

Roland Borghi



# Thermo-mécanique et modélisation par systèmes



531-29.1

*Cepaduès*  
- ÉDITIONS -

## AVANT PROPOS

Prévoir le comportement d'objets ou de milieux, naturels ou artificiels, soumis à l'influence d'autres objets ou du « milieu extérieur », est toujours un souhait agréable et quelquefois une nécessité pressante. Cependant, les objets ou les milieux en question sont très divers (solides, fluides, en partie fluides et en partie solides, etc.), de formes et d'organisations plutôt complexes. Au premier abord, il paraît donc nécessaire d'utiliser des méthodes diverses et complexes, adaptées à chaque situation. Mais en même temps on pense aussi au grand intérêt d'une méthode générale, unique dans ses principes sinon dans sa mise en oeuvre, qui simplifierait cette apparente diversité.

Le problème peut se poser en effet suivant des points de vue a priori distincts, en considérant des phénomènes « physiques » différents, et les méthodes de description théorique ont été simplifiées en séparant ces points de vue. Le point de vue « mécanique » s'intéresse au mouvement et à la déformation de ces objets ; le point de vue « thermodynamique » s'intéresse à la température et aux échanges de chaleur entre des objets, en liaison éventuelle avec leurs déformations ; le point de vue « chimique » considère la possibilité de transformations chimiques en leur sein, et le point de vue « électrique » envisage la présence de phénomènes du même nom. Un même objet ou milieu en évolution peut cependant mettre en jeu ces divers phénomènes physiques simultanément, et il s'avère même que les objets les plus intéressants sont ceux où ces phénomènes « entrent en interaction ». Ceci renforce sérieusement l'intérêt de mettre au point une méthodologie qui soit assez générale pour pouvoir s'appliquer de façon semblable selon l'un ou l'autre de ces points de vue, et pour des objets divers, et surtout pouvant décrire les couplages physiques possibles et simuler leurs comportements généraux.

La matière que nous voyons est structurée jusqu'à une échelle très petite que nous ne voyons pas, et les propriétés des objets dépendent de cette structuration microscopique. Les atomes, les molécules, les électrons, et leurs arrangements et mouvements respectifs, jouent un rôle important pour ces propriétés. Ils sont cependant pour nous, c'est-à-dire avec des instruments et des concepts à notre taille, difficiles à connaître

avec précision, ou même impossibles à connaître en toute précision. La méthode d'approche que nous devons envisager doit donc être une approche macroscopique, qui considère les objets et les phénomènes à notre échelle, avec des moyens d'étude à notre échelle. Elle doit rester à cette échelle pour montrer une certaine généralité, car les structures à petite échelle montrent déjà une grande diversité, pour celles qui sont assez bien connues, et une diversité encore plus grande doit être même espérée pour celles qui restent à connaître. Il est bien sûr nécessaire de prendre en compte les structures, mouvements et interactions qui existent à ces petites échelles, puisqu'ils ont des conséquences à notre échelle, mais cette prise en compte doit se faire de façon globale, plutôt phénoménologique.

De fait, la possibilité d'une approche à la fois générale et simplificatrice n'apparaît maintenant plus clairement qu'après quelques siècles d'études des divers phénomènes, et de recherche de présentation coordonnée des connaissances acquises à leur sujet. Cet objectif ambitieux demande aussi de passer par des simplifications, que l'on est tenté, au premier abord ou même au second, de trouver toujours trop fortes. Mais l'utilisation de simplifications ne doit pas être toujours considéré comme un défaut, car elles donnent l'avantage d'acquiescer une compréhension globale de l'objet en question, qui ne soit pas perturbée par les détails plus secondaires. Il est cependant nécessaire que ces simplifications puissent être contrôlées, ou plus précisément qu'elles satisfassent trois conditions : d'une part ne pas présenter de contradictions cachées, d'autre part pouvoir être proposées de façon systématique et logique, et enfin pouvoir être évitées progressivement si c'est nécessaire.

