



**HAL**  
open science

# L'architecture de la thermodynamique et ses développements futurs

Bernard Guy

► **To cite this version:**

Bernard Guy. L'architecture de la thermodynamique et ses développements futurs. 2011. hal-00611861

**HAL Id: hal-00611861**

**<https://hal.science/hal-00611861v1>**

Submitted on 27 Jul 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **L'architecture de la thermodynamique et ses développements futurs**

Bernard GUY

Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne, France

[guy@emse.fr](mailto:guy@emse.fr)

Juin 2011

## Résumé

Le fonctionnement de la thermodynamique contemporaine s'articule sur des hypothèses et mesures faites au niveau microscopique des particules individuelles et sur des hypothèses et mesures faites au niveau macroscopique des « grands » systèmes. Les premières reposent sur les concepts de la mécanique : position, masse, vitesse, forces, énergie cinétique et potentielle, lois de Newton etc. Les secondes reposent sur la définition de grandeurs nouvelles (température, quantité de chaleur, entropie etc.) et leurs propriétés posées a priori. Des hypothèses de nature statistique complètent cet ensemble et disent comment l'on peut passer du niveau microscopique au niveau macroscopique (propriété d'extensivité, postulat ergodique, caractère discernable ou non des particules individuelles, définition et équiprobabilité des états microscopiques etc.). Le nombre de particules microscopiques dans le système d'ensemble intervient dans la façon d'envisager le passage entre les niveaux. L'architecture d'ensemble de la thermodynamique doit faire co-exister ces diverses hypothèses et mesures aux quatre lieux mentionnés. Suivant les auteurs, plusieurs façons de comprendre cette architecture d'ensemble sont observées, suivant que l'on pose ou non, et de façon indépendante ou non, des groupes d'hypothèses à tel ou tel niveau (on que l'on considère que la question de l'échelle ne se pose pas). On évoque ici ces possibilités et l'on discute de façon très générale la question de la cohérence de ces architectures, et les degrés de liberté possibles dans leur construction. Les voies de progrès possibles de la thermodynamique (ou le renouvellement de la compréhension de ce domaine) nous apparaissent devoir se situer dans ce cadre. Quelques exemples sont donnés qui ouvrent sur des pistes de recherche.

**Mots clés :** thermodynamique, mécanique, hypothèses, microscopique, macroscopique, statistique, architecture, récursivité, nombre de particules, chaleur, travail, incertitude, arbitraire, degré de liberté.

## Introduction

Nous exposons ici notre façon de comprendre l'articulation entre les différents volets et concepts de la thermodynamique. Ce panorama, forcément général et de type « philosophie des sciences », pourra être complété par des exemples précis que nous n'avons pas la place de mettre ici. Il nous semble que la compréhension de cette architecture est une des conditions pour le développement de la thermodynamique selon des directions nouvelles évoquées en fin de texte.

Historiquement, les concepts de base de la thermodynamique (transfert de quantité de chaleur, température, entropie, énergie interne et lois associées) ont été définis à l'échelle macroscopique des réservoirs des machines à vapeur. La thermodynamique pourrait fonctionner à cette échelle de manière autonome. Mais la compréhension de la structure corpusculaire de la matière, venue après, a donné à la discipline une nouvelle perspective : celle-ci est de relier les concepts et grandeurs associés aux corpuscules microscopiques (c'est-à-dire ceux de la mécanique rationnelle) à ceux du niveau macroscopique que nous venons de rappeler. Ainsi aujourd'hui la thermodynamique est la science qui structure un dialogue entre deux échelles d'étude de la réalité, *supposées déjà données* : - une échelle microscopique et – une échelle macroscopique. L'approche microscopique (thermodynamique statistique) permet de faire des prévisions quantitatives économisant de nombreuses mesures macroscopiques et s'associant à ce qui est connu et mesuré à l'échelle macroscopique. Notons que cette présentation élémentaire de la thermodynamique (dialogue entre les deux niveaux microscopique et macroscopique) n'empêche pas divers aménagements techniques qui définissent une multitude de « thermodynamiques » (irreversible thermodynamics, non equilibrium thermodynamics, extended irreversible thermodynamics, rationale thermodynamics, endoreversible thermodynamics, finite time thermodynamics, quantum thermodynamics etc., voir à ce propos les travaux de W. Muschik). Nous ne discuterons pas ici ces nombreuses variantes d'exposition et supposerons pour l'instant qu'elles ne modifient pas fondamentalement l'architecture conceptuelle élémentaire que nous venons de rappeler (il pourra être intéressant cependant dans l'avenir de voir comment chacune accommode les degrés de liberté dont nous parlons dans la suite du texte).

