux : notion d'état d'un système* ».

Cette première référence à la notion de système, en préambule à toute observation thermodynamique, montre que le système est le point de départ à toute étude. Néanmoins, le programme ne propose qu'une description de celui-ci à travers son état. Le programme souligne également que l'état de ce système est décrit par des « *caractères macroscopique et statistique* » le distinguant *a fortiori* du système mécanique.

Avec la réforme de 1995, l'introduction du concept de système en thermodynamique est à nouveau bouleversée. Alors que le programme de 1987 encourageait à multiplier le nombre d'exemples pour introduire ce concept, c'est désormais le gaz parfait qui sera l'exemple de référence : « *L'étude du gaz parfait servira à introduire le vocabulaire de la thermodynamique sans formalisme excessif : système homogène, pression, température, variable extensive, variable intensive, équation d'état, fonction d'état* ». Néanmoins, le programme ainsi élaboré propose toujours d'introduire la « *notion de système. États d'un système* ». En outre, il y est introduit les adjectifs « *ouverts et fermés* » absents du précédent programme [2]. Cette présentation restera valable jusqu'à la réforme de 2014.

### 2.2. Le système dans les programmes du secondaire

Le mot système apparaît également distinctement dans les programmes du secondaire, comme celui

de première D de 1979 : « *exemples de non-conservation de l'énergie mécanique totale d'un système* », ou encore dans le programme de première S de 1994 : « *analyse des échanges énergétiques concernant un système donné* ». Si, encore une fois, aucune définition n'est clairement exprimée dans les programmes, on peut lire dans le livret d'accompagnement « *Savoirs faire théoriques. Définir et identifier : un système, un système isolé ou non* ». Ainsi, définir un système et le qualifier est un préambule nécessaire à tout bilan énergétique. Si le concept de système n'est pas détaillé dans le programme, il est suggéré à l'enseignant d'évaluer l'acquisition de cette notion par l'élève.

En 2001, le programme de première S fait référence au système dans la partie « *travail mécanique et énergie* ». On peut ainsi lire « *à tout système dans un état donné, on peut associer une grandeur appelée « énergie ». L'énergie d'un système isolé est constante* ». Cette référence au système est développée dans le document d'accompagnement : « *Pour appliquer la conservation de l'énergie sous cette forme, il faut donc identifier les systèmes avec lesquels le système choisi initialement interagit, puis considérer un système plus général qui les contient tous et qui pourra être considéré comme isolé. Cette gymnastique est difficile pour un élève, et il n'est du reste pas indispensable de s'y livrer [...] en mettant l'accent sur le transfert d'énergie, le programme fait l'économie de la recherche d'un système isolé.* »

Cette proposition soulève deux remarques :

- Le système est un concept clairement utilisé dans les programmes mais aucune proposition n'est faite pour le définir. Pourtant, comme le souligne le document, le choix du système est nécessaire pour réaliser des bilans énergétiques.

- La proposition suggère que si on réunit un ensemble de systèmes qui interagissent entre eux, alors l'ensemble est considéré comme un système isolé.

Par ailleurs, les auteurs précisent que le premier principe de la thermodynamique présenté sous la forme de la conservation de l'énergie, sera préférentiellement remplacé par son application à des systèmes réalisant des transferts d'énergie. Ainsi, le choix du système est un aspect fondamental pour l'application d'un principe.

Pourtant, si le système est désigné et représenté comme un convertisseur d'énergie effectuant des transferts avec d'autres systèmes, il n'est en aucun cas clairement dit quel est le contenu de cet « *objet d'étude* ». Voyons comment cette notion est abordée dans les manuels scolaires.

### 3. LES DEFINITIONS DE LA NOTION DE SYSTEME

#### 3.1. Méthodologie d'analyse

Explicitement présentée dans un chapitre dans l'ouvrage de Kastler en 1962 [3], la référence au système en thermodynamique est abordée de manière succincte dans quelques ouvrages des décennies précé-

entes. A titre d'exemple, on peut citer comme références historiques, l'ouvrage de Duhem « *l'état d'un système sera en thermodynamique défini par un certain nombre de variables* » [4] ; Ou encore, Bouasse qui emploie le mot système, sans le définir pour introduire le principe d'équivalence en 1913 : « *Soit un système qui passe d'un état à un état infiniment voisin...* » [5]. On peut constater que ce mot n'était d'ailleurs pas employé dans la première édition de son ouvrage de 1907 [6].