Il est possible maintenant de donner une présentation d'une tentative de méthode générale de ce type, dans ses grandes lignes, en montrant ses hypothèses de base, sa cohérence interne, et certaines de ses applications simples. Cette méthode n'est pas fondamentalement nouvelle, elle a été développée progressivement, d'abord pour des applications particulières, de façon séparée et sous des formes un peu différentes, mais se retrouve finalement pour toutes les applications de ce que l'on pourrait appeler la « physique macroscopique ». C'est l'exposé général, mettant en évidence la structure unifiée de la démarche, applicable de plusieurs façons pour des situations diverses, limit des approches déjà existantes que l'on aurait pu au premier abord croire indépendantes, qui pourra sembler nouveau. Il restera à l'échelle macroscopique, tout en utilisant les conséquences de comportements microscopiques : pour une meilleure compréhension, on brossera des descriptions de phénomènes à petite échelle, mais elles ne

seront que qualitatives, et aucune démonstration ne sera basée sur des hypothèses de structures microscopiques particulières.

Cette présentation a été développée dans deux livres « compagnons ». Le premier, que vous avez entre les mains, « découpe » les objets en un ou plusieurs « systèmes » de taille finie, comme il est d'usage pour la mécanique des systèmes mais aussi dans le domaine général du génie des procédés. Il a été intitulé « Thermo-mécanique et Modélisation par Systèmes ». La méthode générale prend alors la forme d'une « modélisation thermodynamique de systèmes composites ». Elle reprend dans une première partie ce qu'on a appelé « thermodynamique » du temps de Carnot et Gibbs, et la prolonge ensuite par la prise en compte d'évolutions hors équilibre, irréversibles. On peut facilement constater qu'elle se structure en quatre étapes successives, consistant à :

- Identifier des « systèmes thermodynamiques », ainsi que les variables qui les caractérisent, à notre échelle macroscopique,
- Trouver des « équations d'état », ou lois d'état, de ces systèmes, qui traduisent les structures microscopiques de la matière qui les compose,
- Ecrire les « équations de bilans » des variables extensives des systèmes, à l'échelle macroscopique encore, en tenant compte des grands principes de conservation de la physique,
- Trouver des lois complémentaires de comportement relatives aux phénomènes d'échange et de production irréversibles susceptibles de se produire, qui traduisent encore des comportements microscopiques.

Le résultat consiste alors en des équations différentielles permettant de suivre les évolutions dans le temps des systèmes. Il reste ensuite à trouver les conditions initiales de ces équations, et à les intégrer (analytiquement très rarement, numériquement en général). Il est clair que des comportements très divers peuvent alors être découverts...

Cette approche globale « par systèmes » est d'une grande utilité pour mettre en évidence les grandes propriétés des évolutions de l'objet ou ensemble d'objets étudié. Elle peut servir pour des projets industriels, et aussi pour étudier et mettre en place des procédures ou des dispositifs de contrôle de ces objets. Mais elle met aussi en évidence certaines difficultés liées à la prise en compte des structures des objets à une échelle plus petite que celle des systèmes définis. Ces difficultés peuvent se résoudre, en conservant la même approche générale, en étendant la méthode pour représenter un objet par un nombre très grand de systèmes très petits (en restant toujours à notre échelle), et l'on abandonne alors le domaine des milieux continus.

Le second livre, intitulé « Les milieux continus multiphysiques hors d'équilibre et leur modélisation », se développe en trois parties suivantes. Il généralise l'approche, pour la rendre plus précise, en rassemblant la classique mécanique des milieux continus, avec ses aspects plus détaillés traités des écoulements de fluides et des milieux solides, et plusieurs pans de la physique macroscopique. Les quatre étapes de l'approche, citées plus haut, sont toujours valables et s'adaptent naturellement aux milieux continus.

La première partie de ce second ouvrage considère les milieux continus les plus simples, classiquement traités dans les cours de mécanique des fluides, mécanique des solides et transfert de chaleur et de masse. La seconde partie montre comment on peut aborder les situations plus compliquées où des phénomènes réactifs se produisent, ou des interactions électromagnétiques, ou des phénomènes radiatifs.

La dernière partie traite de milieux encore plus complexes à cause de leur « structure à petite échelle » (échelle d'espace ou de temps), structure qui peut être alors très hétérogène et même aléatoire. L'approche ici tente d'être moins phénoménologique, même si il ne s'agit pas d'étudier les échelles microscopiques. L'exemple le plus simple de tels milieux est celui d'un fluide en écoulement turbulent ; les milieux à plusieurs phases, avec des composants fluides et solides, en sont les exemples les plus difficiles. Ces milieux à plusieurs phases pourraient être appelés « continus par morceaux », mais ces morceaux ne peuvent être décrits individuellement et une modélisation « à grande échelle » doit être proposée. Les modélisations de ces différents milieux ne sont pas des problèmes disjointes et peuvent se mener encore dans le cadre de l'approche générale présentée ici, se confortant par leurs aspects communs. Nous montrons les bases et la méthodologie communes de cette généralisation de la thermomécanique des milieux continus, mais aussi comment la spécificité des situations peut et doit s'exprimer dans la modélisation des propriétés des structures à petite échelle. Cette partie du livre concerne des problèmes encore largement dans le domaine de la recherche, et nous ne pouvons pas pousser trop loin l'exposé.