S'intéressant à la thermodynamique aujourd'hui, nous devons ainsi examiner les hypothèses faites au niveau microscopique et celles faites au niveau macroscopique. Il nous faut aussi

examiner les règles de passage entre les deux niveaux. Nous pouvons enfin discuter la proportion que nous choisissons entre la taille du système macroscopique et celle d'une entité microscopique, ou encore le nombre de particules microscopiques  $N$  du système macroscopique. Au total cela fait à première vue quatre lieux d'hypothèses dont l'articulation permet le fonctionnement de l'ensemble. Chacun de ces groupes d'énoncés contient ses degrés d'arbitraire et est l'occasion d'une évolution possible de l'ensemble de la théorie, en faisant de nouveaux choix en fonction de nouveaux besoins ou d'une nouvelle compréhension. Dans ce cadre, il convient d'insister sur les points suivants.

### **1. Caractère relatif de ce qui est appelé microscopique et macroscopique**

Ce qui est déclaré microscopique ou macroscopique l'est à un moment donné et ne correspond en aucune façon à des niveaux ultimes de la réalité qui nous échappent toujours : le niveau microscopique pourrait être lui-même considéré comme macroscopique par rapport à un niveau microscopique plus fin, et de même pour le niveau macroscopique par rapport à un niveau plus grossier que l'on pourrait dénommer mégascopique. Les deux échelles sont pensées en opposition l'une à l'autre, ou composition l'une avec l'autre, et c'est la proportion entre les deux tailles qui est déterminante pour le fonctionnement de la thermodynamique, au sens où nous l'avons rappelé ci-dessus.

### **2. Mise en regard des niveaux microscopique et macroscopique**

La mise en regard entre les deux niveaux microscopique et macroscopique peut être comprise de deux façons : a) historiquement, on a commencé à faire des *identifications* entre les concepts et grandeurs des deux niveaux sans changer leurs tailles respectives, c'est-à-dire encore sans changer la taille du niveau macroscopique (ou plus précisément sans changer la proportion entre les tailles des deux niveaux : c'est ce qu'on appelle la « limite thermodynamique » pour  $N \rightarrow \infty$ , cf. les travaux de L. Boltzmann). b) nous pouvons proposer aussi une autre démarche en examinant comment l'on passe d'un niveau à l'autre en augmentant *progressivement* la taille des systèmes microscopiques ( $N$  n'est plus d'emblée infini, on le fait varier de 1 à un nombre très grand). Plus que l'énoncé des correspondances

entre les deux niveaux, c'est la *genèse elle-même des concepts de la thermodynamique* à partir de ceux de la mécanique que l'on peut reprendre ainsi.

### **3. Les concepts et lois posés au niveau microscopique**

Avant tout et très fondamentalement, pour construire la théorie au niveau microscopique, on doit poser les concepts d'espace et de temps et écrire les variables mathématiques correspondantes. Les concepts au niveau microscopique sont habituellement ceux de la mécanique rationnelle de Newton : masse, position, vitesse, quantité de mouvement, expression des forces, énergie cinétique et potentielle, travail ; lien entre accélération et force, loi de conservation de l'énergie pour les changements affectant les particules élémentaires etc. Suivant les besoins on peut y rajouter ou y substituer les concepts et lois de l'électromagnétisme, de la relativité, restreinte et générale, et/ou de la mécanique quantique. On remarquera que le concept de corpuscule (auquel on va attacher masse, énergie etc.) nous vient de l'échelle macroscopique (les boules de billard ne sont pas microscopiques !) et qu'en rapetissant à l'échelle élémentaire ce corpuscule et les concepts associés, on a déjà fait un passage caché du macroscopique vers le microscopique. Les mesures faites au niveau microscopique sur les particules individuelles ne sont pas si fréquentes et dérivent en réalité de mesures à caractère macroscopique (voir section suivante). Quand on pose une fonction d'onde pour une particule individuelle en mécanique quantique, on perd la localité microscopique et l'on établit aussi un lien caché du niveau macroscopique vers le niveau microscopique.

### **4. Les contraintes imposées par le niveau macroscopique**

Les concepts et grandeurs du niveau macroscopique sont en partie les mêmes que ceux du niveau microscopique. On peut ainsi postuler que les concepts fondamentaux d'espace et de temps sont les mêmes qu'au niveau microscopique, même si certains auteurs se posent la question de l'émergence du temps au niveau macroscopique à partir des phénomènes au niveau microscopique, sans temps associé à ce dernier niveau. On fait aussi l'hypothèse qu'en parlant d'énergie pour les transformations microscopiques, nous parlons de la même chose qu'au niveau macroscopique. Aux concepts habituels du niveau microscopique, on peut

