

## Introduction

Nous utilisons de plus en plus d'objets, fruits de la création humaine. Ils sont constitués d'une matière particulière, avec une forme spécifique qui leur procure une fonctionnalité pour l'usage souhaité. Ces objets deviennent de plus en plus élaborés et forment des ensembles ou dispositifs toujours plus sophistiqués, allant jusqu'à la réalisation de machines. Pour décrire et classer ces objets, la méthode usuelle est d'observer leur comportement et d'analyser les phénomènes engendrés. Pour cela, il faut une démarche scientifique globale, qui permette de modéliser ces comportements en choisissant l'approche la plus générale possible, quelle que soit leur origine chimique. Les modèles physiques sont en général des concepts réducteurs de la réalité, basés au départ sur les systèmes mécaniques. Le passage de la mécanique à la thermodynamique phénoménologique, tout en gardant les principes variationnels de stabilité sur les *extrema* de fonctions potentielles, est le fruit des avancées conceptuelles obtenues durant ces deux derniers siècles. L'approche énergétique, avec l'introduction de la variable température ( $T$ ) et des grandeurs associées, est devenue indispensable. Ce faisant, le principe de conservation de l'énergie et celui d'évolution à partir de la fonction entropie deviennent incontournables. Nous allons montrer qu'une approche thermodynamique permet une analyse transversale, avec une classification plus générale que celle basée sur la nature chimique des matériaux. Ces critères, qui sont développés pour des systèmes thermodynamiques isolés, en équilibre ou dans une situation voisine, ne sont valables que pour un monde idéalisé. En pratique, un système échange de l'énergie et éventuellement de la matière avec l'extérieur : il peut se situer très loin de l'équilibre. Un comportement appelé dissipatif intervient alors, que nous introduirons. Cette description phénoménologique peut être étendue aux milieux vivants et aux sciences économiques, avec un degré de complexité croissant ; nous la présenterons dans la dernière partie.

Cette approche au niveau macroscopique sera complétée par une description microscopique faisant intervenir les acquis de la physique statistique et les principes

de la mécanique quantique. La théorie de l'information sera également incluse dans cette présentation, au niveau microscopique, sous la forme des méthodes expérimentales de stockage et de lecture de données informatiques. Comme les dimensions des dispositifs ne font que diminuer au cours du temps, de nouvelles classes de nanomatériaux sont introduites, incluant également les biomatériaux et leur approche mimétique. Ces miniaturisations nécessitent ainsi une description quantique des phénomènes physiques. Il faut alors concilier les deux niveaux d'approche relatifs au problème d'irréversibilité du temps et au principe d'évolution dans un système thermodynamique situé loin de l'équilibre. Pour cela, nous avons divisé le texte en trois parties principales.

1) Approche phénoménologique classique et classification fonctionnelle des matériaux :

– le chapitre 1 rappelle le caractère historique, basé sur la dualité entre le fond (la matière) et la forme de l'objet ou d'un dispositif ; ces approches respectives sont attribuées schématiquement à Aristote et Platon. Les progrès dans la connaissance de la matière montrent comment la géométrie, notamment celle des polyèdres, a influencé le développement de la chimie et de la biologie et a permis d'introduire la notion de matériau ;

– le chapitre 2 est un rappel des définitions thermodynamiques phénoménologiques utiles et des différentes situations possibles pour un système thermodynamique isolé ou échangeant avec son environnement. Ces situations sont plus ou moins éloignées de l'équilibre et sont classées à partir de la notion de seuil d'instabilité et de l'apparition de nouvelles organisations. Elles sont dites structures spatiotemporelles et peuvent aller jusqu'à des situations chaotiques. Dans ce contexte, l'analyse des procédés d'élaboration des matériaux à l'état solide permet une explication des formes caractérisées, à différentes échelles de longueur et obtenues par les processus de cristallogénèse ou de morphogénèse ;

– la classification des matériaux proposée au chapitre 3 est une conséquence de ce corpus thermodynamique. Elle est basée sur les propriétés intrinsèques d'une phase condensée organisée, en ajoutant le rôle actif des surfaces et interfaces, c'est-à-dire le contrôle des échanges possibles entre le système et son environnement. Cette approche permet de classer fonctionnellement les principales familles de dispositifs expérimentaux pour des contraintes et flux imposés, à partir de l'examen des réponses observées ;

– le chapitre 4, suite logique du précédent, est focalisé sur l'utilisation des matériaux dédiée à la capture et au stockage de l'énergie et à l'acquisition d'une information. Il présente les matériaux et les assemblages pouvant convertir et emmagasiner de l'énergie électrique, énergie secondaire vitale. Ensuite, l'enregistrement, le stockage et

la lecture d'une information par différents types de mémoires numériques sont abordés, en comparant les diverses solutions techniques proposées.