L'exposé développé dans ces deux ouvrages se veut à la fois descriptif et imagé, et à la fois abstrait, formel et précis, deux choses qui ne sont pas toujours compatibles. Cela nous semble cependant nécessaire d'une part car les ouvrages s'adressent à en premier lieu à des élèves-ingénieurs ou étudiants scientifiques, et d'autre part car il s'agit de développer une démarche générale qui n'est pas classique, même pour des lecteurs plus avancés. La présentation successive, mais sur des bases identiques, de la modélisation par plusieurs systèmes de taille finie et par des milieux continus, nous semble instructive. D'abord, elle permet de voir que ces

deux méthodes de modélisation, qui sont employées très souvent dans des domaines d'application différents, ne sont pas contradictoires. De plus, ces deux approches se complètent, non seulement sur le plan de l'exposé théorique, où on peut discuter de questions thermodynamiques de façon plus simple avec des systèmes, mais aussi sur le plan pratique, où une modélisation par systèmes peut être contrôlée sur des exemples précis par une modélisation continue, et utilisée pour des optimisations ou du contrôle dans un domaine plus large.

L'exposé se développe tout au long de ces deux livres avec un même point de vue, et, bien évidemment, une même façon de présenter les choses, même dans des domaines distincts où, usuellement, le vocabulaire et même les approches classiques sont différents. C'est l'objectif même de ces ouvrages de montrer que c'est possible. Les spécialistes de ces différents domaines ne s'offusqueront pas, espérons-le, de présentations qu'ils pourraient juger bizarres, en constatant qu'elles permettent un rapprochement et des comparaisons intéressants avec d'autres domaines. La présentation choisie n'est peut-être pas la seule à permettre cela, d'ailleurs, mais d'autres ne se sont pas encore aussi clairement imposées. Elle est sûrement perfectible, amène quelquefois à se poser des questions auxquelles répondre n'est pas facile. Toutes ces questions ne sont pas posées ici ; pour celles qui le sont, il nous semble que les réponses données ici sont bonnes - mais si l'on ferme la porte à l'erreur, par où entrera la vérité?

Le lecteur pourra exercer sa compréhension au long des livres en faisant des calculs intermédiaires qui ne sont pas très développés, en particulier dans les premières parties de chacun des livres.

A la fin du premier livre figure un chapitre décrivant la modélisation par systèmes de trois ou quatre dispositifs pratiques, simples ou moins simples. La description est assez détaillée, donne tous les éléments pour aller jusqu'au bout des calculs, mais n'y va pas. Ce sont des problèmes d'applications proposés au lecteur spécialement intéressé, en particulier étudiant. Ce sont aussi des exemples destinés à inciter à la fabrication de modèles semblables pour d'autres dispositifs pratiques.

Pour ce qui concerne le second livre consacré aux milieux continus, des problèmes simples jugés particulièrement instructifs, pour calculer des évolutions réversibles, ou presque, de milieux fluides ou solides, sont traités en détail. Le dernier chapitre de la première partie donne et traite en détail quelques problèmes « emblématiques » de thermomécanique avec transferts de chaleur et de masse dans des milieux fluides ou solides. Les questions de conditions aux limites sont particulièrement discutées. Ces problèmes peuvent servir de « travaux dirigés » pour des étudiants, si on ne lit vraiment l'exposé de la solution qu'après l'avoir sérieusement cherché.

## TABLE DES MATIÈRES

L'exposé ne développe pas complètement tous les sujets qu'il aborde, et la première raison est que cela le rendrait trop long. Mais, de plus, c'est l'interrelation de ces différentes questions entre elles qui est le véritable objet du livre. Les développements, sous une forme tout à fait complémentaire à la démarche suivie ici, existent dans certains ouvrages, chacun pour leur domaine d'application particulier, et se poursuivent encore dans des articles de recherche. Ces ouvrages et articles sont cités à la place qui leur convient.