adjoindre, comme on l'a signalé dans l'introduction, des concepts spécifiques tels la température, la pression, la quantité de chaleur, l'entropie etc. et leurs propriétés a priori (exprimées de façon synthétiques dans les principes de la thermodynamique). On s'efforce alors de montrer comment l'on identifie ces concepts à ceux dérivés du niveau microscopique. Mais ce serait une erreur intellectuelle de présenter les choses de façon uniquement ascendante allant du microscopique vers le macroscopique, par des procédures de sommation et de moyennisation, comme on le fait souvent. Nous avons déjà signalé le transfert de l'image mentale de corpuscule du niveau macroscopique vers le niveau microscopique. Mais, aurions-nous tous les concepts utiles définis de façon « indépendante » au niveau microscopique, il nous faudrait souligner que, du point de vue de la valeur des grandeurs, on ignore presque tout à ce niveau ! On ne peut connaître, pour les myriades de particules microscopiques, les informations de nature mécanique (positions, vitesses) connues habituellement pour les objets mécaniques macroscopiques (ou alors c'est que l'on traite un système où le nombre  $N$  n'est pas très grand : on est en train de quitter la thermodynamique, ou on l'a déjà fait ; ce point est rediscuté plus loin). Le niveau macroscopique sur lequel nous faisons des mesures nous impose les valeurs des grandeurs moyennes à calculer sur le niveau microscopique : c'est dire qu'une partie de l'information transite du niveau macroscopique vers le niveau microscopique. La conservation de l'énergie écrite aux deux niveaux et les reliant nous permet ce transfert et la description plus fine des grandeurs microscopiques demande de plus des postulats statistiques dont nous parlerons dans la section suivante.

Lorsque l'on s'intéresse aux niveaux d'énergie des particules élémentaires dans le cadre de la mécanique quantique, on observe aussi que leur quantification résulte des conditions aux limites sur l'ensemble du système et n'est pas une propriété substantielle de chaque particule. Les propriétés attribuées aux particules individuelles sont souvent déterminées à partir de mesures macroscopiques sur des systèmes à grand nombre de particules ; l'hypothèse d'absence d'interactions entre elles permet d'attribuer les propriétés mesurées aux particules individuelles.

D'autres contraintes s'imposent du niveau macroscopique vers le niveau microscopique : on peut ainsi poser que les évolutions microscopiques doivent conserver la valeur de certaines intégrales macroscopiques (on pense à des principes comme celui de moindre action ou celui de minimum de production d'entropie ; ces principes extrémaux, assortis de diverses contraintes, sont une façon d'exprimer quelque chose que l'on connaît du système

d'ensemble, et paraissent imposer comme une « finalité » au niveau microscopique). On pourra s'interroger sur le caractère équivalent ou additionnel des hypothèses faites au niveau macroscopique par rapport à celles faites au niveau microscopique : on sait par exemple l'équivalence entre certaines formulations locales de la mécanique (sous forme d'équations différentielles) et les formulations globales par intégrales (voir en fin de texte).

## **5. Les règles de passage du niveau microscopique au niveau macroscopique**

Parlons maintenant des règles permettant de passer d'un niveau à l'autre. Nous avons déjà parlé de la conservation de l'énergie (nous postulons que c'est la « même » énergie aux deux niveaux). Il faut rajouter d'autres règles, comme celle permettant d'ajouter des petits systèmes entre eux pour arriver au grand, en faisant augmenter en proportion diverses grandeurs associées : on parle de la propriété d'extensivité (pour les grandeurs dites extensives) qui suppose certaines conditions généralement passées sous silence et qui peuvent ne pas être vérifiées. C'est le cas lorsque les forces d'interactions entre les particules élémentaires ont une grande portée, comme pour les systèmes stellaires et la force de gravitation.

Il y a enfin toutes les hypothèses de nature statistique, qui ont parfois un caractère très technique et que nous n'allons pas reprendre en détail. Citons notamment :

- le postulat ergodique, et ses nombreuses formulations, qui établit un lien entre la connaissance des petits systèmes et celle des grands, en particulier et aussi en ce qui concerne la prévision de leurs évolutions temporelles « en moyenne ».
- les hypothèses faites sur le caractère discernable ou non des particules élémentaires, qui peuvent dépendre du type de particule et du type de système.
- les règles qui s'ensuivent et posent comme équiprobables les différents états microscopiques. Encore faut-il définir ces états, savoir comment on liste les niveaux d'énergie et quelles distinctions on fait dans la façon de ranger les particules sur les niveaux, c'est à dire dans quelle mesure on considère ces particules comme discernables ou non et comment l'on compte les dégénérescences. Selon les choix retenus, diverses lois de distribution statistique en dérivent : elles permettent de faire des moyennes sur les grandeurs microscopiques et accéder à toutes sortes de grandeurs macroscopiques, établissant ainsi les correspondances recherchées entre les deux niveaux.

Certaines hypothèses paraissent spécifiques au niveau macroscopique, telles les règles de symétrie entre forces et flux (utiles en particulier pour la thermodynamique du non équilibre), l'extension du second principe des systèmes fermés aux systèmes ouverts etc. mais on peut en général retrouver ces règles sans hypothèses additionnelles à partir du niveau microscopique si l'on se situe dans cette démarche (nous pensons que cela peut demander des vérifications pour tel ou tel cas). L'hypothèse de microréversibilité locale relève de la même procédure.