Notre contribution est de présenter une synthèse des différentes définitions du mot *système* ou de l'expression *système thermodynamique*. Aussi, à travers l'étude de 45 ouvrages parus entre 1989 et 2013, traitant de thermodynamique, destinés pour la plupart à un niveau d'enseignement de niveau L1 à L3, nous proposons un examen le plus exhaustif possible du concept de système en thermodynamique (Liste dans [2]). Les ouvrages dans cette étude sont donc majoritairement des œuvres de thermodynamique physique, généralistes (CPGE ou universitaires) et de thermodynamique industrielle (33 ouvrages). De plus, nous avons complété notre étude par l'analyse de quelques ouvrages de chimie (9 ouvrages) et de biologie (3 ouvrages), dans lesquels la notion de système ou système thermodynamique est également abordée et qui proposent parfois des compléments aux définitions proposées dans les ouvrages de physique.

Signalons que très peu d'ouvrages parmi l'ensemble des documents consultés (en dehors des 45 présentés ici) ne proposent aucune définition du mot système en thermodynamique. Avant de parcourir l'ensemble de ces références, nous proposons ici quelques exemples parmi ceux référencés. Chacun d'entre eux propose une définition différente de la notion de système, montrant que le classement que nous suggérerons par la suite devra réunir plusieurs idées proches : « *On appelle système thermodynamique tout système constitué d'un très grand nombre de particules microscopiques. Un échantillon de matière de taille macroscopique est un système thermodynamique. Un échantillon de matière de dimensions mésoscopiques est aussi un système thermodynamique. Choisir un système revient à partager le monde en deux : le système choisi et le reste de l'univers que l'on nomme extérieur.* »

Dans une autre définition issue d'un ouvrage de chimie, les auteurs proposent ce commentaire : « *Nous entendons par système cette partie du monde que nous étudions et par milieu extérieur, tout le reste.* » L'observateur étant dans le milieu extérieur, il est *a priori* plus aisé pour lui de présenter l'objet d'étude par rapport au milieu avec lequel il interagit. En soit, dans cette définition très courte, le système est d'abord défini par tout ce qu'il n'est pas. Cette désignation 'milieu extérieur', on le verra plus loin, est une notion qui est présente dans la quasi-totalité des livres référencés. Il apparaît donc important pour définir un système, d'indiquer clairement tout ce qui n'est pas le système. [7]

Dans un ouvrage de biologie : « *On appelle système, ou milieu intérieur, la portion de l'espace limitée par une surface réelle ou fictive, où se situe la matière étudiée. Le reste de l'univers est le milieu extérieur. La distinction entre système et milieu extérieur est largement arbitraire : le système est ce que l'observateur a choisi d'étudier.... Un système thermodynamique, stricto sensu, est un système macroscopique, c'est-à-dire un système pour lequel le détail des caractéristiques microscopiques est inaccessible, et où l'on ne peut atteindre que des caractéristiques statistiques.* ». Cette définition se rapproche du premier exemple. La nécessité d'un grand nombre de particules est notamment justifiée par le fait que grâce à cela, il est possible de réaliser des moyennes sur des paramètres microscopiques afin d'obtenir des grandeurs macroscopiques caractéristiques de l'état du système. Cette définition se rapproche des attentes parues dans le programme de CPGE de 1987. En outre, cette caractéristique statistique permet de réaliser une distinction nette avec le système défini en mécanique. Mais, il est également important de souligner que les auteurs insistent sur la nécessaire existence d'une frontière entre le système et le milieu extérieur. Cette frontière est réelle ou une réalisation de pensée. Notons enfin, que les auteurs parlent de « *matière étudiée* » : la masse serait donc *a priori* une nécessité dans le concept de système. Un questionnement vient alors : est-ce qu'un ensemble non matériel, comme un gaz de photons par exemple, peut être considéré comme un système thermodynamique ?