L'organisation et l'écriture de cet ouvrage sont le résultat d'une trentaine d'années d'enseignement et de recherche. Il doit donc beaucoup à de nombreuses personnes, dont les élèves (consciemment ou inconsciemment). Mes professeurs, et ensuite mes collègues, y ont contribué d'un côté par les grandes orientations, et d'un autre côté par des discussions détaillées et pressées sur des questions délicates. Il m'est nécessaire et agréable de remercier particulièrement pour ces discussions : M. Baerère, L. Napolitano, P. Carrière, P. Valentin, D.B. Spalding, F. Hirsinger, M. Charpenel, J.-P. Taran, F. Dipoirieux, B. Chéron, C. Thénard, M. Champion, Ha Minh Hieu, C. Dopazo, O. Simonin, J. Garrigues, S. Bonelli, D. Boussia.

### 1<sup>ère</sup> partie : Bases de la Thermomécanique des systèmes composites ..... 11

<b>Chapitre I : Les variables extensives et intensives, les bilans, les équilibres</b> .....	11
Le système et ses variables .....	11
Premier postulat de base .....	15
Les échanges et les équations de bilan .....	16
Les états stationnaires et les « équilibres thermodynamiques » .....	18
Signification physique microscopique de l'énergie interne .....	23

<b>Chapitre II : L'entropie, la température, le « second principe »</b> .....	29
Le second postulat .....	29
Les « équations d'état » .....	31
Propriétés des états d'équilibre .....	33
La forme duale des équations de Gibbs .....	36
Une interprétation du second postulat .....	37

<b>Chapitre III : Les potentiels thermodynamiques, les relations de Maxwell</b> .....	39
Les potentiels pour un gaz à deux variables .....	39
Les potentiels en général. Les relations de Maxwell .....	42
Les capacités calorifiques et vitesses du son .....	43

<b>Chapitre IV : Les équations d'état de divers systèmes simples</b> .....	45
Gaz simple « idéal » .....	45
Gaz « parfait » .....	46
Gaz de Van der Waals. Gaz « réel » .....	46
Corps « incompressible » .....	47
Solide élastique unidimensionnel .....	49
Solide unidimensionnel déformable et dilatable linéaire .....	50
« Indifférence matérielle » .....	51

<b>Chapitre V : Les mélanges</b> .....	53
Les variables extensives .....	53
Mélanges parfaits, en équilibre de pression, en équilibre thermique .....	56
Équations d'état d'un mélange parfait, en équilibre thermique, de gaz .....	58
Les « mélanges » fluides à deux phases, avec ou sans échanges de masse entre phases .....	60

Phénomènes interfaciaux .....	66
Exemple d'un mélange gazeux hors d'équilibre thermique .....	67
Notions sur les mélanges non parfaits .....	70
<b>2<sup>ème</sup> partie : Modélisation des évolutions des systèmes .....</b>	<b>73</b>
<b>Chapitre I : Les évolutions thermodynamiques,</b>	
<b>réversibles ou non .....</b>	<b>73</b>
Hypothèse de l'équilibre « glissant » .....	73
Les principes de la physique .....	74
Les flux d'énergie totale .....	75
Justification microscopique de la notion de « flux de chaleur » .....	77
Retour sur la pression et la température « thermodynamiques » .....	81
<b>Chapitre II : Les transferts de chaleur et de masse .....</b>	<b>85</b>
Bilan d'entropie de systèmes .....	86
Lois phénoménologiques linéaires des processus hors d'équilibre .....	87
Diffusion de masse .....	90
Sur la physique des transferts irréversibles de chaleur et de masse entre systèmes .....	93
<b>Chapitre III : Les systèmes réactifs .....</b>	<b>101</b>
Définitions. L'équilibre chimique .....	101
Propriétés de l'équilibre chimique .....	103
Introduction à la cinétique chimique .....	105
Etude d'un réacteur chimique homogène .....	109
Le système « prédateur-proie » .....	112
<b>Chapitre IV : Les systèmes électrisés .....</b>	<b>117</b>
Description thermodynamique .....	117
Bilans d'énergie et d'entropie .....	119
Les effets thermoélectriques .....	120
<b>Chapitre V : Exemples de modélisation de machines et systèmes thermiques .....</b>	<b>123</b>
Oscillations d'un système thermomécanique de deux sous-systèmes ...	124
Un moteur à piston à allumage commandé .....	130
Un moteur Diesel .....	135
Un foyer de turboréacteur .....	139
Critique de la modélisation globale par systèmes .....	142