## **6. Eléments de discussion ; pistes de recherche**

Les voies d'évolution de la thermodynamique passent par la possible discussion des choix faits aux quatre « leviers » de cette architecture d'ensemble (hypothèses au niveau microscopique, hypothèses au niveau macroscopique, règles de passage entre les deux niveaux, nombre  $N$  de particules). Pourrait-on remplacer chaque hypothèse par une autre ? Nous évoquons maintenant quelques propositions dans ce cadre, qui doivent dans une large mesure être considérées comme « programmes de recherche » et pourraient être précisées dans des développements plus longs, comprenant des calculs.

### *6.1. Discussion des hypothèses faites au niveau microscopique*

On peut ainsi reprendre la réflexion fondamentale sur les concepts d'espace et de temps posés comme cadre aux mouvements des particules microscopiques : ces deux concepts ne renvoient pas à des substances séparées et préexistantes de la réalité mais sont construits en opposition ou composition l'un avec l'autre. La compréhension de cette construction a des conséquences sur notre intelligence de certains concepts thermodynamiques. Ainsi l'irréversibilité du temps. Le premier problème du temps n'est pas son irréversibilité mais sa construction ; les concepts de réversibilité et d'irréversibilité sont à discuter en opposition l'un avec l'autre et leur limite est sujette à arbitraire et incertitude (voir les travaux de Guy). De même, les notions d'équilibre ou de déséquilibre ne sont pas absolues mais relatives aux échelles de temps et d'espace envisagées (ces discussions concernent aussi la section section 6.2).

Au niveau microscopique, on peut aussi discuter la nature des forces ou interactions fondamentales à prendre en compte, et les lois qui les régissent. Il y a aujourd'hui dans la communauté des physiciens des débats sur tout ce qui concerne la gravitation (reprise des lois de Newton, de la relativité restreinte et générale etc.) ; on pourrait y adjoindre ce qui concerne l'électromagnétisme. L'incorporation de nouvelles lois aura des conséquences sur le formalisme de la thermodynamique. Le choix d'associer à une particule une position précise ou une fonction d'onde comme en mécanique quantique n'est pas non plus neutre sur le déroulement subséquent de la thermodynamique.

## *6.2. Mise en regard des niveaux microscopique et macroscopique et augmentation du nombre de particules du système macroscopique*

La démarche évoquée plus haut de faire varier progressivement le nombre  $N$  de particules microscopiques permet d'esquisser une véritable compréhension de la genèse des concepts macroscopiques (il s'agit alors plus que d'une simple identification des concepts entre les deux niveaux). Au niveau de ce que l'on appelle la (ou une) mécanique, on manipule des points matériels, des forces, de l'énergie, du travail etc. Au niveau supérieur, on se met à envisager des ensembles constitués de grands nombres de ces points. Les deux niveaux s'articulent parce que l'on souhaite traiter les ensembles macroscopiques comme des sortes de nouveaux points matériels, en utilisant les mêmes concepts (énergie, mouvements, forces, travail etc.) que pour les points microscopiques. La (ou une) thermodynamique est la théorie à ce deuxième niveau. En bouclant la conservation de l'énergie, on doit introduire des énergies ou transferts d'énergie supplémentaires : énergie interne, transfert de quantité de chaleur. On fait aussi apparaître, pour les systèmes macroscopiques en évolution, une nouvelle grandeur, de nature statistique, l'entropie, dont le maximum donne le terme. Dans la prise en compte des grands systèmes, on ne contrôle plus les trajectoires individuelles des particules et on doit raisonner sur des évolutions correspondant aux situations les plus probables. C'est ainsi que l'irréversibilité pratique apparaît, qui se relie à l'effet des petites incertitudes sur le calcul des positions des différentes particules, telle qu'on peut l'observer dans la simulation moléculaire.

En somme, les concepts de *chaleur, énergie interne, entropie, sens privilégié d'évolution (et tout l'édifice qui s'ensuit, c'est-à-dire « une » thermodynamique), apparaissent à chaque fois que, pour un système mécanique, l'on fait une division entre deux niveaux d'échelle et un*

*partage de notre connaissance (et de notre ignorance) entre ces deux niveaux. La séparation peut se faire où l'on veut (on peut construire plusieurs thermodynamiques en fonction du lieu de coupure entre les deux échelles). On peut décider d'observer le mouvement d'ensemble d'une montagne par rapport auquel de petits mouvements locaux (même macroscopiques à l'échelle humaine !) sont des « échanges de chaleur », et définir des grandeurs thermodynamiques pour l'ensemble de la montagne. Mais on soulignera que si l'on n'envisage qu'un petit nombre de particules, les nouvelles grandeurs n'ont plus de sens ; en particulier, il n'y a plus de différence entre chaleur et travail et les concepts de la thermodynamique s'évanouissent. Tous les concepts nouveaux de la thermodynamique doivent être pensés dans ce passage du microscopique vers le macroscopique en augmentant le nombre  $N$  de particules : notion de système avec son intérieur et son extérieur, son ouverture ou sa fermeture ; notions d'équilibre et de déséquilibre. Si  $N$  n'est pas trop grand, l'écriture de ces passages est la clé pour revoir toute la chaîne de raisonnement et de fonctionnement de la théorie et en écrire une adaptée à l'échelle choisie, ce qui peut par exemple se poser pour l'étude des nanosystèmes.*