Enfin : « *La thermodynamique s'applique aux objets macroscopiques, qui sont formés d'un grand nombre d'individus microscopiques appelés molécules. Un système thermodynamique est une portion de l'univers limitée par des parois abstraites à définir avec précision. Ces parois ne s'opposent pas forcément à certains échanges avec l'extérieur (appelé aussi environnement ou entourage). L'ensemble système + entourage est considéré comme formant un "super-système" isolé.* ». Dans cette dernière définition, on retrouve les notions abordées précédemment, mais les auteurs en parlant de « parois » au pluriel laisseraient la liberté de penser que le système peut être formé de plusieurs surfaces. Cette nuance peut paraître légère mais elle ouvre pourtant la possibilité de choisir un système formé par l'union de systèmes non nécessairement connexes.

### 3.2. La diversité des définitions

Afin d'avoir une lecture plus efficace de ces définitions, nous avons tenté de les rassembler en les classant par catégories [2] :

- Définir ou non ce qu'il y a dans le système ;
- Définir le système par son volume de contrôle (i.e. par son ou ses interfaces) ;
- Système simple ou composite.

On peut souligner que seulement 17 des 45 ouvrages (soit 38%) présentent la notion de *système thermodynamique* au lieu de la notion de *système*.

#### 3.2.1. Définir ou non ce qu'il y a dans un système

Il s'agit ici de montrer dans les définitions du système, la diversité des dénominations relatives au contenu (ou ce qui n'est pas son contenu) d'un système [2]. Il est intéressant de constater que 86% des ouvrages font référence à l'environnement extérieur pour définir le système. On dénombre à ce propos 33 ouvrages sur 45 (soit 73%) qui désignent en priorité le système par ce qui ne lui appartient pas : c'est-à-dire le *milieu extérieur*. Avant d'en décrire le contenu, cela semble simple pour les auteurs de représenter le système par ce qui ne fait pas partie de ce dernier. Cette notion de *milieu extérieur*, apparaît aussi dans la notion d'*univers* qui est abordée dans 20 ouvrages sur 45 (soit 44%). L'*univers* est alors défini comme l'union du système et du milieu extérieur. Cependant, l'*univers* peut-il lui aussi, former un système thermodynamique ? Certains le voit comme un « *"super-système" isolé.* ». Mais dans ce cas, il n'y aurait, pour ce système, aucun milieu extérieur !

Cependant, certains auteurs nuancent : « [...] *Or nous avons défini le milieu extérieur d'un système comme étant le reste de l'univers, ce qui implique que ce milieu extérieur s'étende à l'infini. [...] On se tire de cette difficulté en admettant que, pour ce qui concerne les échanges d'un système avec l'extérieur, le milieu extérieur se comporte comme un réservoir limité au proche environnement du système.* » [2].

Aussi, au sens thermodynamique du terme, la notion d'*univers* fait référence non pas à un système infini mais à un milieu fini fait de la réunion du système étudié et de son environnement proche appelé *milieu extérieur*. Ce dernier ne peut alors réaliser des échanges qu'avec le système thermodynamique considéré. Ainsi l'union {système et milieu extérieur} pourrait donc être considérée comme un ensemble globalement isolé, que l'on nommerait *univers*.

Cette remarque fait également écho à la notion d'*Univers* développée en 1865 par Clausius qui énonçait : « *L'Energie de l'Univers est constante, l'Entropie de l'Univers tend vers un Maximum.* » [2]. Ainsi, on peut se demander si l'*Univers* de Clausius, constitue un système thermodynamique dans lequel les principes sont applicables. Cet *Univers* est-il considéré comme un milieu fini ou infini ? La question semble délicate, puisqu'en l'état actuel de nos connaissances, on ne peut affirmer que l'*Univers* n'est pas un système infini. Aussi, le concept d'énergie totale et le principe de conservation qui est associé n'ont finalement peut-être aucun sens dans le cas de systèmes infinis.