## 2) Description microscopique et nanomatériaux :

– le chapitre 5 marque une rupture dans cette démarche, avec l'introduction de modèles microscopiques et de la thermodynamique statistique. L'analyse en termes d'assemblée de particules relève alors des traitements en physique statistique et des postulats de la mécanique quantique. Cette approche permet de redéfinir les grandeurs thermodynamiques, en particulier la notion d'entropie statistique. La théorie de l'information est alors introduite dans le cadre de cette description microscopique généralisée ;

– le chapitre 6 relève de l'apport expérimental, en introduisant d'un côté la chimie de synthèse créant des nouveaux matériaux fonctionnels et de l'autre le développement des principales nanotechnologies nécessaires pour les développer. Ce sont les deux jambes nécessaires à une avancée permettant d'accéder aux nanosciences ;

– le chapitre 7 est le prolongement du précédent : il présente les développements relatifs à l'ingénierie et l'électronique moléculaire. Dans ce cas extrême, le système n'est plus constitué que de quelques centaines ou dizaines d'entités, voire d'une molécule unique. Nous présentons principalement les résultats concrets dans les domaines de la nanoélectronique, de la nanophotonique et du nanomagnétisme. Ils débouchent sur le développement des mémoires quantiques et de leur logique propre, pour un ordinateur du futur.

## 3) Extensions aux organismes vivants et aux systèmes économiques :

– le chapitre 8 permet de passer aux organismes vivants, en rappelant tout d'abord leur comportement au niveau moléculaire et cellulaire. Dans la même approche énergétique, ce sont des systèmes situés en dehors de l'équilibre conduisant à la création d'une organisation spécifique dans les milieux vivants. Le but est de présenter les travaux concernant les biomatériaux et les biosystèmes, souvent de taille nanométrique, et réalisés par mimétisme avec ces organismes. Les problèmes de conversion et de stockage de l'énergie seront abordés, ainsi que ceux concernant l'informatique génétique et les biotechnologies ;

– le chapitre 9 est consacré à l'application des concepts thermodynamiques généralisés pour les espèces vivantes et leurs populations dans les systèmes écologiques et géologiques, et plus généralement les milieux naturels. Ces systèmes présentent des structures spatiotemporelles pouvant atteindre un état chaotique. En particulier, le comportement des systèmes hiérarchisés présentant des rythmes et des cycles naturels ou anthropomorphiques est abordé ;

– au chapitre 10, une extrapolation thermodynamique de la macroéconomie est introduite. Considérée comme une science expérimentale basée sur l'énergie, elle reçoit un apport en termes thermodynamiques hors équilibre, qui est analysé. Nous examinons ensuite l'aspect dynamique des systèmes économiques et surtout financiers, qui peuvent aller jusqu'à des situations instables de nature chaotique ;

– une synthèse, sous forme de conclusion, reprend la classification abordée pour les matériaux, en partant de l'aspect historique introductif sur la forme et la fonctionnalité. L'analyse des concepts thermodynamiques, énergie et entropie de systèmes de plus en plus complexes, est revisitée. Dans ces systèmes dynamiques, les notions de hiérarchie, de cycles ou de rythmes sont finalement analysées. Pour terminer, la validité et les limites de cette approche de thermodynamique généralisée sont discutées.

Dans cette analyse horizontale, nous ne développerons pas les propriétés fondamentales de la matière, mais leur développement technologique : comment concevoir et réaliser un objet ou « artefact », ou encore un dispositif présentant une forme optimisée pour l'usage choisi. Le but est de classer les réponses thermodynamiques d'un tel système en fonction des contraintes, des flux extérieurs ou encore de *stimuli* ponctuels. Les mots clés utilisés à plusieurs reprises sont définis dans un glossaire, qu'on trouvera en fin d'ouvrage, afin de préciser leur sens dans ce contexte. Les références bibliographiques en fin de chapitre concernent des ouvrages de référence ou des articles généraux permettant de situer le thème abordé. Elles sont souvent complétées par des publications récentes, qui permettent d'illustrer l'état d'avancement d'un sujet particulier, mais elles ne sont pas exhaustives, en particulier dans les derniers chapitres.

Sur le plan conceptuel, nous verrons au cours des chapitres que tout un courant de pensée s'est développé depuis presque un siècle. Il est matérialisé par des scientifiques qui auraient pu être nobélisés, comme Poincaré, Shannon, Jaynes, Brillouin, Landauer ou Mandelbrot. Progressivement, les théories établies au cours du XX<sup>e</sup> siècle ont pris en compte que tous ces systèmes thermodynamiques réels fonctionnent en dehors de l'état d'équilibre idéal. Ils sont dynamiques, conditionnés par leurs échanges, énergétique, massique, ou même informationnel, avec leur environnement. D'abord situés proches de l'équilibre, ils présentent toujours une réponse linéaire, qui devient insuffisante quand ils s'en éloignent. À partir d'un point critique ou seuil, ils donnent naissance à des systèmes non linéaires dissipatifs, pouvant présenter de nouvelles auto-organisations et aller jusqu'à un comportement déterministe défini comme étant chaotique. C'est ce que nous allons présenter, en nous centrant d'abord sur le comportement des différentes classes de matériaux.