La mise en regard des niveaux microscopique et macroscopique, que l'on cherche à procéder par identification ou à rendre compte de concepts nouveaux, ne se prononce pas sur la réalité ultime de chacun de ces deux niveaux. Comme on l'a dit, on peut se poser la question de niveaux microscopiques plus fins (les physiciens découvrent que le comportement même de quelques particules ressemble dans certaines situations à celui de grands systèmes). On peut aussi envisager de nouvelles grandeurs à des niveaux supérieurs plus grossiers à relier aux autres par de nouvelles hypothèses statistiques.

### *6.3. Discussion des contraintes au niveau macroscopique*

Les concepts choisis au niveau macroscopique et qui se retrouvent identiques à ceux du niveau microscopique (temps, espace...) peuvent faire l'objet de la même discussion qu'à ce niveau. Pour ce qui concerne les concepts et lois propres au niveau macroscopique, deux démarches sont possibles : si on cherche à faire des identifications entre les concepts issus des deux niveaux, on a a priori la liberté de modifier séparément ceux posés au niveau macroscopique. Si au contraire, on cherche à retrouver par une démarche ascendante tout ce qui concerne le niveau macroscopique, alors on n'a rien à modifier à ce dernier niveau dans la

mesure où l'on est supposé ne rien y poser. Mais ce qui s'impose autant sinon plus de la part du niveau macroscopique, ce sont des grandeurs globales sur le système envisagé, qui régleront les valeurs des moyennes calculées sur le niveau microscopique. De ce côté, il n'y a pas de latitude, sinon sur la façon de mesurer les grandeurs macroscopiques (qui peut retentir sur leur définition ?).

#### *6.4. Discussion des règles de passage du niveau microscopique au niveau macroscopique*

Nous avons évoqué plusieurs règles. Regardons comment nous pourrions en changer.

Si on ne prend pas la propriété d'extensivité, les formulations des lois statistiques, et de l'entropie vont changer. C'est le cas pour les systèmes où les interactions ont des portées à longue distance.

Les postulats statistiques eux-mêmes peuvent être discutés. Il est clair que leur validité est reliée à la valeur de  $N$  : si  $N$  devient plus petit, ils deviennent de moins en moins statistiques. Il faut donc les critiquer en même temps que la valeur de  $N$  et ce qui concerne la mise en relation des deux niveaux microscopique et macroscopique (section 6.2). Lorsque  $N$  diminue, les particules deviennent de plus en plus « discernables » ; on arrive à des situations où l'on ne peut simplifier les systèmes dans des moyennes. Dans ce cadre, on pourra débattre de la prise en compte ou non du postulat ergodique, du postulat d'équiprobabilité des états microscopiques, compte-tenu de la façon dont les états sont définis (particules discernables ou non, dégénérescences, façons de nommer ou ranger les particules...).

#### *L'entropie*

Sans reprendre le détail des formulations, nous pouvons conclure de ces considérations que l'entropie, pas plus que d'autres grandeurs de la thermodynamique, n'apparaît comme une grandeur intrinsèque à une parcelle de matière, quelle que soit sa taille. C'est une grandeur macroscopique liée à l'organisation d'un système d'un grand nombre de particules. Le second principe lui-même n'est pas une loi universelle de la nature, c'est une loi valable pour les systèmes macroscopiques les plus probables ; il peut être violé comme certaines expériences numériques (simulation moléculaire) ou pratiques, le montrent. La notion familière de probabilité des états se relie aussi à celle de probabilité des trajectoires qui y conduisent, c'est-

à-dire que les considérations sur le terme des évolutions à l'équilibre se relie à celle portant sur les évolutions elles-mêmes. L'expression mathématique même de l'entropie dépend d'un certain nombre d'hypothèses, ne serait-ce que celle d'extensivité ou non des systèmes.

## 7. Conclusion. L'architecture de la thermodynamique

Au terme de ce parcours, il faut examiner notre façon de comprendre l'architecture de la thermodynamique. Nous nous sommes permis de discuter le choix possible d'hypothèses faites à deux niveaux simultanément (microscopique et macroscopique) et non un seul. Cela peut poser problème. En effet, dans une bonne démarche scientifique, il semblerait que nous devions faire des hypothèses à un seul niveau, et confronter les prévisions que l'on peut faire à partir d'elles avec les résultats expérimentaux. Les deux architectures des figures 1 et 2 relèvent de cette dernière démarche, que l'on pose les hypothèses au niveau microscopique (d'où va suivre comme conséquence ce qui concerne le niveau macroscopique), ou que l'on pose des hypothèses autonomes et générales sans se poser la question de l'échelle (cf. l'Ecole Keenan). Si on fait des hypothèses à deux niveaux simultanément et indépendamment comme représenté sur la figure 3, comment les accommoder ? Ne risque-t-on pas de tomber sur des contradictions ? Comment même aller jusqu'à vouloir fixer de façon indépendante quatre groupes d'hypothèses (en rajoutant celles des postulats statistiques et celle du nombre N) ?