Un second aspect important de la définition de système est celui relatif à son contenu. En effet, 93% des ouvrages, font référence explicitement à ce qui se trouve dans le système. On distingue deux grands types de contenus selon les termes employés par les auteurs. Premièrement, la référence pour 35% des ouvrages, au concept de *corps* ou d'*objet(s)* : corps ou objet peuvent désigner toutes sortes de choses, matérielles, immaté-

rielles et de toutes tailles. En outre, l'utilisation du pluriel ou du singulier laisse sous-entendre qu'un système peut être formé d'un seul (11% des ouvrages) ou d'un ensemble de constituants (24%). Ainsi, si on considère un glaçon d'eau pure par exemple (soit environ 20 g) il s'agit bien d'un objet unique au sens macroscopique du terme. En revanche, si on l'explore à des dimensions plus faibles, on réalise qu'il est constitué de minuscules objets que sont les molécules d'eau, elles-mêmes constituées d'atomes *etc.* Aussi, certains ouvrages préfèrent utiliser le terme de *particules* pour désigner le contenu du système (58%). Mais à chaque fois le terme est alors employé au pluriel. Dans l'exemple du glaçon, cet *objet* est en effet constitué d'environ  $6.10^{23}$  molécules d'eau, i.e. d'un « *grand nombre* » de particules. Ce grand nombre permet en effet, de caractériser spécifiquement le système thermodynamique : c'est un système décrit de manière statistique pour lequel il est possible de réaliser des moyennes spatiales et temporelles de grandeurs microscopiques (vitesse quadratique notamment). La description du système se fait alors par les grandeurs macroscopiques associées (température, pression *etc.*).

Il est également intéressant de noter que 22% des ouvrages précisent que ces ensembles de particules sont *matérielles*. L'emploi de cet adjectif peut faire l'objet de discussions puisque, comme nous l'avons souligné précédemment, la question de systèmes thermodynamiques sans masse, tel un gaz de photons par exemple, se pose de nouveau.

### 3.2.2. Définir le système par son volume de contrôle

Définir un système thermodynamique, c'est aussi présenter ce qui le sépare du milieu extérieur. On dénombre ainsi 42 ouvrages sur 45 (soit 94%), qui introduisent une ou des *séparation(s)* entre le système et le milieu extérieur.

Ce choix d'une surface de contrôle est un élément important pour la détermination du système car c'est à travers ces parois (ou cette paroi) que les transferts de matière ou d'énergie avec l'extérieur se réalisent.

Les surfaces permettent à ce propos l'algèbrisation des grandeurs d'échange. Ainsi, comme cela s'est progressivement imposé après les années 30, les transferts se comptabilisent en comptant positivement ce qui est gagné par le système et négativement ce qui est perdu.

Les ouvrages s'accordent de plus, sur le fait que cette frontière entre le milieu extérieur et le système peut être réelle ou fictive. Délimiter un système revient donc à réaliser une opération de pensée dans laquelle on isole fictivement le système thermodynamique d'étude.

Enfin, parmi les 42 ouvrages qui abordent la notion de séparation du système avec l'extérieur, on en dénombre 8 (soit 18%) qui proposent une éventuelle multiplicité des frontières du système. L'utilisation du pluriel pour les surfaces de séparation laisse sous-

entendre ce qui va être abordé dans le prochain paragraphe : le cas des systèmes composites.

### 3.2.3. Système simple ou système composite

Plus d'un tiers des ouvrages (17 sur 45 soit 38%) soulignent que certains systèmes sont composés de sous-systèmes ou sont des systèmes non homogènes. Or, seuls 18% d'entre eux suggèrent, comme nous l'avons vu, une multiplicité des surfaces. Il est pourtant difficile de concevoir un système hétérogène formé que d'une seule surface. En effet, si on prend l'exemple de la vapeur d'eau en équilibre avec son liquide, l'ensemble {eau liquide et eau vapeur} peut former un système thermodynamique. Pourtant, ce système n'est clairement pas homogène et se découpe donc en plusieurs sous-systèmes se délimitant les uns par rapport aux autres par une ou des frontières. La référence au système composite apparaît souvent tardivement dans les ouvrages. En effet, on trouve une définition générale du système dans les premières pages du livre. Puis, lors du chapitre sur les transitions de phases, les auteurs corrigent ou complètent la définition initialement proposée. Ainsi, on peut lire « *un système thermodynamique est un système contenant un très grand nombre de particules élémentaires.* » La définition est complétée ensuite plus tardivement : « *une phase est un système homogène ou sous-système d'un système hétérogène.* » [2].