La réponse à ces questions peut tenir a priori dans plusieurs modes d'explication, et la détermination de leurs parts respectives mérite une recherche complémentaire.

-1) On peut dire tout d'abord que les hypothèses faites au niveau microscopique et au niveau macroscopique ne sont pas indépendantes, c'est-à-dire sont dans une certaine mesure *équivalentes*, comme le sont par exemple les formulations locales et globales de la mécanique.

-2) On peut dire aussi que les deux groupes d'hypothèses sont *distincts mais complémentaires*. Ils ne portent pas sur les mêmes degrés de liberté des systèmes et ne sont pas en concurrence.

-3) Un troisième point de vue regroupe les deux points précédents : des hypothèses différentes vont ensemble (d'une certaine façon elles sont ainsi équivalentes) dans la mesure où elles sont posées en opposition les unes avec les autres dans des *relations de récursivité*. Cela relève très fondamentalement de la démarche générale de la pensée et n'est pas spécifique à la thermodynamique. On l'exprime en disant que l'on pense par relation : tout ce que l'on

défini se rapporte à tout le reste qu'on laisse de côté ; la conséquence pour nous est que l'on ne peut faire des choix indépendants au niveau microscopique et au niveau macroscopique car ces deux niveaux se définissent l'un par l'autre. La discussion sur l'énergie par exemple ne peut éviter ces bouclages entre les niveaux macroscopique et microscopique : l'énergie c'est ce qui se conserve dans une transformation (aspect macroscopique), mais la transformation elle-même est définie en se rapportant à des entités individuelles auxquelles on semble attribuer des qualités substantielles. La poursuite de cette récursivité tient en ce que les valeurs des grandeurs à attacher aux particules ne sont connues qu'à travers des transformations globales... Ou encore, la valeur de la masse d'une particule en relativité générale ne concerne pas la particule seule mais exprime les interactions avec l'ensemble des masses de l'univers. On pense aussi à la définition des fonctions d'onde pour les particules microscopiques qui contient en elle-même un aspect macroscopique. Ces aspects de récursivité entraînent une certaine latitude, ou incertitude dans la définition des concepts (qui se relie à celle portant sur les résultats des mesures), ce qui s'exprime par des degrés de liberté que nous pourrions appeler épistémologiques ; on arrête un processus qui conduirait à une régression à l'infini par une désignation : on montre ce sur quoi on s'appuie, sans prétendre le définir (comme le rappelait Poincaré, ce ne sont pas les choix eux-mêmes que l'on confronte à la réalité, mais des rapports de choix, d'où l'intervention de degrés de liberté internes à la démarche).

- 4) Une quatrième façon de voir est de supposer que les *degrés de liberté interne sur les postulats statistiques* etc. (liées aussi au nombre N) peuvent accommoder les choix faits de part et d'autres au niveau microscopique et au niveau macroscopique.

- 5) On peut enfin constater (ce cas n'est pas à écarter a priori) qu'il y a incompatibilité entre les hypothèses adoptées. En particulier, entre la façon de construire la fonction entropie au niveau macroscopique à partir de la quantité de chaleur et la température, et celle reposant sur des hypothèses statistiques sur les probabilités des différents états.

A l'arrivée, comme ailleurs dans la science, il y a possibilité de pluralisme théorique. Pas plus d'ailleurs que dans aucune science, les grandeurs et les lois de la thermodynamique ne sont strictement « imposées » par la réalité et l'expérience. Il y a arbitraire ; on accomode ensuite de différentes façons : par les degrés de liberté internes, les désignations (avec incertitude) et les nombreuses modalités de ce que l'on appelle l'interprétation.

## **Remerciements**

Ce texte a été préparé pour la JETC (Joint European Thermodynamics Conference) XI, qui s'est tenue à Chemnitz, en Allemagne du 27 au 29 Juin 2011. L'auteur remercie les chercheurs avec qui il a discuté la matière présentée ici, en particulier les membres du comité scientifique des JETC ; il remercie aussi les participants aux Ateliers sur la contradiction de Saint-Etienne (2009, 2011) pour les échanges sur les aspects épistémologiques, apportant des éclairages indispensables pour la compréhension des volets scientifiques.

## **Références :**

Dans cette première version du présent texte, la bibliographie détaillée n'est pas donnée. Elle comprendra ultérieurement des appels aux auteurs suivants : Andresen, Bedeaux, Beretta, Boltzmann, Dujardin et Guy, Gibbs, Guy (travaux sur les concepts de temps, espace et la théorie de la relativité ; réflexions épistémologiques sur l'expression des lois que nous écrivons sur le réel – notions de pluralisme théorique, récursivité, pensée par relation, contradiction etc.-), Hoffmann, Jou, Keenan, Kjelstrup, Lecoze, Maxwell, Mizony, Muschik, Poincaré, Richet, Rubi, etc.