Pourtant, les systèmes composites ne sont pas spécifiques au changement de phase. En effet, deux systèmes thermodynamiques non connexes, peuvent constituer un système thermodynamique. C'est le cas par exemple, d'un système composé de deux cuves contenant deux gaz qui peuvent être *a priori* différents, fermés par deux pistons étanches. Ces deux pistons sont solidaires en ce sens que leurs axes restent verticaux et sont attachés aux bras d'un levier. En outre, il est possible d'imaginer que ces deux cuves cylindriques reposent sur une table conductrice thermiquement (une table métallique par exemple). Ainsi, le bras de levier permet les échanges d'énergie par travail et la table permet les transferts thermiques entre les deux systèmes, c'est-à-dire entre les gaz contenus dans les deux cuves. En revanche, le système complet formé par ces deux cylindres peut être considéré comme isolé.

Enfin, concernant la multiplicité des frontières, que penser de cet exemple : « *Les molécules d'azote qui font partie de l'air qui vous entoure ne forment pas un système : il n'existe pas de frontière macroscopique (visible à l'œil nu) qui les délimite* » [2]. En quoi l'ensemble formé des molécules d'azote ne formerait-il pas un système thermodynamique ? En effet, les molécules d'azote semblent répondre aux critères de certaines définitions d'un système thermodynamique : il y a en effet un très grand nombre de particules permettant de réaliser une moyenne statistique ; et bien que l'on ne puisse pas concevoir une frontière macroscopique qui les délimite on peut imaginer une ou des surfaces rassemblant toutes les molécules de diazote !

Ainsi, la multiplicité des définitions n'aide pas à donner un sens précis de la notion de système en thermodynamique. On note, en outre, que certains travaux, en marge de la thermodynamique physique, comme certains ouvrages relatifs à la thermodynamique chimique proposent des définitions bien différentes de celles que nous venons de rencontrer. Ainsi, peut-on lire : « un système est un ensemble de substances susceptibles ou non de réagir chimiquement [...] un système est dit en équilibre lorsque ses propriétés ne varient pas avec le temps. » [2]. On voit ici que cette définition est uniquement applicable dans les milieux réactionnels ; elle ne correspond en rien aux cas généralement rencontrés en thermodynamique.

Compte tenu de ces nombreuses définitions et notamment de leur disparité, on peut se poser la question de savoir si un système thermodynamique possède des propriétés "essentielles" nécessaires à sa constitution ?

### 3.3. Quelles propositions de définition pour le système thermodynamique ?

Une proposition sur laquelle on peut accorder les définitions, est la nécessité pour un système thermodynamique d'être constitué d'un ensemble d'entités microscopiques (y compris, éventuellement un gaz de photons) formant un ou des ensembles macroscopiques. Cette région de l'espace contient un très grand nombre de « motifs » (ou « d'objets ») microscopiques (de l'ordre de grandeur du nombre d'Avogadro). Il permet alors de réaliser une moyenne statistique afin d'avoir accès à des paramètres macroscopiques telles que la température ou la pression caractérisant l'état d'équilibre thermodynamique du système.

La définition du système thermodynamique comprend aussi une autre idée fondamentale : la possibilité pour lui d'effectuer des transferts d'énergie et/ou de matière avec les systèmes environnants. L'intérêt de définir ces frontières est de distinguer les grandeurs caractéristiques du contenu (telle que l'énergie) des grandeurs de transfert (tels que les modes de transferts thermiques ou par travail). Ces transferts permettent alors au système d'évoluer d'un état d'équilibre thermodynamique vers un nouvel état d'équilibre thermodynamique. Ces transferts peuvent alors se faire au travers d'une ou plusieurs surfaces. Celles-ci peuvent représenter des frontières réelles ou imaginaires créées par l'esprit. Tout ce qui se trouve à l'intérieur de ces surfaces fermées constitue le système thermodynamique, tout ce qui se trouve au-delà constitue le milieu extérieur avec qui le système peut interagir. La réunion de ces ensembles forme alors un ensemble fini globalement isolé, que l'on peut nommer *univers*. Le fait qu'un système thermodynamique puisse être constitué de plusieurs surfaces fermées permet donc de définir comme système un ensemble formé de deux systèmes (ou davantage) non nécessairement connexes et donc non nécessairement en équilibre thermodynamique entre eux.