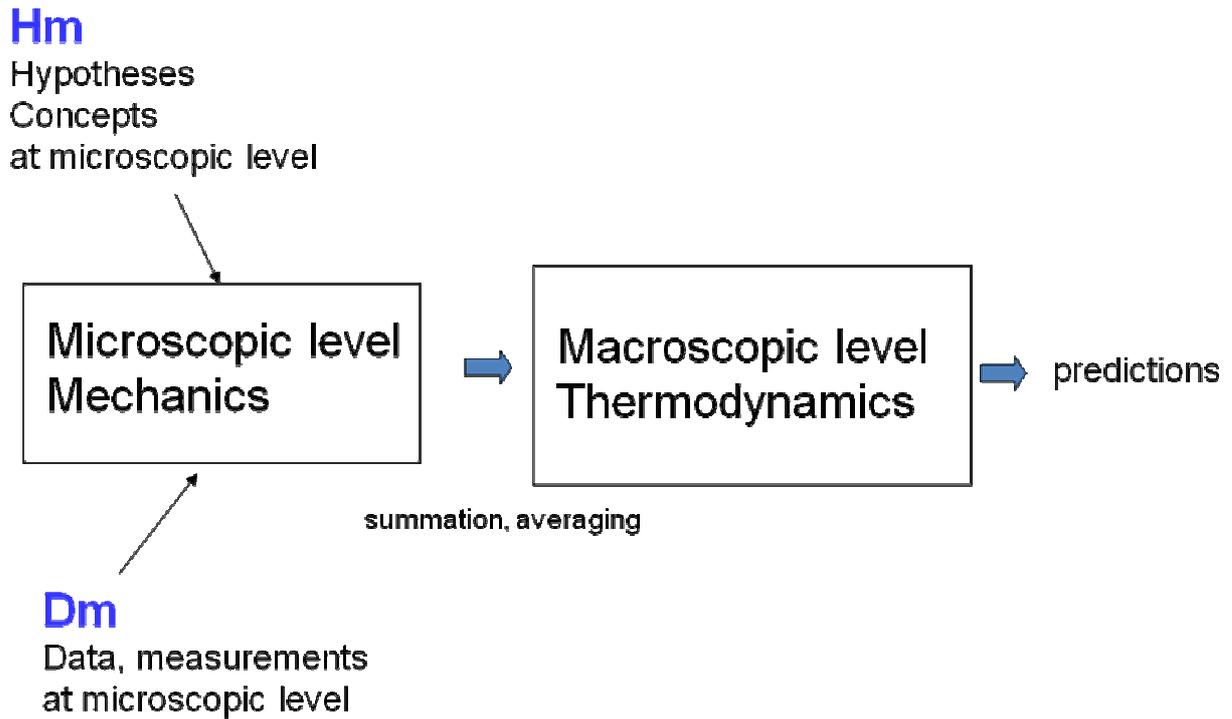


Figure 1

Une architecture de la thermodynamique (architecture n°1) où l'on suppose que tout est donné seulement au niveau microscopique.

**Légende commune aux trois figures :**

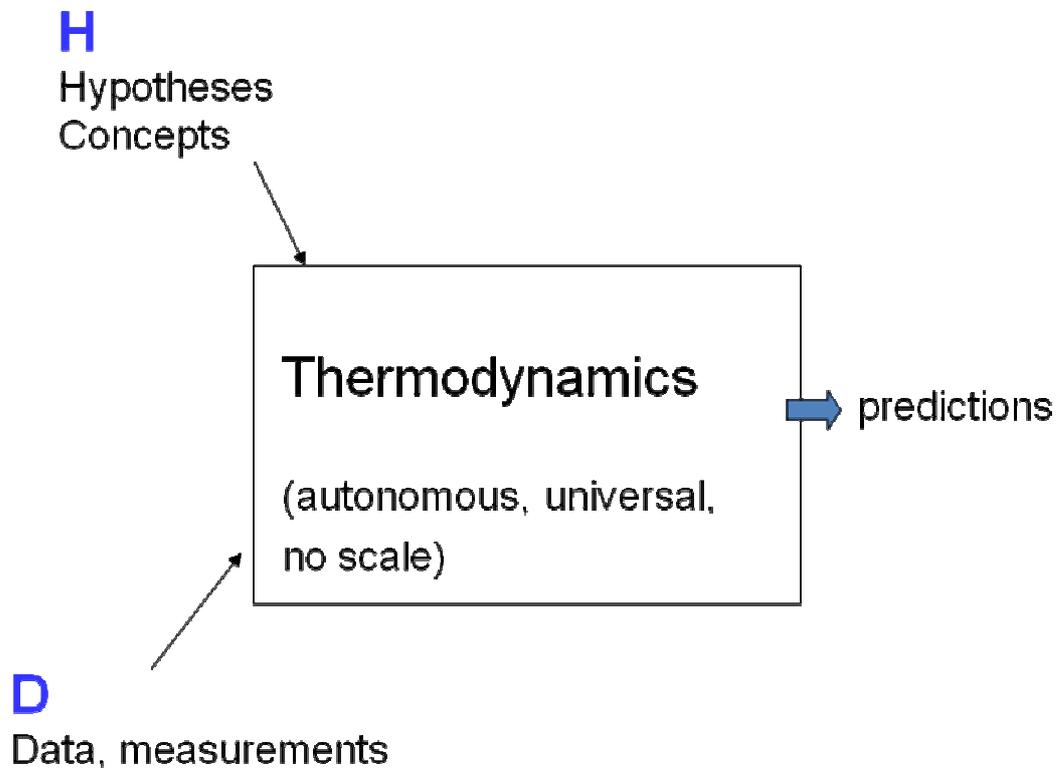
**Hm** = hypotheses, concepts, laws... at microscopic level  
 = { space, time, mass, position, velocity, momentum, kinetic/potential energy, Newton laws... }  
**Dm** = data, measurements on individual particles

**HM** = hypotheses, concepts, laws... at Macroscopic level  
 = { heat, internal energy, entropy... }  
**DM** = measurements on macroscopic systems

**HS** = hypotheses, rules... to go from microscopic to macroscopic level  
 = { extensivity property; ergodic postulate; definition of microscopic state and numbering of particles: degeneracy of states, discernable/ non discernable character; equiprobability of microscopic states ... }  
**DS** = proportion between sizes of microscopic and macroscopic systems  
 = **N** number of microscopic particles in the macroscopic system

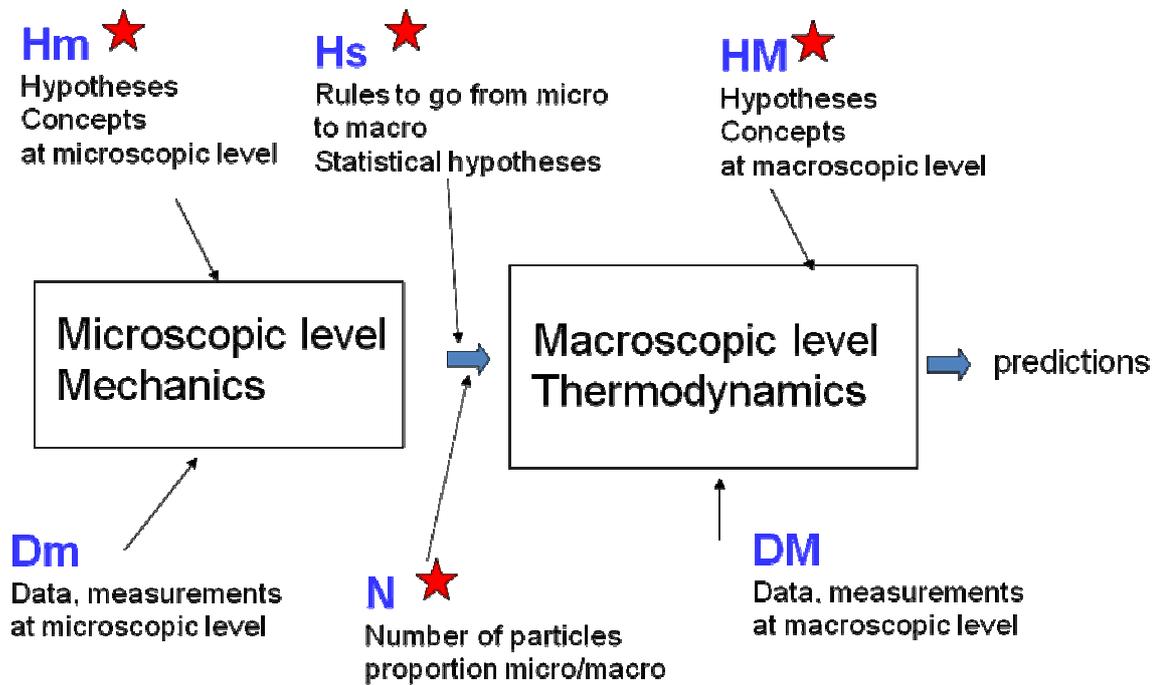
**H** = hypotheses, concepts, laws... on systems, whatever their size  
 = { mass, position, velocity, momentum, kinetic/potential energy...; heat, temperature, entropy... }  
**D** = data, measurements on systems, whatever their size

## Architecture n°2



**Figure 2**

Une autre architecture (n°2) où la thermodynamique est envisagée de façon complètement autonome et universelle, sans considération d'échelle.



★ Places with degrees of freedom to change the theory

Figure 3

Architecture 3.0 (il y aurait d'autres sous-variantes, voir Guy JETC XI) où l'on prend toutes les hypothèses aux différents niveaux et échelles.