La définition du système thermodynamique impose donc un choix fondamental pour la détermination des paramètres d'état mais aussi des grandeurs de transferts. Définir la notion de système et en donner les propriétés semblent donc être un point de départ essentiel à toute réalisation de bilans (énergétique et entropique). La définition du système doit laisser comprendre à l'étudiant l'importance de la mise en relief des frontières de ce dernier. Il reste alors dans l'étape de résolution d'un problème de thermodynamique, de choisir le système thermodynamique et de se tenir à ce choix pour évaluer l'ensemble des grandeurs caractéristiques.

Toutefois, les propositions que nous venons de faire sont émises sous de nombreuses réserves. La première d'entre elles a concerné, comme nous l'avons vu, le caractère non nécessairement massif des particules constitutives du système. Mais, d'autres remarques sont possibles. A titre d'exemples, on peut citer le long développement que propose Kastler, à la suite des définitions de certains concepts de thermodynamique. Il estime en effet que donner une définition d'un système thermodynamique est difficile dans la mesure où certains sous-entendus ou approximations apparaissent nécessairement. Aussi, propose-t-il notamment deux points de réflexion [3].

Le premier concerne la géométrie et la nature des parois d'un système thermodynamique :

« Dans les systèmes usuels où l'étendue des surfaces de séparation reste petite et où le nombre de molécules dans les couches superficielles est en général inférieur au millionième du nombre total de molécules, on peut négliger l'énergie de surface, [...]. Mais, une telle approximation n'est plus permise lorsque les surfaces sont grandes (lames minces, dispersion colloïdale de deux phases l'une dans l'autre) et il faut avoir présent à l'esprit les conditions de validité de cette approximation ». La remarque de Kastler pose une condition sur l'étendue de la surface qui délimite le système. Couramment, le problème ne se pose pas puisque les surfaces de contrôle habituellement choisies possèdent une dimension finie. En outre, le rapport volume du système sur la surface extérieure du système est en faveur du volume i.e. privilégiant les grandeurs au sein du système vis-à-vis des grandeurs caractéristiques de la surface. En revanche, si on prend par exemple les molécules de diazote contenues dans l'air [2], elles ne peuvent constituer un système thermodynamique « habituel » dans la mesure où les phénomènes de surface seraient privilégiés. En effet, la surface du système ainsi formée serait la réunion de chaque surface de chaque molécule de diazote diluée dans l'air. Ainsi, sa dimension serait considérée comme infini. Le rapport volume sur surface du système serait donc cette fois en faveur de la surface, dont les grandeurs caractéristiques seraient alors privilégiées. En outre, chaque système ne posséderait pas nécessairement suffisamment de particules pour pouvoir réaliser une moyenne statistique représentative de l'état du système [2].

Le deuxième point concerne l'état d'équilibre thermodynamique du système :

« Nous devons faire encore une autre réserve : nous avons admis que le volume, la densité, les propriétés énergétiques d'un corps pur sont parfaitement définis lorsqu'on se donne les valeurs actuelles de la température et de la pression. Il existe des cas, en particulier pour les corps à l'état solide, où ces propriétés dépendent du traitement antérieur subi par ces corps. [...] De même les propriétés magnétiques d'un corps ferromagnétique ne dépendent pas seulement des valeurs momentanées de la température et du champ magnétique, mais de la manière dont la température et le champ ont évolué antérieurement. » [3].

Les définitions du système et de ses frontières permettent d'identifier les grandeurs de transfert mais aussi les grandeurs caractéristiques du système en lui-même. Aussi, « l'histoire » des transformations subies par le système peut influencer, par un phénomène d'hystérésis, l'état du système. Les grandeurs d'état d'un système donné, ne dépendent pas seulement de la nature des échanges ni des corps qui le constitue, mais de son passé. Kastler souligne néanmoins que l'étude de tels systèmes sera régulièrement écartée des problèmes de thermodynamique car « le domaine d'étude principal de la thermodynamique est l'étude des propriétés des fluides où cette complication ne se présente pas. » [3].

Toutes ces remarques montrent la difficulté dans la définition de la notion de système, d'être le plus exhaustif possible. Aussi, il est nécessaire qu'« une grande souplesse existe dans la définition du système ; l'essentiel est de bien l'explicitier et de s'y tenir dans la suite de l'étude. » [8].

#### 4. CONCLUSION

La notion de système ou de système thermodynamique est un concept à la fois courant et ambigu. Son apparition est tardive dans les programmes de thermodynamique puisqu'elle n'y est présente qu'à partir de 1957 dans le secondaire à travers les bilans énergétiques et 1968 dans le supérieur (CPGE) dans l'introduction du cours de thermodynamique. Mais, les compétences exigibles sur ce concept ne sont finalement que de le qualifier (isolé, fermé, ouvert) suivant la nature des échanges. Ce sont au final, les ouvrages qui, à partir des années 1960, insistent sur l'importance de ce concept. Mais, le système thermodynamique possède une définition non générale et chaque auteur apporte un élément de réponse. Si nous avons tenté d'en donner des propriétés essentielles, il est difficile d'arrêter cette proposition comme définitive et nous sommes obligés de nous rapprocher des remarques proposées notamment par Kastler [3].

D'un autre côté, « Est-il nécessaire de donner une définition précise au système thermodynamique

avec des critères et des propriétés qu'il doit respecter ? », sachant que « une grande souplesse existe dans la définition du système » [8]. Les partisans du non pourraient avancer qu'« il n'existe pas de règles précises pour définir [un volume de contrôle]. Néanmoins, un volume de contrôle choisi de manière astucieuse peut simplifier considérablement l'analyse » [7].

Combien d'étudiants ont entendu ou combien d'enseignants de thermodynamique ont dit, que choisir un système en thermodynamique est "intuitif", "dépendant du problème à résoudre" ou encore "fonction de la question". Mais, cette "astuce", cette "intuition", comment la transmettre à l'étudiant ? Ainsi, comme le font déjà de nombreux ouvrages, il paraît essentiel de définir un système thermodynamique, en donnant ses caractéristiques. Mais, il est également important d'appliquer ces définitions lors des résolutions de problème en le choisissant clairement et en effectuant les bilans qui correspondent au système réellement préféré. Ce travail, doit être réalisé avec l'étudiant et ce dernier doit être capable de savoir que plusieurs choix de systèmes sont possibles pour résoudre un problème de thermodynamique [2,7]. Mais, force est de constater que ce travail n'est pas réalisé. C'est donc un constat douloureux pour l'enseignement de la thermodynamique qui est fait ici. On pourrait alors reprendre la remarque que faisait Bouasse déjà en 1913 : « vingt ans de professorat à la Faculté m'ont appris que les étudiants ne comprennent généralement pas même l'énoncé des questions qu'ils étudient. » [6].

#### Bibliographie

- [1] Brochard Jean. *Thermodynamique* - Paris : Masson et Cie Editeurs, 1963.
- [2] Nagels Maxime. *Évolutions de quelques concepts de thermodynamique classique dans l'enseignement secondaire et supérieur en France au cours du 20ème siècle*. Université de Lille, Villeneuve D'Ascq, France. [Mémoire de thèse] 4 mai 2017.
- [3] Kastler Alfred et Vichnievsky Restilav. *Cours de Physique Générale* à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique - Paris : Masson, 5<sup>ème</sup> édition, 1962.
- [4] Duhem Pierre. *Traité d'énergétique, ou thermodynamique générale* - Paris : Jaques Gabay 1997 (1911).
- [5] Bouasse Henri. *Cours Thermodynamique 1<sup>ère</sup> partie Principes Généraux. Gaz et Vapeurs.* - Paris : Delagrave 2<sup>ème</sup> édition, 1913a. - Volume I.
- [6] Bouasse Henri. *Cours de Physique*, conforme aux programmes des certificats et de l'agrégation de physique. - Paris : Delagrave, 1907. 1<sup>ère</sup> édition.
- [7] Roulet Bernard. *L'énergie interne en classe de première* [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. 02 février 1981, pp.613-619 : Vol. 631.
- [8] Faroux Jean-Pierre, Renault Jacques et Bocquet Lydéric *Toute la thermodynamique, la mécanique des fluides et les ondes mécaniques MPSI-PCSI,MP-PCSI* : Dunod, 2002.